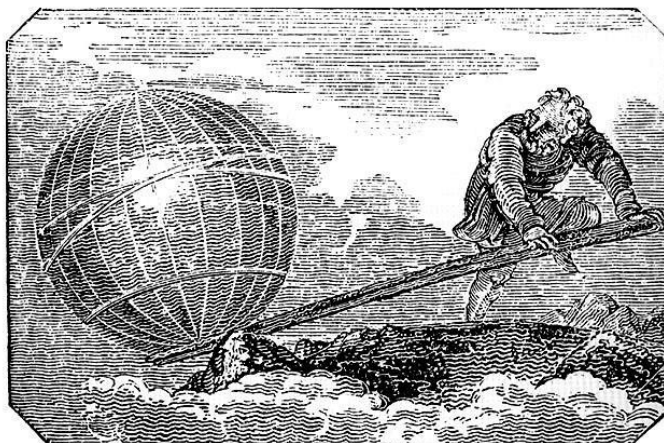


DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA

Prof. Edgar Serna M. (Ed.)



Editorial
Instituto Antioqueño de Investigación

Edgar Serna M. (Ed.)

Desarrollo e Innovación en Ingeniería

Primera Edición

ISBN: 978-958-59127-3-1

© 2016 Editorial Instituto Antioqueño de Investigación



**Medellín - Antioquia
2016**

Serna, M.E. (Ed.)
Desarrollo e Innovación en Ingeniería -- 1a Edición
Medellín, Antioquia
Editorial Instituto Antioqueño de Investigación, 2016
pp. 558. Investigación Científica
ISBN: 978-958-59127-3-1

Desarrollo e Innovación en Ingeniería
© Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Edición: Septiembre 2016
ISBN: 978-958-59127-3-1
Hechos todos los depósitos legales
Publicación electrónica gratuita

Imagen portada: Arquímedes
Mechanics Magazine - [http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Archimedes_lever_\(Small\).jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Archimedes_lever_(Small).jpg)
Dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1921693>

Copyright © 2016 Instituto Antioqueño de Investigación (IAI)TM. Except where otherwise noted, content in this publication is licensed under the Creative Commons Attribution, NonCommercial, ShareAlike 3.0 Unported License.

Global Publisher: Instituto Antioqueño de Investigación (IAI)
Cover Designer: IAI, Medellín, Antioquia.
Editorial Instituto Antioqueño de Investigación is trademarks of *Instituto Antioqueño de Investigación*. All other trademarks are property of their respective owners.

The information, findings, views, and opinions contained in this publication are responsibility of the author and do not necessarily reflect the views of *Instituto Antioqueño de Investigación* (IAI), and does not guarantee the accuracy of any information provided herein.

Diseño, edición y publicación: Editorial Instituto Antioqueño de Investigación (IAI)
Instituto Antioqueño de Investigación
<http://fundacioniai.org>
contacto(AT)fundacioniai.org

© 2016 Editorial Instituto Antioqueño de Investigación
Medellín, Antioquia

El desarrollo de la humanidad, en todas las épocas, ha logrado el progreso y los resultados que hoy disfruta gracias a las propuestas y proyectos de los investigadores alrededor de la ingeniería. Esta disciplina, con todas sus especialidades, se convirtió en bastión del desarrollo humano y, desde siempre, acompaña con ingenio permanente el surgimiento de ideas que se materializan en productos y que, posteriormente, se innovan para obtener mejores resultados.

Los ingenieros son profesionales útiles y necesarios en la sociedad, porque sus aportes, en la mayoría de casos, les brindan comodidades y una mejor calidad de vida a las personas. Por eso es que se necesitan espacios en los que ellos puedan mostrar su trabajo, a la vez que compartir con sus colegas y compañeros las ideas que podrían materializarse en grandes desarrollos. De esta manera es que las naciones logran progreso y desarrollo, trabajando en comunidad y reforzando o reformulando el trabajo de todos, en beneficio del progreso científico-ingenieril.

Las universidades, institutos y centros que se dedican a investigar, son el soporte para que estos profesionales formulen y lleven a cabo líneas de investigación. Pero, asimismo, es necesario cambiar la estructura y las opciones de apoyo para lograrlo. Las ideas no se materializan en una franja de tiempo definida, sino que se van haciendo comprensibles solamente con el avance del conocimiento y con el trabajo del investigador en un lapso de tiempo imposible de establecer. Apoyar a los investigadores únicamente a través de proyectos, es delimitar el desarrollo a unos objetivos que se tienen que alcanzar en los meses o años definidos en un cronograma. Los ingenieros, y los investigadores en general, necesitan que se les patrocine su investigación, sin fechas, sin cronogramas y sin productos en momentos determinados, porque investigar no es una labor que se pueda predefinir y, mucho menos, delimitar en el tiempo.

En este libro, *Desarrollo e Innovación en Ingeniería* edición 1, se presentan los trabajos de distinguidos estudiantes y profesionales de la ingeniería que, luego de desarrollar sus ideas y de prepararse para dar a conocer sus logros, construyeron cada uno de los capítulos que contiene. El lector podrá encontrar aportes desde las ingenierías: Química, Mecánica, Ambiental, Industrial, Civil, Aeronáutica, Electrónica, y desde las Ciencias Computacionales. Cada capítulo es un mundo de aportes y de ideas que su autor quiere dar a conocer, de forma tal que ese conocimiento se comparta y para crear comunidad alrededor de su trabajo.

Esta primera edición se convierte en una fuente de consulta obligada para todos aquellos que piensen investigar en ingeniería, lo mismo que para quienes ya lo están haciendo. El desarrollo y la innovación contenida en cada página del libro es material invaluable para sociedad, para la ingeniería y para la ciencia, porque el conocimiento que aportan al cuerpo de conocimiento no se puede encontrar en otra parte.

Esperamos que cada lector y cada autor de este libro lo utilice en beneficio de todos y que, a la vez, lo referencie para que muchos otros lo conozcan y disfruten de lo que sus colegas están trabajando en todo el mundo.

	Pág.
1. Efecto de la acidez sobre la actividad catalítica de zeolitas HZSM-5 para su aplicación en el reciclaje químico de desechos plásticos de polipropileno Yuliana Franco, Eliana Higueta, Omar Gutiérrez	7
2. Predicción de esfuerzos residuales en procesamiento de polímeros por técnicas de superficies de respuesta y simulación Juan Posada, Juan Sierra, Carlos Vargas	19
3. Diseño de un engranaje con perfil de diente especial bajo criterios geométricos y de resistencia a fatiga Pedro Martínez H., Nelson Arzola de la P.	33
4. Problemas respiratorios y cáncer en vías aéreas asociados a la contaminación atmosférica: Una revisión del análisis del riesgo potencial en el Valle de Aburrá Jhon F. Narváez, Erika Castrillón, Francisco J. Molina	45
5. Uso de la biomasa extraída de los subproductos del arroz como aislante térmico Dahiana Medina, Angy Palma, Hans Castro	54
6. Evaluación y modelación de las condiciones hidráulicas del tanque de aireación de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Autónoma de Occidente Javier López G., Julio Cuaran C., Javier Holguín G.	64
7. Integración Universidad-Territorio: Propuesta de un modelo de universidad involucrada basado en diseño participativo para una Facultad de Ingeniería José L. Giraldo, José Aguilar Z., Alba L. Betancur	78
8. Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) como apoyo a la implementación de buenas prácticas de gestión financiera, basadas en conocimiento, en las Instituciones de Educación Superior Laura Pinto P., Leidy Guarín M., Luis Gómez F.	92
9. Aplicación para evaluar requerimientos financieros en el Grupo TCC usando cartas de residuales: Caso flota vehicular Jorge Pérez R., Leandro Muñoz G., Pedro Urrego S.	104
10. Propuesta metodológica para la evaluación de la amenaza de corredores viales de montaña de la red vial nacional Edison Garzón M.	117
11. Ecuaciones de módulo de elasticidad en concreto sin refuerzo deducidas desde ensayos no-destructivos: <i>Impact Echo</i> y velocidad de pulso ultrasónico Luis Zapata O., Juan García C., Gina Garrido O.	130
12. Changes in the Engineering & Construction Industry in the last few years Martha Garcia S.	148
13. Cuantificación de la información de diseño detallado en proyectos de construcción Edward Vargas, Guillermo Mejía	160
14. Validación de rendimiento y dinámica de vuelo de una aeronave no tripulada multipropósito Pedro Jiménez, Eliana Zuluaga, Andrés Téllez	180
15. Sistema de control simulado para mantener la trayectoria de un cohete balístico atmosférico no-teledirigido Angélica Rincón C., Yesid Parra R., José Urrego P.	207
16. Caracterización de un sistema propulsor aplicado en agricultura de precisión Daniel Mejía, Rafael Cerpa, Lina Toro	220
17. Estudio del rendimiento aerodinámico de un ala de envergadura variable para un planeador de entrenamiento Paula Carranza V., Jaime Escobar, Jorge Gaitán A.	232
18. Optimal power spectrum in the multisine experiment design Daniel Agudelo N., Piotr Lichota	247
19. Estudio de los modelos de turbulencia aplicados a la aerodinámica externa de un automóvil, mediante software de dinámica computacional de fluidos Rafael Cerpa, Eduardo Nieto, Lina Londoño	260
20. Prototipo medidor de potencia portátil de señales FM en la banda comercial Adriano Hoyos, William Díaz, Víctor Miramá	272
21. Sistema de monitoreo de condiciones técnicas y ambientales del sistema de transmisión de Unicauca Estéreo Diego Lizalda, Jhonatan Durán, Claudia Hernández	287

22. Diseño de un banco de pruebas para caracterizar motores de combustión interna y eléctricos	Luisa Mónico, Mayra Bogotá, Christiam Casas	304
23. Deformación en el campo magnético terrestre como variable para la localización de dispositivos móviles en interiores	Carlos Gómez, Natalia Torres	318
24. Estado del arte y aproximación metodológica a la evaluación de la innovación de productos en organizaciones del sector de las telecomunicaciones	Miguel Roldán A., José L. Giraldo, Alba L. Betancur	329
25. Selección e implementación de un prototipo de estación meteorológica aplicando IoT y herramientas Google	Ángel Rodríguez, John Figueredo	341
26. Diseño e implementación de un sistema de seguridad inalámbrico para la protección en instalaciones civiles y militares	Ingris Monterrosa G., Laura Martínez M., German Goez S.	353
27. Análisis del desempeño de un sistema prototipo de identificación por radiofrecuencia para controlar el acceso de personal en la alcaldía de Popayán	Yaneth López M., Lucero Manquillo L., Víctor Miramá P.	361
28. Diseño de un dispositivo de comunicación para monitoreo y control <i>on-off</i> de una red mediante el protocolo de comunicaciones IEEE 802.15.4	Jheison Ríos L., Víctor Copete A., David Goez S.	376
29. Ajuste de curvas: Red neuronal (perceptrón multicapa) vs Regresión simbólica	Rafael Moreno P.	386
30. Comparación de modelos y estándares de evaluación de calidad para una plataforma de aprendizaje virtual	Ana Álvarez C., Andrea Alarcón A., Mauro Callejas C.	401
31. Validación de guías de enseñanza y aprendizaje en áreas de ingeniería de requisitos siguiendo lineamientos de SWEBOK	Lorena Castillo G., Andrea Alarcón A., Mauro Callejas C.	414
32. Gamificación y videojuegos para la resolución de problemas tecnológicos por parte de técnicos, tecnólogos e ingenieros	Pablo Góngora T., Fernando Martínez R.	426
33. Detección de la mano en tiempo real basada en grafos isomorfos	Alexander Cardona L.	435
34. Algoritmo para protección de derechos de autor en imágenes por medio de señales de voz	María Palacios, Diego Torres, Dora Ballesteros	449
35. Sistemas Inteligentes para clasificación automática de clientes: Caso de estudio	Cynthia Vegega, Pablo Pytel, María F. Pollo C.	459
36. Strongly bioinspired, hardware-implementable cipherring	Jaime Parra P.	489
37. Estrategia de validación para aplicaciones móviles de salud	Leonardo Ramírez L., Edward Guillen P., Yuli Cifuentes S.	503
38. Prototipo para identificación de seguridad en envases de bebidas alcohólicas	Giovanny A. Cardona R., Fabio N. Rendón C., Rafael Reyes	515
39. Software de diagramado de UML: Definición de criterios de accesibilidad necesarios para la construcción de diagramas por usuarios con limitación visual	Luis Ortiz C., Anderson Aristizabal L., Francia Caraballo M.	533
40. Características de los programadores disléxicos	José Fuertes C., Luis González A., Loïc Martínez N.	545

1. Efecto de la acidez sobre la actividad catalítica de zeolitas HZSM-5 para su aplicación en el reciclaje químico de desechos plásticos de polipropileno

Yuliana Franco

Eliana Higuera

Omar Gutiérrez

Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín, Colombia

1. Introducción

1.1 La pirólisis como alternativa de tratamiento de residuos plásticos

En el consumo actual de polímeros, los commodities representan el 50% de la demanda mundial y su uso, en los últimos 50 años, ha aumentado de 7 Mton a 300 Mton. En la familia de los commodities, el polipropileno (PP) es, junto al polietileno, uno de los más importantes, distinguido con el número 5 en la clasificación internacional de plásticos. Es utilizado en la industria para la fabricación de tapas de botella, contenedores, autopartes y cubiertos plásticos, entre otros tipos de materiales. Evidentemente forma parte de los objetos/recursos que a diario se utiliza, pero luego de su uso primario normalmente pasa a ser desecho, contaminando el medio ambiente, acumulándose en los ríos junto a otros plásticos como el PET.

El consumo exponencial de este tipo de plásticos, la baja biodegradabilidad y la falta de incentivos para el buen manejo de sus desechos domésticos e industriales, ha desencadenado una importante acumulación de plásticos en el mundo entero con graves impactos socio-ambientales. Afortunadamente, se ha venido masificando la idea y la necesidad de reciclar, de tomar aquello que se llama *basura* y darle un nuevo uso, llevando a cabo el reclutamiento de los plásticos reciclables para realizar un nuevo proceso y/o producto con ellos. El reciclaje químico es una excelente alternativa para el procesamiento y/o tratamiento de los plásticos, porque permite tomar las cadenas poliméricas de las que se componen el PP y fraccionarlas en unidades más simples (oligómeros y/o monómeros), de manera que sea más sencillo reutilizarlo efectivamente y a otros tipos de plásticos. Esto propicia un proceso más óptimo, limpio y eficiente, no solamente de su tratamiento si no también del posterior uso que se les vaya a dar como materia prima (revalorización), reduciendo de paso la llegada de nuevos desechos plásticos a los vertederos y rellenos sanitarios [1, 2].

Si bien el reciclaje químico genera cambios estructurales, químicos y físicos en el material original, este proceso posibilitará el resultado de un nuevo material que se podrá utilizar, a la vez que es una opción para mezclarlo con otros materiales. El objetivo es obtener propiedades mecánicas más óptimas o mejorar las propiedades de otros compuestos plásticos, todo esto con base al uso que se les quiere dar. La tecnología detrás del éxito del reciclaje químico se sustenta en los procesos de de-polimerización, con los que se pueden diseñar esquemas industriales aprovechables y sustentables, con altos rendimientos y bajos desechos. Entre los métodos que constituyen el reciclaje químico se puede citar la quimiólisis, la gasificación y el craqueo (térmico y catalítico) [3], entre las que se destaca la pirólisis (craqueo realizado en ausencia de oxígeno) por sus ventajas operacionales, ambientales y económicas (Figura 1), entregando, fundamentalmente, una fracción remanente no-volátil y una serie de productos volátiles que abandonan el reactor.

La fracción no-volátil la componen, además del contenido mineral original en las materias primas, diferentes formas de carbón residual denominadas genéricamente como

char (cuando provienen de una pirólisis térmica) y *coque* (cuando provienen de una pirólisis catalítica), caracterizadas por ser estructuras poli-aromáticas. Este carbón residual se puede procesar posteriormente para liberar su contenido energético [4], para generar carbón activado (proceso Shell) y, últimamente, se ha explorado como una potencial fuente de generación de nanotubos de carbono [5, 6].

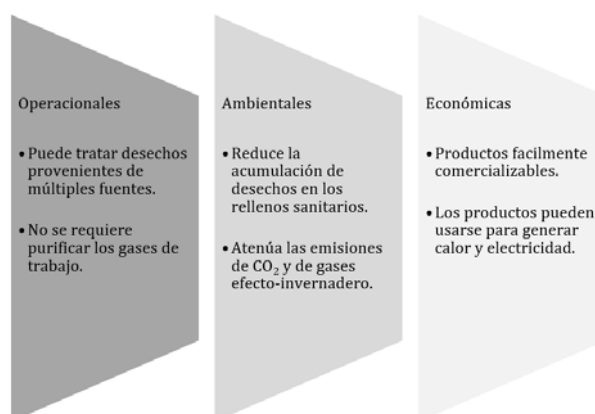


Figura 1. Ventajas del proceso de pirólisis [1, 2, 4]

De otro lado, los productos volátiles pueden ser condensables (líquidos, ceras, parafinas alifáticas y aromáticas, aceites) y no-condensables (gases). Los volátiles condensables se pueden emplear para generar combustibles y productos petroquímicos, mientras que de los gases se obtienen mezclas con poderes caloríficos de 22 - 30 MJm⁻³, dependiendo del material procesado. Por ejemplo, la energía teórica necesaria para pirolizar 1 kg de polietileno (~1.3 MJ [7, 8]) y transformarlo en una mezcla de combustibles de composición (%p/p): 2% gas, 46% gasolina, 34% diésel y 18% aceite residual [7], resulta ser del orden de un 3% de su poder calorífico (43.3 - 46.5 MJ/kg). Esto deja una ganancia neta aproximada de 42 MJ/kg, que le confiere a los productos de la pirólisis una oferta exergética comparable a la que se obtendría mediante la combustión directa (incineración) del polietileno, con el valor agregado que no genera las tan cuestionadas emisiones (dioxinas, furanos) propias de la incineración.

1.2 Pirólisis catalítica

Sin embargo, es importante considerar que la pirólisis pura (o térmica) arroja un amplio espectro de productos y requiere altas temperaturas (500 - 900 °C), por lo que, en pro de reducir sus demandas energéticas y lograr un mayor control en la selectividad y rendimiento de los productos obtenibles, se ha realizado una amplia cantidad de estudios en torno a la pirólisis catalítica. Con estos estudios, procurando obtener vectores energéticos incorporables en el mercado y operando aún a bajas temperaturas, la opción de pirólisis catalítica ha mostrado que entre los 390 y 425 °C puede obtenerse una óptima producción de diésel. Adicionalmente, el aumento de la velocidad de reacción reduce el volumen necesario del reactor y se puede aumentar la producción de iso-alcanos y compuestos ramificados, cíclicos y aromáticos [9], útiles en múltiples ámbitos de la industria petroquímica. Los catalizadores más ampliamente investigados para el craqueo catalítico son los ácidos sólidos, entre los que, los sistemas basados en silicatos (por ejemplo, MCM-41 [10, 11] y aluminosilicatos (zeolitas como HY, mordenita y HZSM-5 [12, 14], son una parte importante. De ellos, las zeolitas HZSM-5 destacan por tener una alta actividad catalítica (considerándose sólidos superácidos), un alto intercambio iónico, ser térmicamente estables y altamente selectivas [15].

1.3 Influencia de las características de las zeolitas en la pirólisis catalítica

En la pirólisis catalítica, aspectos de las zeolitas tales como el área superficial, morfología de los poros, fuerza y distribución de sus sitios ácidos, son fundamentales por su actividad e influencia sobre la gama de los productos a obtener con la pirólisis. A la variación en la distribución y acidez de los sitios activos se le ha prestado un amplio interés y se han realizado numerosas investigaciones para establecer protocolos de modificación de la acidez en zeolitas. Los intercambios iónicos son típicos en baños de ácido (como nítrico o clorhídrico), o de sales como el nitrato de amonio, para reemplazar los cationes propios de la zeolita (como $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$) por iones hidrionio (H^+). También es común usar sales para incorporar iones metálicos alcalinos [16, 17] (como el Na^+) o de transición [18-21] (como el Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} , Fe^{3+} y La^{2+}).

Buscando obtener versiones de la zeolita sintética HZSM-5 con diferente acidez, en términos de la fuerza y cantidad total de sitios ácidos, Coelho et al. [22] la sometieron a intercambio iónico en soluciones de nitrato de sodio (NaNO_3) 0.5 y 1 M. La Tabla recopila las características de las zeolitas modificadas NaHZSM-5(50), NaHZSM-5(63) y NaHZSM-5(80), denominadas así por la razón de intercambio alcanzada. Se pudo observar que el intercambio de los iones H^+ (propios de la zeolita) por los cationes Na^+ redujo la acidez total y, consecuentemente, esta disminución estuvo más marcada en los casos con mayores razones de intercambio. Los intercambios catiónicos no modificaron sustancialmente las razones Si/Al, el área superficial y el volumen de microporos, verificándose que los iones Na^+ actúan solamente sobre la fuerza y distribución de los sitios ácidos en la zeolita, sin alterar sus características estructurales y morfológicas.

Tabla 1. Características de las zeolitas derivadas de la HZSM-5 [22]

	Razón Si/Al	Acidez total (mmol NH_3/g)	Razón de intercambio ^a	Área superficial externa (m^2/g)	Volumen de microporos (cm^3/g)
HZSM-5	14.6	1.040	0	35	0.167
NaHZSM-5(50)	13.8	0.516	49.9	34	0.160
NaHZSM-5(63)	15.0	0.383	62.7	35	0.157
NaHZSM-5(80)	14.8	0.205	79.9	33	0.146

^a Calculada como el porcentaje de iones H^+ reemplazados por iones Na^+

También se realizaron análisis térmicos simultáneos (TG/DSC) para el HDPE, reportándose en la Tabla 2 la temperatura ($T_{\text{máx}}$) en la que la velocidad de pérdida de masa fue máxima.

Tabla 2. $T_{\text{máx}}$ para las muestras HDPE/zeolita, obtenidas de los resultados TG/DSC [22]

Sistema	$T_{\text{máx}}$ ($^{\circ}\text{C}$)
HDPE Puro	483.2
HDPE-HZSM-5	402.2
HDPE-NaHZSM-5(50)	405.7
HDPE-NaHZSM-5(63)	413.1
HDPE-NaHZSM-5(80)	465.1

La $T_{\text{máx}}$ se redujo notablemente (~ 80 $^{\circ}\text{C}$) en la pirólisis catalítica con HZSM-5, mientras que, en las zeolitas modificadas con sodio se aproximó paulatinamente a la $T_{\text{máx}}$ de la pirólisis térmica (483 $^{\circ}\text{C}$), según disminuía la acidez de la HZSM-5 modificada. En la Figura 2 se puede observar que con los sistemas HZSM-5 y HZSM-5(50), zeolitas de mayor acidez, se obtuvo una distribución cerrada de productos en torno a los compuestos de 3 y 4 carbonos. En tanto que la distribución de productos para el HDPE puro exhibió la típica

distribución amplia de productos, propia del mecanismo de corte aleatorio radicalario de la pirólisis térmica.

Por su parte, Aguado et al. [23] probaron cinco catalizadores diferentes (ZSM-5 tradicional, ZSM-5 nanocrystalina [n-ZSM-5], zeolita Beta, Al-MCM-41 y Al-SBA-15) en la descomposición de LDPE y de una mezcla de polietilenos de desecho agrícola y urbano, analizando los productos con un pirolizador acoplado a un sistema GC-MS. Encontraron que en la pirólisis térmica la distribución de productos fue amplia, caracterizada por hidrocarburos de gran tamaño (dienos, alquenos y alcanos). Para los catalizadores ZSM-5, n-ZSM-5 y Beta se eliminaron estos hidrocarburos de gran tamaño, dándose un significativo incremento del grupo C₂-C₅ (~ 56%) para ZSM-5 y Beta, y una alta selectividad (59,3%) hacia la formación de especies de un solo anillo aromático (tolueno, xileno y benceno) para n-ZSM-5, gracias a la combinación de sus fuertes sitios ácidos y al pequeño tamaño de sus cristales, factores que favorecen la capacidad de aromatización del catalizador. De otro lado, los sistemas meso-estructurados Al-MCM-41 y Al-SBA-15 no presentaron la misma capacidad de aromatización, craqueando, sin embargo, las grandes cadenas de la pirólisis térmica entregando los mismos rendimientos de la fracción C₂-C₅ arrojados por la ZSM-5 y por la zeolita Beta.

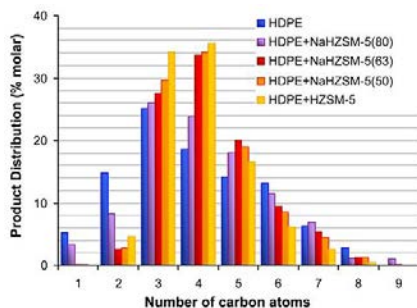


Figura 2. Productos obtenidos con las pirólisis de HDPE [22]

Lin y Yang [24] pirolizaron desechos de polietileno (de composición másica 65%-HDPE y 35%-LDPE) en un reactor de lecho fluidizado, empleando las zeolitas HUSY (zeolita y ultraestable), HZSM-5, HMOR (mordenita protonada) como catalizadores y los sistemas mesoporosos SAHA (synclyst 25, sílica alúmina) y MCM-41. En la Tabla 3 se recogen las características de los catalizadores junto con el rendimiento de las fracciones obtenidas en la pirólisis con cada catalizador.

Tabla 3. Caracterización de los catalizadores y resultados de pirólisis (adaptación de [24])

	HUSY	HZSM-5	HMOR	SAHA	MCM-41
Tamaño de poro (nm)	0.74	0.55 x 0.51	0.65 x 0.70	3.15	4.2-5.2
Razón Si/Al	6.0	25	6.3	2.6	17.5
% Gases (C ₁ -C ₄)	35.2	64.2	55.9	23.4	26.7
% Líquidos (C ₅ ≤)	59.3	31.5	36.7	66.8	65.5
% Residuo	6.9	4.3	7.4	9.7	7.8
% Razón <i>i</i> -butano/ <i>n</i> -butano (<i>i</i> -b/ <i>n</i> -b)	9.32	4.18	7.45	2.17	3.37
% Razón ΣOlefinas /Σparafinas (O/P)	1.81	3.53	2.44	9.85	7.32

Se observa que las zeolitas posibilitaron mejores rendimientos que los sistemas mesoporosos, siendo la HZSM-5 la de mayor rendimiento y el catalizador SAHA el de menor grado de conversión (9.7%). La mayor cantidad de productos no-volátiles asociados al SAHA, en comparación a la HZSM-5 y HUSY, se explica con la predominancia de sitios de Lewis (baja razón Si/Al) débiles en el SAHA versus la alta cantidad de sitios de

Brönsted (razones Si/Al mayores) presentes en los sistemas zeolíticos. Entre las zeolitas, la razón O/P decreciente HZSM-5>HMOR>HUSY se debe a que las reacciones bimoleculares (precuroras de compuestos saturados) se ven limitadas estéricamente por el tamaño y la estructura de los poros de las zeolitas. Esto también explica la resistencia a la formación de *coque* (mediante reacciones secundarias) presentada por la zeolita HZSM-5. De otro lado, la razón *i-b/n-b* (alta presencia de iso-butano) denota la formación de iones carbenio terciarios en las reacciones bimoleculares de transferencia de iones hidruro [1, 25].

Van Bokhoven et al. [26] trataron mordenita acidificada H-MOR comercial (CBV30A, Zeolyst) con vapor de agua a diferentes presiones parciales (entre 50 y 700 torr) durante 3 horas a 400 °C. El incremento en la presión parcial generó mayor dealuminación de la H-MOR, disminuyendo la cantidad de sitios Brönsted y generando la presencia de átomos de aluminio por fuera de la estructura esquelética de la H-MOR. Consecuentemente, esto generó sitios ácidos de Lewis en los que los reactantes, n-hexano y n-butano, se absorvieron, generándose un aumento en la entalpía de adsorción (ΔH_{ads}). Esta ΔH_{ads} (entre 5 y 10 kJ/mol) contribuyó acelerando (respecto a la H-MOR no tratada con vapor de agua) el craqueo monomolecular del n-butano y de isomerización del n-hexano 3 y 8 veces, respectivamente.

Con base en lo anterior, dadas la gran problemática ambiental que suscita la acumulación de desechos plásticos y las cualidades de la operación de la pirólisis como una prometedora opción para la gestión de residuos plásticos, en este trabajo se comparan las condiciones de pirolisis térmica y catalítica de desechos de PP implementando zeolitas HZSM-5, considerando, además, el efecto sobre la actividad catalítica al variar la acidez de estos sistemas zeolíticos.

2. Termogravimetría para el estudio de las cinéticas en las reacciones de pirolisis

En la ciencia de polímeros, los métodos de análisis térmico han sido usados en importantes aplicaciones, donde ha sido crucial la determinación de los parámetros cinéticos nominales (energía de activación, factor pre-exponencial y modelo cinético), asociados a los fenómenos de termo-degradación. Para tales fines, los análisis termogravimétricos (TG) es una técnica ampliamente aplicada, con la que se prueban mecanismos de degradación y se aporta en la predicción de la termo-estabilidad y vida de servicio de los materiales poliméricos [27]. Los ensayos TG se pueden realizar en una atmósfera oxidante (oxígeno o aire) o inerte (nitrógeno, argón) y pueden ser isotérmicos o dinámicos. Las curvas termogravimétricas y las curvas de velocidad de pérdida de masa (DTG) permiten, mediante la aplicación de varios métodos propuestos, determinar los parámetros cinéticos nominales. Los diversos métodos de análisis que sustentan la literatura toman como base la ecuación [1] [28-30].

$$\frac{d\alpha}{dt} = K(T)f(\alpha) \quad (1)$$

Siendo α = La fracción que ha reaccionado (avance de la reacción) en el instante t y que se define con la ecuación (2), y $f(\alpha)$ el modelo cinético de termodescomposición.

$$\alpha = \frac{(masa\ inicial)-(masa\ en\ el\ instante\ t)}{(masa\ inicial)-(masa\ final)} \quad (2)$$

La ecuación (1) propone que en un proceso de termodegradación la velocidad de pérdida de masa ($d\alpha/dt$) es función de la temperatura ($K(T)$) y de la fracción

transformada ($f(\alpha)$). Suponiendo que la constante cinética $K(T)$ sigue un comportamiento tipo Arrhenius, esta ecuación se puede reescribir en la ecuación (3).

$$\frac{d\alpha}{dt} = Ae^{-E_a/RT} f(\alpha) \quad (3)$$

Siendo A Factor pre-exponencial (s^{-1} ó min^{-1}), E_a Energía de activación (kJ/mol), T la temperatura absoluta (K) y R constante universal de los gases ($8.314 \times 10^{-3} \text{ kJmol}^{-1}\text{K}^{-1}$). Es importante señalar que en las ecuaciones (1) o (3) la relación entre la tripleta $d\alpha/dt - \alpha - T$ es independiente del programa, o de las condiciones de tratamiento térmico seguidas para alcanzar algún valor particular de la tripleta [31-33]. Integrando la ecuación (3) mediante una aproximación basada en expansiones asintóticas, Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) propusieron la ecuación (4) para determinar la energía de activación.

$$\ln \frac{\beta}{T^2} = -\frac{E_a}{RT} + C_2 \quad (4)$$

En la que, para determinar E_a , el método se basa en las temperaturas necesarias (a varias tasas β , para alcanzar un mismo grado de conversión (método iso-conversional) [34]. Otro ejemplo de método iso-conversional es propuesto por Flynn-Wall-Ozawa, obtenido aproximando la integración de la ecuación (3) con una expansión de Schlömilch (ecuación (5)) [34, 35].

$$\ln \beta = -1.0518 \frac{E_a}{RT} + C_2 \quad (5)$$

Estos dos métodos son reconocidos ampliamente en el estudio cinético de reacciones de termodegradación y, en este trabajo, se implementarán con el objetivo de determinar las energías de activación asociadas a las conversiones pirolíticas del PP puro y asistido con las diferentes zeolitas consideradas.

3. Materiales y métodos

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó PP comercial proveniente de vasos de desechables y, como catalizador, Zeolita HZSM-5 (HSZ-822, Tosoh Corporation) con una razón Si/Al = 23.8 y tamaño de partícula de 10 μm . Sobre ella se realizó un intercambio iónico (Figura 3) en soluciones de NH_4NO_3 a concentraciones de 5, 1, y 0.2 M, con el objetivo de obtener tres zeolitas modificadas, denominadas, respectivamente, HZSM-5_5M, HZSM-5_1M y HZSM-5_0.2M. Estas zeolitas fueron caracterizadas mediante espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier Infrarroja de Reflectancia Difusa (DRIFTS, equipo Shimadzu IRTracer-100). Posteriormente, para evaluar el efecto del cambio de acidez sobre la actividad catalítica de las zeolitas, se realizaron ensayos TG (equipo TA Instruments Q600) a rampas de calentamiento (β) de 10, 15 y 20 Kmin^{-1} y un flujo de 100 mL/min de nitrógeno, con relaciones máxicas zeolita/(zeolita+polímero) de 0, 15, 30 y 45%.

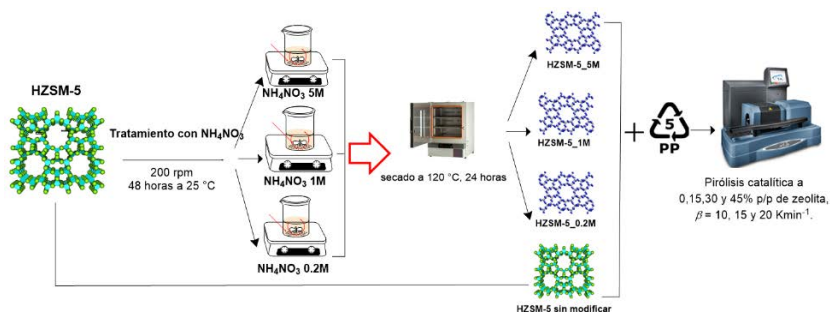


Figura 3. Proceso de modificación de la acidez en la zeolita HZSM-5

4. Resultados y discusión

4.1 Efecto de la carga de catalizador en la pirólisis de PP

En una primera instancia, y con el propósito de establecer la carga óptima de catalizador, i.e., aquella por encima de la cual no se logran mejoras significativas en la disminución en la temperatura de termodescomposición, se realizó la pirólisis variando la carga de HZSM-5 entre 0 y 45 % p/p. La Figura 4 muestra que, efectivamente, la HZSM-5 facilita la termodescomposición del PP puro, reduciendo la $T_{5\%}$ (temperatura a la que tiene lugar una pérdida de masa del 5%) en aprox. 46, 56 y 59 °C para contenidos de 15, 30 y 45 % p/p de HZSM-5, respectivamente. Adicionalmente, se infiere que los tiempos necesarios en las pirólisis catalíticas son menores, tal como se observa en las Figura 4 y 5, que presentan las curvas de pérdida de masa normalizadas o expresadas en términos del avance de la termodescomposición.

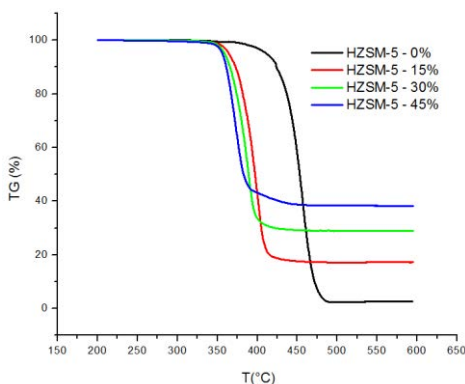


Figura 4. Curvas TG de la pirólisis de PP a varias cargas (%p/p) de HZSM-5 ($\beta=10\text{Kmin}^{-1}$)

La figura 5 revela explícitamente que, con el aumento progresivo de zeolita, empieza a alcanzarse una condición límite en la disminución de las temperaturas de termodescomposición. Esto puede notarse mediante el menor grado de desplazamiento que presentan las curvas con 30 y 45 % de HZSM-5 respecto al PP puro, en comparación al desplazamiento presentado por la curva con 15% de HZSM-5.

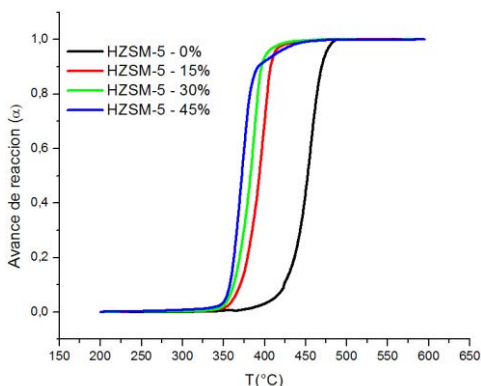


Figura 5. Curvas TG normalizadas de la pirólisis de PP a varias cargas (%p/p) de HZSM-5 ($\beta=10\text{Kmin}^{-1}$)

Para ampliar este comportamiento, en la Figura 6 se presentan las disminuciones en la temperatura a lo largo de cada grado de descomposición α . Se destacan dos zonas: 1) donde la disminución térmica (ΔT) o ahorro energético no es tan alta como en el resto de la termodescomposición, y 2) en la que se observa un ΔT mayor y constante. Esta

diferencia en la zona 1 se debe a que, en las fases tempranas de la degradación, el PP se fragmenta o craquea primero en los puntos con defectos estructurales (de mayor fragilidad), por lo que en esta primera etapa no es tan notorio el efecto del catalizador. De otro lado, en la zona 2 ya se han agotado los defectos puntuales en las cadenas poliméricas del PP y la zeolita empieza a tener importancia, por establecer un mecanismo alterno de termodegradación que propicia un ΔT más notable e importante. También se nota el comportamiento límite en el aumento ΔT , observándose que en la zona 2, con una carga de 15% de HZSM-5, se obtuvo un ΔT promedio de 60 °C, mientras que a cargas de 30 y 45% el ΔT promedio fue de aprox. 70 y 80 °C, respectivamente. La explicación de esta tendencia hacia un límite en el aprovechamiento del catalizador, se basa en que un aumento excesivo de éste genera una aglomeración del material, perdiéndose un contacto efectivo con las cadenas poliméricas de PP. En esta medida, muchos de los sitios ácidos de la zeolita quedan sin la posibilidad de interactuar con el polímero, conduciendo a un valor límite del ahorro energético ΔT .

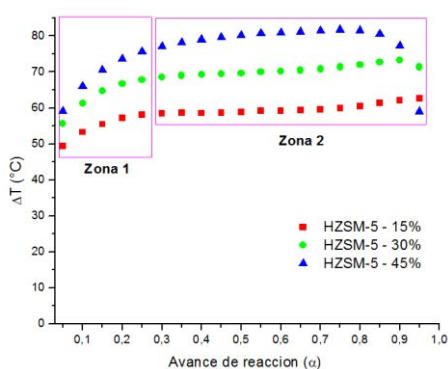


Figura 6. Disminución térmica (ΔT) a lo largo del avance de descomposición α para varias cargas (%p/p) de HZSM-5 ($\beta=10\text{Kmin}^{-1}$)

4.2 Efecto de la carga de catalizador en la energía de activación asociada a la pirólisis de PP

Empleando los métodos de KAS y FWO se determinaron los perfiles de la energía de activación a lo largo del intervalo $0.2 < \alpha < 0.8$ de la termodescomposición, para las diferentes cargas de HZSM-5 (zeolita sin modificar) consideradas (Figura 7).

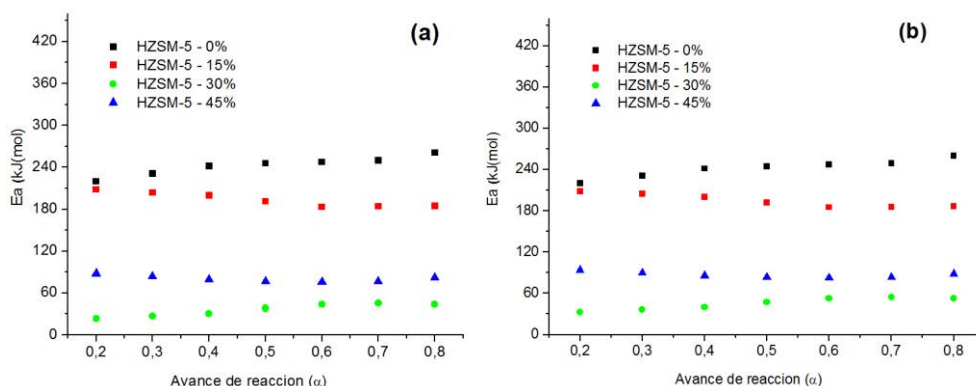


Figura 7. Perfil de energías de activación (E_a) asociadas a la pirólisis de PP a varias cargas de HZSM-5: (a) Método de KAS, (b) Método de FWO

Los dos métodos arrojaron valores de energías de activación muy similares entre sí, lo que sugiere que, para este caso, el método FWO resulta más preciso que el KAS dado que

la independencia de la temperatura en el término $\ln\beta$ reduce las fuentes de incertidumbre asociadas a su lectura.

Los valores obtenidos de las energías requeridas para la pirólisis del PP puro concuerdan con los reportados en otros estudios [36-40]. En los casos de pirólisis catalítica y para la primera mitad de la termodescomposición ($\alpha < 0.5$), se observa una consecuente disminución en la E_a . También se nota que entre los porcentajes de 30 y 45 % de HZSM-5 no hay un cambio significativo en los valores de la energía. Este resultado es acorde con lo observado en las Figuras 4, 5 y 6 y respalda la conclusión de que, para este caso, la carga de HZSM-5 óptima se encuentra alrededor del 30% p/p. Por otro lado, para la última etapa de la pirólisis ($\alpha > 0.5$), al 45% p/p de HZSM-5, se aprecia un incremento gradual en la E_a , que se relaciona con la pérdida de contacto zeolita-PP y producida por la aglomeración de la HZSM-5. Esto se debe a que, al tener valores de $\alpha > 0.5$, más de la mitad de la masa original de PP se ha craqueado y volatilizado, aumentando en gran medida la proporción relativa de HZSM-5, lo que conduce a un bajo aprovechamiento (subutilización) de todos los sitios ácidos disponibles en este caso.

En virtud de estos resultados se puede concluir que la cantidad óptima de catalizador, para este caso, está entre 15 y 30 % p/p de HZSM-5. Para efectos de comparación con las otras zeolitas de acidez modificada, se continuará el análisis considerando una carga de 30% p/p de zeolita.

4.3 Efecto de la acidez del catalizador en la pirólisis de PP

Como se mencionó previamente, un método altamente efectivo para aumentar la acidez de una zeolita consiste en exponerla a un intercambio iónico en una solución ácida de ácido clorhídrico (HCl), ácido sulfúrico (H₂SO₄) o ácido nítrico (HNO₃); también en soluciones salinas [21,41-43] (ácido-base) como la empleada en este trabajo, en la que a partir de soluciones de ácido nítrico y de amoníaco (NH₃), un compuesto básico, se obtuvo una solución de nitrato de amonio (NH₄NO₃) [21, 41]. Típicamente, cuando el intercambio iónico se efectúa con soluciones salinas, es necesario realizar una etapa posterior de calcinación para activar los sitios ácidos de la zeolita, obteniéndose un aumento en su fuerza ácida y consecuentemente en su acidez global. En este trabajo, dada la gran actividad catalítica exhibida por la HZSM-5, se realizó el intercambio iónico omitiendo la etapa de calcinación. Con esto se procuró obtener versiones de la HZSM-5 menos ácidas, porque una menor actividad catalítica propiciará la formación de productos condensables (líquidos, ceras, parafinas) en lugar de gases, pensando en el mayor valor comercial que presentan las fracciones líquidas. Los resultados obtenidos con el intercambio iónico en las soluciones de NH₄NO₃ empleadas se muestran en las Figura 8 y 9.

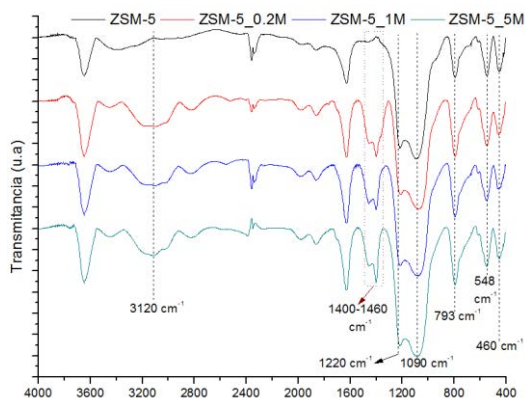


Figura 8. Espectros DRIFTS obtenidos para la zeolita HZSM-5 original y versiones modificadas

La figura 8 muestra los espectros infrarrojos obtenidos para las zeolitas original y modificadas. En todas las zeolitas se observan bandas a 1090, 793 y 460 cm^{-1} , características de las vibraciones internas de los tetrahédros SiO_4 y AlO_4 , mientras que las bandas a 548 y 1220 cm^{-1} corresponden, respectivamente, a la vibración de los anillos dobles y al estiramiento asimétrico de SiO_4 y AlO_4 en el marco estructural de la zeolita [44]. La señal ancha en torno a los 3120 cm^{-1} está asociada al estiramiento de los grupos NH presentes en los poros de las zeolitas modificadas [45]. Adicionalmente, la molécula de NH_3 , unida a los centros ácidos de Lewis tales como $\text{Al}_x\text{O}_y\text{H}_z$, produce bandas en el rango 1400-1460 cm^{-1} [46, 47]. Las posiciones exactas de estas bandas dependen de la naturaleza de los cationes estructurales de la zeolita. La presencia de estas señales relativas al NH_3 adsorbido demuestra que es posible controlar el tipo y grado de funcionalización durante el tratamiento de intercambio iónico, resultado de gran importancia en el control de la actividad catalítica de los sistemas zeolíticos y de la distribución de los productos obtenidos con su implementación en reacciones catalíticas.

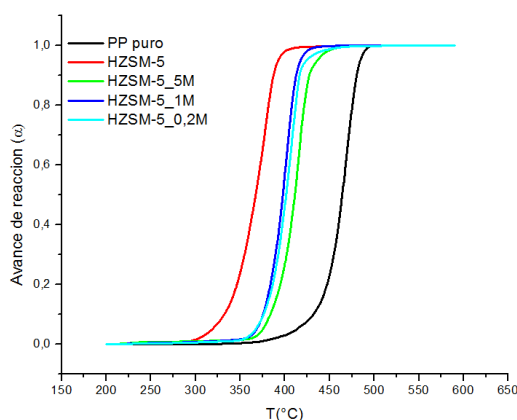


Figura 9. Curvas termogravimétricas normalizadas de la pirólisis de PP (carga de 30 % p/p) empleando las versiones modificadas de HZSM-5 ($\beta=20\text{Kmin}^{-1}$)

La figura 9 indica que el tratamiento con las soluciones de NH_4NO_3 sin la etapa de calcinación, tuvo el efecto esperado de disminuir la acidez en la zeolita HZSM-5. Esta reducción en la actividad catalítica se puede observar en términos de los menores valores de ΔT , obtenidos para las zeolitas HZSM-5_0.2M, HZSM-5_1M y HZSM-5_5M, respecto de la HZSM-5 original. Esta disminución de acidez y de la actividad catalítica fue propiciada porque en el intercambio iónico los iones H^+ y Na^+ , originalmente presentes en la zeolita, han sido reemplazados por los iones NH_4^+ [22, 41] que disminuyen la fuerza ácida de los sitios activos en la zeolita, generando adicionalmente por su mayor tamaño, un mayor impedimento estérico para el contacto con las cadenas poliméricas y los oligómeros provenientes del PP. Este resultado es importante dado que valida la hipótesis de poder controlar la actividad catalítica en los sistemas zeolíticos mediante unas condiciones de intercambio iónico y de tratamiento térmico, adecuadas según se desee aumentar o disminuir la acidez en este tipo de catalizadores. Así, por ejemplo, se deseará incrementar la acidez si se busca que los productos principales obtenidos con el reciclaje químico (pirólisis) sean gases, o se necesitará reducir la acidez para el caso en el que se busque la obtención de líquidos tipo C4's-C11's (gasolinas comerciales).

5. Conclusiones

La posibilidad de reducir los costos energéticos en la pirólisis catalítica de resinas poliméricas y el potencial de orientar los productos de la termodegradación, hacen de esta

opción de reciclaje químico una apuesta promisoría al tratamiento y valorización de residuos plásticos.

Los valores de energía de activación obtenidos sugieren como carga óptima, para el reciclaje químico de desechos de polipropileno, un 30% de la zeolita HZSM-5.

El tratamiento de intercambio iónico aplicado permitió modular la acidez de la zeolita HZSM-5, un resultado que ofrece gran potencial en términos del control sobre el rendimiento y selectividad de los productos que se pueden obtener con la valorización o reciclaje químico de desechos plásticos.

Referencias

- [1] Lin, Y. et al. (2004). [Catalytic degradation of high density polyethylene over mesoporous and microporous catalysts in a fluidised-bed reactor](#). *Polym. Degrad. Stab* 86, pp. 121–128.
- [2] Mastellone, L. et al. (2002). [Fluidized bed pyrolysis of a recycled polyethylene](#). *Polym. Degrad. Stab* 76, pp. 479–487.
- [3] Kumar, S., Panda, A. & Singh, R. (2011). [A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel](#). *Resour. Conserv. Recycl* 55, pp. 893–910.
- [4] Al-Salem, S., Lettieri, P. & Baeyens, J. (2010). [The valorization of plastic solid waste \(PSW\) by primary to quaternary routes: From re-use to energy and chemicals](#). *Prog. Energy Combust. Sci* 36, pp. 103–129.
- [5] Bazargan, A. & McKay, G. (2012). [A review – Synthesis of carbon nanotubes from plastic wastes](#). *Chem. Eng. J* 195–196, pp. 377–391.
- [6] Moothi, K. et al. (2012). [Coal as a carbon source for carbon nanotube synthesis](#). *Carbon* 50, pp. 2679–90.
- [7] Scheirs, J. & Kaminsky, W. (2006). [Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels](#). UK: Wiley.
- [8] Feng, G. (2010). [Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels](#). Doctoral Dissertation. University of Canterbury.
- [9] Butler, E., Devlin, G. & McDonnell, K. (2011). [Waste Polyolefins to Liquid Fuels via Pyrolysis: Review of Commercial State-of-the-Art and Recent Laboratory Research](#). *Waste and Biomass Valorization* 2, pp. 227–255.
- [10] Seddegi, Z. et al. (2002). [Catalytic cracking of polyethylene over all-silica MCM-41 molecular sieve](#). *Appl. Catal. A Gen* 225, pp. 167–176.
- [11] Marcilla, A. et al. (2003). [Catalytic pyrolysis of polypropylene using MCM-41: kinetic model](#). *Polym. Degrad. Stab* 80, pp. 233–240.
- [12] Mastral, J. et al. (2006). [Catalytic degradation of high density polyethylene over nanocrystalline HZSM-5 zeolite](#). *Polym. Degrad. Stab* 91, pp. 3330–3338.
- [13] Marcilla, A., Gómez, S. & Valdés, F. (2007). [Catalytic cracking of low-density polyethylene over H-Beta and HZSM-5 zeolites: Influence of the external surface. Kinetic model](#). *Polym. Degrad. Stab* 92, pp. 197–204.
- [14] Park, D. et al. (1999). [Catalytic degradation of polyethylene over solid acid catalysts](#). *Polym. Degrad. Stab* 65, pp. 193–198.
- [15] Panda, A., Singh, R. & Mishra, D. (2010). [Thermolysis of waste plastics to liquid fuel A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products—A world prospective](#). *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, pp. 233–248.
- [16] Panayotova, M. (2001). [Kinetics and thermodynamics of copper ions removal from wastewater by use of zeolite](#). *Waste Manag* 21, pp. 671–676.
- [17] Inglezakis, V. et al. (2004). [Ion exchange studies on natural and modified zeolites and the concept of exchange site accessibility](#). *J. Colloid Interface Sci* 275, pp. 570–576.
- [18] Liu, C. et al. (2004). [Surface modification of zeolite Y and mechanism for reducing naphtha olefin formation in catalytic cracking reaction](#). *Appl. Catal. A Gen.* 264, pp. 225–228.
- [19] Weitkamp, J. (2000). [Zeolites and catalysis](#). *Solid State Ionics* 131, pp. 175–188.
- [20] Humphries, A., Harris, D. & Connorb, P. (1993). [Chapter 2 the nature of active sites in zeolites : influence on catalyst performance](#). *Stud. Surf. Sci. Catal.* 76, pp. 41–82.
- [21] Covarrubias, C., Gracia, F. & Palza, H. (2010). [Catalytic degradation of polyethylene using nanosized ZSM-2 zeolite](#). *Appl. Catal. A Gen* 384, pp. 186–191.
- [22] Coelho, A. et al. (2012). [The effect of ZSM-5 zeolite acidity on the catalytic degradation of high-density polyethylene using simultaneous DSC/TG analysis](#). *Appl. Catal. A Gen* 413–414, pp. 183–191.
- [23] Aguado, J., Serrano, D. & San Miguel, G. (2007). [Analysis of Products Generated from the Thermal and Catalytic Degradation of Pure and Waste Polyolefins using Py-GC/MS](#). *J. Polym. Environ.* 15, pp. 107–118.
- [24] Lin, Y. & Yang, M. (2008). [Tertiary recycling of polyethylene waste by fluidised-bed reactions in the presence of various cracking catalysts](#). *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 83, pp. 101–109.

- [25] Lin, Y. & Yang, M. (2007). [Catalytic pyrolysis of polyolefin waste into valuable hydrocarbons over reused catalyst from refinery FCC units](#). *Appl. Catal. A Gen* 328, pp. 132–139.
- [26] Van Bokhoven, J. et al. (2001). [An Explanation for the Enhanced Activity for Light Alkane Conversion in Mildly Steam Dealuminated Mordenite: The Dominant Role of Adsorption](#). *J. Catal.* 202, pp. 129–140.
- [27] Omrani, A., Rostami, A. & Ravari, F. (2012). [Advanced isoconversional and master plot analyses on solid-state degradation kinetics of a novel nanocomposite](#). *J. Therm. Anla. Calorim* 111, pp. 677–683.
- [28] Khawam, A. & Flanagan, D. (2006). [Solid-state kinetic models: basics and mathematical fundamentals](#). *J. Phys. Chem. B.* 110, pp. 17315–17328.
- [29] Sánchez, P. et al. (2010). [Generalized kinetic master plots for the thermal degradation of polymers following a random scission mechanism](#). *J. Phys. Chem. A* 114, pp. 7868–7876.
- [30] Vyazovkin, S. et al. (2011). [ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data](#). *Thermochim. Acta* 520, pp. 1–19.
- [31] Sánchez, P. et al. (2009). [Combined kinetic analysis of thermal degradation of polymeric materials under any thermal pathway](#). *Polym. Degrad. Stab* 94, pp. 2079–2085.
- [32] Pérez, L. et al. (2014). [Scission kinetic model for the prediction of polymer pyrolysis curves from chain structure](#). *Polym. Test* 37 pp. 1–5.
- [33] Sánchez, P. et al. (2010). [A new model for the kinetic analysis of thermal degradation of polymers driven by random scission](#). *Polym. Degrad. Stab* 95, pp. 733–739.
- [34] Starink, M. (2003). [The determination of activation energy from linear heating rate experiments: a comparison of the accuracy of isoconversion methods](#). *Thermochim. Acta* 404, pp. 163–176.
- [35] Starink, M. (1996). [A new method for the derivation of activation energies from experiments performed at constant heating rate](#). *Thermochim. Acta* 288, pp. 97–104.
- [36] Chrissafis, K. et al. (2009). [Comparative Study of the Effect of Different Nanoparticles on the Mechanical Properties, Permeability, and Thermal Degradation Mechanism of HDPE](#). *J. Appl. Polym. Sci.* 114, pp. 1606–1618.
- [37] Budrugaec, P. (2013). [Applicability of non-isothermal model-free predictions for assessment of conversion vs. time curves for complex processes in isothermal and quasi-isothermal conditions](#). *Thermochim. Acta.* 558, pp. 67–73.
- [38] Budrugaec, P. (2005). [Some methodological problems concerning the kinetic analysis of non-isothermal data for thermal and thermo-oxidative degradation of polymers and polymeric materials](#). *Polym. Degrad. Stab.* 89, pp. 265–273.
- [39] Sinfrônio, F. et al. (2005). [Kinetic of thermal degradation of low-density and high-density polyethylene by non-isothermal thermogravimetry](#). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 79(2), pp. 393–399.
- [40] Aboulkas, A., El Harfi, K. & El Bouadili, A. (2010). [Thermal degradation behaviors of polyethylene and polypropylene. Part I: Pyrolysis kinetics and mechanisms](#). *Energy Convers. Manag.* 51, pp. 1363–1369.
- [41] Marcilla, A., Gómez, A. & Berenguer, D. (2006). [Study of the influence of the characteristics of different acid solids in the catalytic pyrolysis of different polymers](#). *Appl. Catal. A Gen* 301, pp. 222–231.
- [42] Zandonai, C. et al. (2016). [Production of petroleum-like synthetic fuel by hydrocracking of crude soybean oil over ZSM5 zeolite - Improvement of catalyst lifetime by ion exchange](#). *Fuel* 172, pp. 228–237.
- [43] Yan, B. et al. (2014). [Sustainable production of acrylic acid: Alkali-Ion exchanged beta zeolite for gas-phase dehydration of lactic acid](#). *Catal. Today* 269, pp. 65–73.
- [44] Liping, L. et al. (2015). [Synthesis of sapo-34/zsm-5 composite and its catalytic performance in the conversion of methanol to hydrocarbons](#). *J. Braz. Chem. Soc* 26, pp. 290–296.
- [45] Byrappa, K. & Kumar, B. (2007). [Characterization of zeolites by infrared spectroscopy](#). *Asian J. Chem* 19, pp. 4933–4935.
- [46] Grijndling, C. (1996). [Infrared studies of the surface acidity of oxides and zeolites using adsorbed probe molecules](#). *Catal. Today* 27, pp. 353–376.
- [47] Ochoa, R. et al. (1996). [Catalytic degradation of medium density polyethylene over silica-alumina supports](#). *Fuel Process. Technol* 49, pp. 119–136.

2. Predicción de esfuerzos residuales en procesamiento de polímeros por técnicas de superficies de respuesta y simulación

Juan Posada

Juan Sierra

Carlos Vargas

Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín, Colombia

1. Introducción

En los diferentes tipos de transformación de polímeros, el proceso de inyección es uno de los más destacados, al ser un proceso flexible y con alta productividad, permitiendo una amplia posibilidad de geometrías simples o complejas, de tolerancia dimensional muy fina, y con un excelente acabado superficial en sólo un paso. Este tipo de proceso está compuesto básicamente en cinco etapas denominadas plastificación, llenado volumétrico, empaque o sostenimiento y enfriamiento. Las propiedades finales del artículo inyectado se pueden ver afectadas drásticamente debido al material inyectado, el proceso de enfriamiento en el molde y las demás condiciones del proceso de inyección. Diferentes polímeros se utilizan para este proceso, tales como las poliolefinas, entre ellas los polietilenos (PE), y los polipropilenos (PP) de la familia de los semicristalinos.

Los polímeros de ingeniería son una gama de materiales utilizados donde se requieren altas exigencias físicas, mecánicas, químicas y térmicas, entre otras, para suplir los altos estándares de diseño en diferentes aplicaciones para la fabricación de productos cosméticos, autopartes y desarrollos especiales en la industria aeroespacial y naval. Para un óptimo desempeño en estas aplicaciones, a este tipo de polímeros se le agregan diferentes aditivos como ayudantes de proceso y cargas reforzantes, para aumentar sus atributos mecánicos y térmicos, pero también se afectan sus condiciones de procesamiento al requerir altas temperaturas y mayores presiones, generando una alta presencia de esfuerzos residuales [1].

Los esfuerzos residuales se pueden definir como los esfuerzos que permanecen al interior del material en ausencia de fuerzas externas o gradientes de temperatura [2]. En el caso de polímeros termoplásticos inyectados, los esfuerzos residuales se generan por efectos de flujo y efectos térmicos. Los esfuerzos residuales inducidos por el flujo se generan debido al alto nivel de orientación en la dirección de flujo de las macromoléculas del polímero, cuando se realiza la fase de llenado de un molde. El alto nivel de orientación no es el estado natural de las macromoléculas, las cuales tienden a relajarse y volver a su estado de equilibrio (sin orientación definida). Si ocurre un enfriamiento rápido, las macromoléculas no alcanzan un estado de relajación y se congelan o mantienen un alto grado de orientación. Esta condición produce un nivel de esfuerzos residuales en el material, necesarios para transformar el alto grado de orientación de las macromoléculas en el estado de relajación molecular natural. Esto produce contracciones y propiedades mecánicas no-uniformes paralela y perpendicular a la dirección de flujo de la pieza.

Los esfuerzos residuales se incrementan por el efecto térmico del enfriamiento de la pieza termoplástica inyectada. A medida que el material se enfría en el molde, se contrae y el polímero se somete a diferentes velocidades de enfriamiento: altas cerca a la pared fría del molde y bajas en el centro de la pieza aún caliente. En primera instancia las capas cercanas a las paredes del molde se contraen y el centro de la pieza permanece libre de contracción; posteriormente, cuando el centro de la pieza comienza a enfriarse, esta zona comienza a contraerse, pero las capas externas restringen su contracción porque se

encuentran solidificadas y rígidas. Esto genera otro tipo de esfuerzo residual inducido por el enfriamiento del producto inyectado en el molde. A menudo, los esfuerzos residuales inducidos por el flujo son muy pequeños, comparados con los generados por el efecto térmico del enfriamiento. Sin embargo, si las temperaturas de inyección son bajas, los esfuerzos residuales inducidos por el flujo pueden ser significativos, produciendo piezas con altos esfuerzos residuales de tensión en la superficie [1, 3-6].

En el procesamiento por inyección de piezas termoplásticas estos esfuerzos pueden afectar significativamente el comportamiento mecánico de un componente, al generar alabeos o iniciar grietas y delaminación de partes compuestas [3]. Adicional a las propiedades mecánicas, otro efecto importante de los esfuerzos residuales son el deterioro de las propiedades ópticas del material, porque cambian el índice de refracción, generando una distorsión óptica y afectando la apariencia de productos, tal como en botellas y ventanas, así como el desempeño de piezas, tal como lentes plásticos y discos compactos. Es por este motivo que es importante tener en cuenta la predicción precisa de esfuerzos residuales en el diseño de piezas termoplásticas inyectadas.

Algunas aplicaciones de especial importancia en los efectos de los esfuerzos residuales en el material contemplan, por ejemplo, las uniones estructurales entre materiales termoplásticos y metales, porque en la interface polímero-metal se genera un alto nivel de esfuerzos residuales, influyendo en su resistencia y durabilidad [7, 8]. Los agrietamientos que generan los esfuerzos residuales se propagan al exponerse a ambientes o a ciertas sustancias químicas, falla conocida como *environment stress cracking* (ESC), y muchos tipos de productos plásticos fallan por este tipo de agrietamiento. Se han realizado algunos estudios para medir el efecto de materiales como el policarbonato y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) con el ESC, en combinación con la aplicación de pequeñas cargas fluctuantes y la forma de minimizar la falla al someter la pieza a tratamientos térmicos [9]. Muchos dispositivos electrónicos flexibles son recubiertos con polímeros para elaborar sustratos conductivos flexibles. En este caso, las películas poliméricas presentan un estado de esfuerzos residuales que es conveniente medir mediante técnicas de fotoelasticidad para minimizarlos [10].

La presencia de esfuerzos residuales en los artículos inyectados, por consecuencia del proceso, se pueden generar debido a altas presiones, poca homogeneidad de la temperatura en la masa fundida y en la temperatura de las paredes del molde. Lo anterior genera contracciones, alabeos y defectos en la pieza, que pueden afectar el desempeño del producto inyectado [11-14]. En [15] se considera que uno de los parámetros de mayor importancia es la temperatura de molde, reflejado en que el menor esfuerzo residual se presenta cuando la temperatura del molde es lo suficientemente alta. Posteriormente, en este trabajo, se presentará un comparativo entre diferentes investigaciones realizadas con respecto a los esfuerzos residuales en piezas inyectadas con polímeros termoplásticos y la investigación actual, con el fin de analizar las diferencias y el aporte del actual estudio.

En la actualidad y bajo la necesidad de satisfacer las altas exigencias en los productos inyectados, se hace necesario conocer y predecir la influencia de los esfuerzos residuales en las deformaciones y alabeos de las piezas terminadas. La predicción de este fenómeno se basa en el amplio conocimiento que se debe tener de los diferentes mecanismos que interactúan para producir las diferentes anomalías en las piezas terminadas. El presente trabajo busca evaluar en una ventana amplia el efecto de los esfuerzos residuales en el proceso de inyección para dos tipos de polímeros: policarbonato y polipropileno. Para lograrlo se simuló el procesamiento de inyección mediante el software Moldex 3D y los resultados se procesaron para implementar un modelo de correlación robusto, con la idea

de predecir el comportamiento de los esfuerzos residuales a diferentes condiciones de proceso, diferentes a las simuladas mediante la técnica de superficies de respuesta.

2. Metodología

2.1 Materiales

El policarbonato (PC) y el polipropileno (PP) fueron los dos polímeros empleados en las simulaciones, con el propósito de analizar el comportamiento de los esfuerzos residuales entre un polímero amorfo y uno semicristalino. La referencia de PC empleada fue Lexan 144R de General Electric, en el caso del PP se empleó un homopolímero de referencia SABIC 575P. Para ambos se tienen todas las propiedades requeridas para realizar las simulaciones de inyección en el software Moldex 3D.

2.2 Geometría

La geometría seleccionada es una probeta estándar para pruebas de tracción, según la norma ASTM D638 [16], con un espesor de 3.7 mm. La Figura 1 muestra el número de cavidades y el sistema de alimentación para inyectar el polímero fundido en el molde.

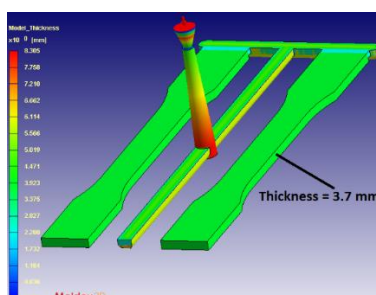


Figura 1. Pieza a evaluar en el proceso de inyección

2.3 Condiciones de proceso

Para cada polímero se simularon dos diseños de experimentos (DE), con el fin de tener en cuenta las diferentes condiciones de proceso de inyección que afectan los esfuerzos residuales. El primero evaluó la influencia de las temperaturas de molde y de inyección a condiciones constantes de tiempo de enfriamiento y etapa de empaque. El segundo evalúa la influencia del tiempo de enfriamiento y la etapa de empaque (tiempo y presión) en los esfuerzos residuales, a temperaturas de molde y de inyección fijas en valores determinados de acuerdo con el primer DE realizado. En las Tablas 1 a 4 se listan las variables y niveles empleados para cada DE para el PC y el PP.

Tabla 1. DE para el PC a diferentes niveles de temperatura de inyección y de molde (a un tiempo de enfriamiento de 10 s, tiempo de empaque de 7.7 s y presión de empaque de 600 bar)

Variable	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Temperatura de inyección °C	290	305	320
Temperatura de pared de molde °C	50	80	110

Tabla 2. DE para el PC a diferentes niveles de tiempo de enfriamiento, tiempo y presión de empaque (a temperatura de inyección de 305°C, temperatura de pared de molde 80°C y tiempo de inyección de 1 s)

Variable	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Tiempo restante de enfriamiento [s]	6	10	15
Tiempo de empaque [s]	4	7.7	10
Presión de empaque [bar]	400	600	800

Tabla 3. DE para el PP a diferentes niveles de temperatura de inyección y de molde (a un tiempo de enfriamiento de 13 s, tiempo de empaque de 10 s y presión de empaque de 800 bar)

Variable	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Temperatura de inyección °C	210	240	270
Temperatura de pared de molde °C	20	40	60

Tabla 4. DE para el PP a diferentes niveles de tiempo de enfriamiento, tiempo y presión de empaque (a temperatura de inyección de 240°C, temperatura de pared de molde 40°C y tiempo de inyección de 1 s)

Variable	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Tiempo restante de enfriamiento [s]	10	13	16
Tiempo de empaque [s]	7	10	13
Presión de empaque [bar]	600	800	1000

2.4 Simulación de esfuerzos residuales

Para las simulaciones se empleó el software Moldex 3D y se evaluaron todas las etapas del proceso de inyección: llenado, empaque, enfriamiento y deformaciones. La etapa de deformaciones incluye los cálculos de esfuerzos residuales. Con el propósito de evaluar condiciones de proceso reales, se incluyeron canales de enfriamiento con la temperatura adecuada del líquido de para alcanzar las temperaturas de molde evaluadas. La Figura 2 muestra la configuración del molde con las cavidades a llenar, los canales de enfriamiento y la malla de volúmenes finitos que emplea el software para realizar los cálculos del proceso de inyección.

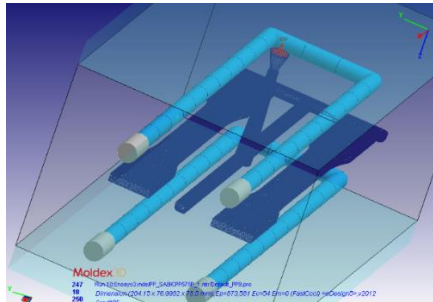


Figura 2. Cavity del molde a llenar y canales de enfriamiento

La Figura 3 muestra un detalle del número de elementos de la malla a través del espesor (6 elementos), con la intención de obtener resultados precisos. Este nivel de refinamiento de malla en el espesor de la pieza inyectada es suficiente para obtener resultados adecuados, de acuerdo con otros estudios similares [17-19]. Los valores de esfuerzos residuales reportados fueron los Von Mises, los cuales son los esfuerzos principales con respecto a las direcciones x, y, z.

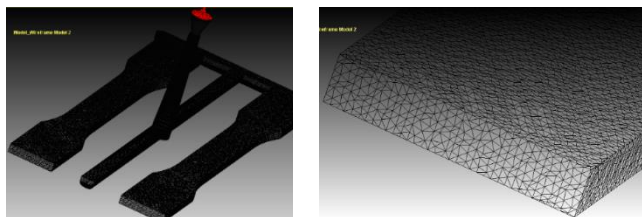


Figura 3. Refinamiento de malla de volúmenes finitos

2.5 Técnica de superficies de respuesta

A partir de los datos obtenidos mediante la simulación empleando los DE, se realizó una técnica de regresión multivariable para obtener un modelo predictivo, que luego se

representó mediante curvas de superficies de respuesta. La técnica de mínimos cuadrados es el método más empleado para regresión de datos, sin embargo, la regresión robusta ofrece una alternativa a la regresión de mínimos cuadrados, cuando los valores atípicos violan el supuesto de residuos distribuidos normalmente en la regresión de mínimos cuadrados. En este estudio se empleó un análisis robusto de Hubber con una constante de 1.345 [20] y el análisis de regresión se hizo evaluando un punto específico en la superficie de la pieza (Figura 4). Este punto fue seleccionado a propósito, ya que la superficie de la pieza inyectada es la que provee principalmente la resistencia mecánica y en esta zona se espera que la pieza sufra la falla del ensayo de tracción.

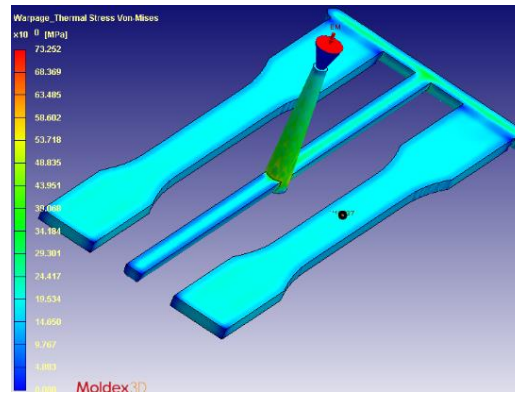


Figura 4. Zona seleccionada para medir los esfuerzos residuales en la pieza inyectada

3. Resultados y discusión

3.1 Análisis con policarbonato

En las Figuras 5 a 8 se representan los resultados de esfuerzos residuales para los dos DE evaluados en el PC. De acuerdo con los resultados simulados el menor valor de esfuerzo residual se observa a la mayor temperatura de molde, con una influencia en menor medida de la temperatura de inyección. Con respecto al segundo DE se observa que la presión de empaque tiene un mayor efecto que el tiempo de enfriamiento y el tiempo de empaque. De estas dos últimas variables se empieza a presentar un mayor efecto en los esfuerzos residuales, a menores tiempos con mayores valores de esfuerzo residual. A mayores tiempos de enfriamiento y de empaque no parece presentarse un cambio significativo en los esfuerzos residuales, aunque la tendencia es reducir sus niveles. En el análisis de curvas de superficies de respuestas se reafirma este comportamiento y se justifica el efecto de estas variables.

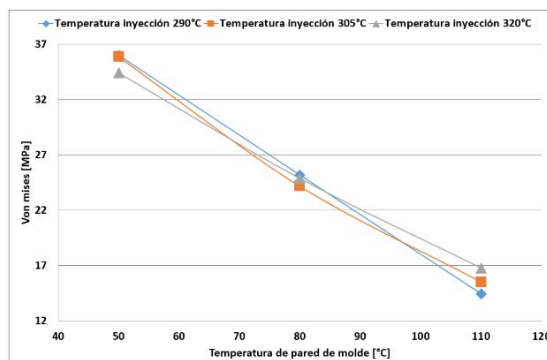


Figura 5. Resultados DE para el PC a diferentes niveles de temperatura de inyección y de molde (tiempo de enfriamiento 10 s, tiempo de empaque 7.7 s y presión de empaque 600 bar)

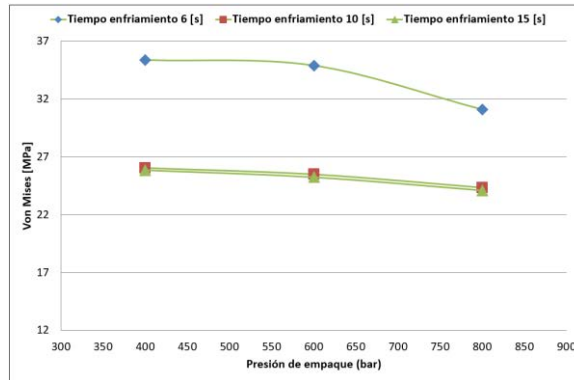


Figura 6. Resultados DE para el PC a diferentes niveles de tiempo de enfriamiento, tiempo y presión de empaque (temperatura de inyección 305°C, temperatura de pared de molde 80°C y tiempo de inyección 1 s, en 4 s de empaque)

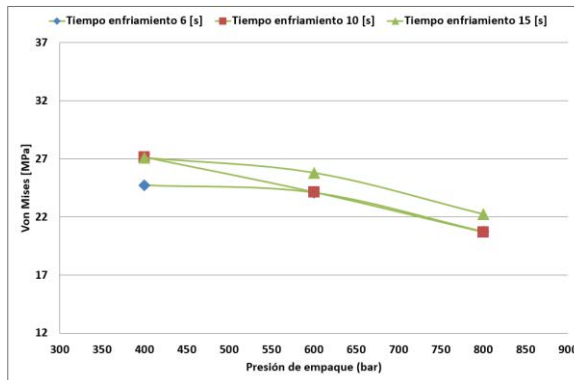


Figura 7. Resultados DE para el PC a diferentes niveles de tiempo de enfriamiento, tiempo y presión de empaque (temperatura de inyección 305°C, temperatura de pared de molde 80°C y tiempo de inyección 1 s, en 7.7 s de empaque)

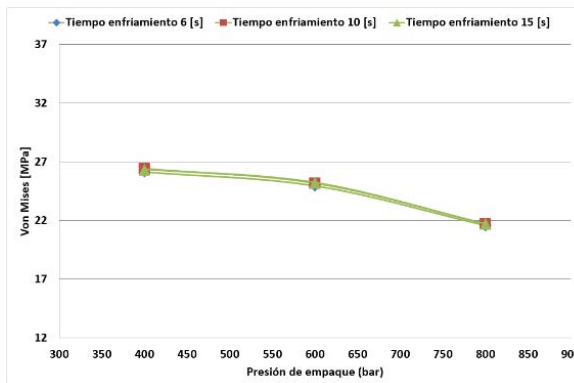


Figura 8. Resultados DE para el PC a diferentes niveles de tiempo de enfriamiento, tiempo y presión de empaque (temperatura de inyección de 305°C, temperatura de pared de molde 80°C y tiempo de inyección 1 s, en 10 s de empaque)

Las superficies de respuestas muestran un comportamiento más amplio de la evolución de los esfuerzos residuales a diferentes condiciones de proceso, permitiendo encontrar valores máximos y mínimos locales y globales. La Figura 9 presenta la regresión del DE para PC a diferentes niveles de temperatura de molde y de inyección. Se presentan el coeficiente de regresión y el coeficiente de ajuste de regresión, evidenciando una excelente correlación con un modelo de polinomio cuadrático. La ecuación (1) describe el polinomio cuadrático obtenido con la regresión robusta.

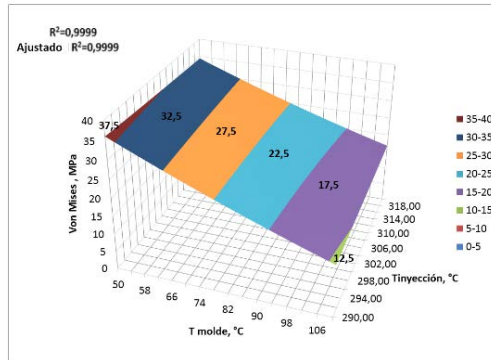


Figura 9. Superficie de respuesta para el PC a diferentes niveles de temperatura de inyección y de molde (tiempo de enfriamiento 10 s, tiempo de empaque 7.7 s y presión de empaque 600 bar)

$$VM_{PC-Tim} = 148.063 - 0.439 * Ti - 1.13 * Tm + 4.474 * Ti^2 + 2.214 * 10^{-3} * Ti * Tm + 8.002 * 10^{-4} * Tm^2 \quad (1)$$

Donde:

VM_{PC-Tim} : Esfuerzos residuales Von Mises del policarbonato en función de las temperaturas de inyección y de molde, en MPa.

T_i : temperatura de inyección, en °C.

T_m : Temperatura de molde, en °C.

El DE para el PC a diferentes niveles de temperatura de molde e inyección pudo ser adecuadamente modelado por medio de curvas de superficie de respuesta. Se observó un bajo grado de curvatura con las variables independientes, indicando que incluso se puede emplear una correlación lineal. El nivel más bajo de esfuerzo residual observado fue a la temperatura de molde más alta, a un nivel bajo de temperatura de inyección. El nivel más alto de esfuerzo residual se observó al nivel más bajo de temperatura de molde y de inyección. El efecto de la temperatura de inyección en el esfuerzo residual se puede explicar debido a que a mayor temperatura el punto de inyección en el molde se tarda mayor tiempo en solidificar, lo cual permite inyectar mayor cantidad de material. Que, a su vez, permite una reducción de la contracción del material y el esfuerzo residual. La temperatura del molde tiene un efecto similar al explicado con la temperatura de inyección, pero de mayor magnitud [21, 22], ya que, adicionalmente, con una mayor temperatura de molde la región no solidificada es de mayor espesor en la pieza inyectada, lo que permite un mayor efecto de la etapa de empaque, que reducirán las contracciones y los esfuerzos residuales. Tendencias y comportamientos similares han sido reportados en estudios similares [1, 15, 23].

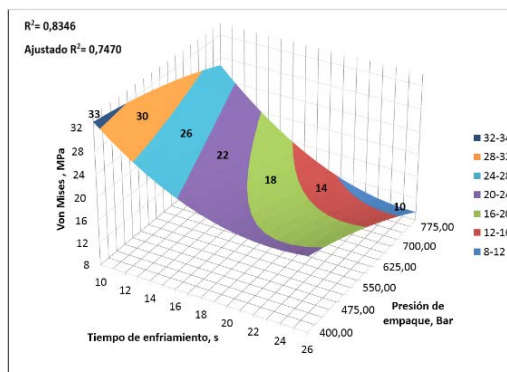


Figura 10. Superficie de respuesta para el PC a diferentes niveles de tiempo de enfriamiento, tiempo y presión de empaque (temperatura de inyección 305°C, temperatura de pared de molde 80°C y tiempo de inyección 1 s)

La Figura 10 muestra la regresión para el DE del PC a diferentes niveles de tiempo de enfriamiento, tiempo y presión de empaque. Se presentan el coeficiente de regresión y el coeficiente de ajuste de regresión. Aunque el grado de correlación observado fue más bajo, comparado con los obtenidos con el DE de temperaturas de molde y de inyección, el modelo de regresión robusta polinomial cuadrático es aún adecuado. La ecuación (2) describe el polinomio cuadrático obtenido con la regresión robusta.

$$VM_{PC-Enf_Emp} = 60.592 - 1.947 * 10^{-2} * Pe - 3.216 * tenf - 1.597 * te - 2.237 * 10^{-5} * Pe^2 + 2.367 * 10^{-4} * Pe * tenf - 1.071 * 10^{-3} * Pe * te + 6.869 * 10^{-2} * tenf^2 + 3.403 * 10^{-2} * tenf * te + 9.242 * 10^{-2} * te^2 \quad (2)$$

Donde:

VM_{PC-Enf_Emp}: Esfuerzos residuales Von Mises del policarbonato en función del tiempo de enfriamiento, la presión y el tiempo de empaque, en MPa.

Pe: Presión de empaque, en bar.

te: Tiempo de empaque, en s.

tenf: Tiempo de enfriamiento, en s.

Los niveles más bajos de esfuerzos residuales se presentaron a altos tiempos de enfriamiento y altos niveles de presión de empaque. Los niveles más altos de esfuerzos residuales se observaron a los tiempos de enfriamiento y de empaque más bajos. Estos resultados son razonables, debido a que más material puede ser inyectado por el hecho de aplicar mayor presión de empaque para compensar la contracción del material y los esfuerzos residuales [24-28]. Adicionalmente, un mayor tiempo de enfriamiento permite mayor relajación molecular, que inhibe el desarrollo de mayores esfuerzos residuales [1, 23, 29-31].

3.2 Análisis con polipropileno

En las Figuras 11 a 14 se representan los resultados de esfuerzos residuales para los dos DE evaluados en el PP. Para diferentes valores de esfuerzos residuales se observa la misma tendencia presentada en el PC para los dos DE simulados.

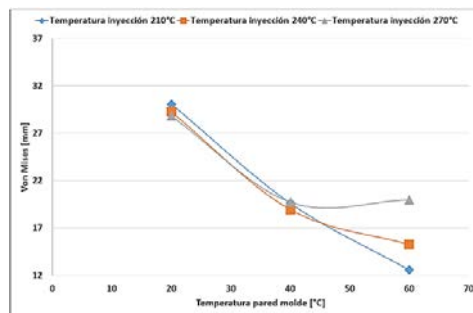


Figura 11. Resultados DE para el PP a diferentes niveles de temperatura de inyección y de molde

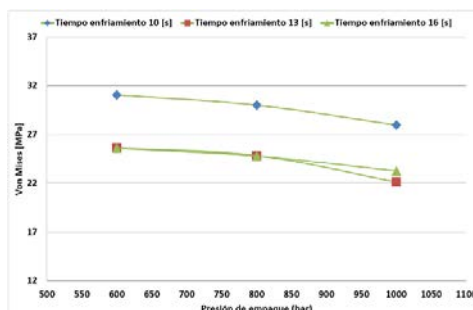


Figura 12. Resultados DE para el PP a diferentes niveles de tiempo de enfriamiento, tiempo y presión de empaque

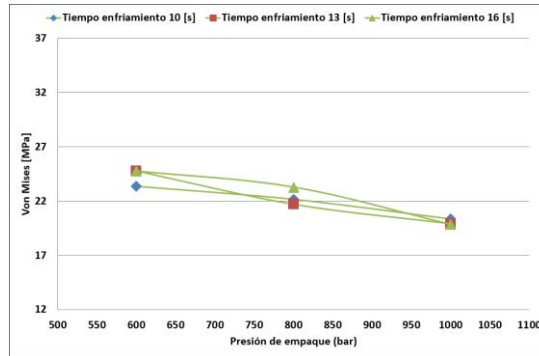


Figura 13. Resultados DE para el PP a diferentes niveles de tiempo de enfriamiento, tiempo y presión de empaque

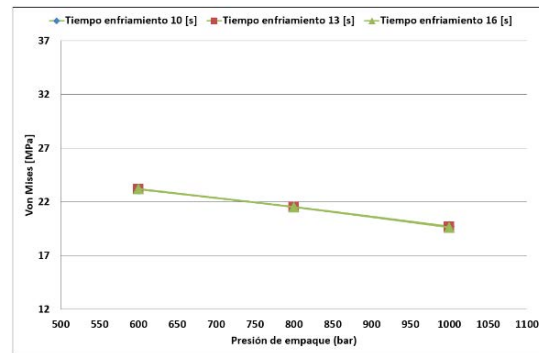


Figura 14. Resultados DE para el PP a diferentes niveles de tiempo de enfriamiento, tiempo y presión de empaque

La Figura 15 presenta la regresión del DE para PP a diferentes niveles de temperatura de molde y de inyección. Se presentan el coeficiente de regresión y el coeficiente de regresión ajustado, revelando una excelente correlación con un modelo de ajuste de polinomio cuadrático. La ecuación (3) describe el polinomio cuadrático obtenido con la regresión robusta.

$$VM_{PP-Tim} = 107.8 - 0.416 * Ti - 1.861 * Tm + 6.547 * 10^{-4} * Ti^2 + 3.596 * 10^{-3} * Ti * Tm + 8.264 * 10^{-3} * Tm^2 \quad (3)$$

Donde:

VM_{PP-Tim} : Esfuerzos residuales Von Mises del polipropileno en función de las temperaturas de inyección y de molde, en MPa.

Ti : temperatura de inyección, en °C.

Tm : Temperatura de molde, en °C.

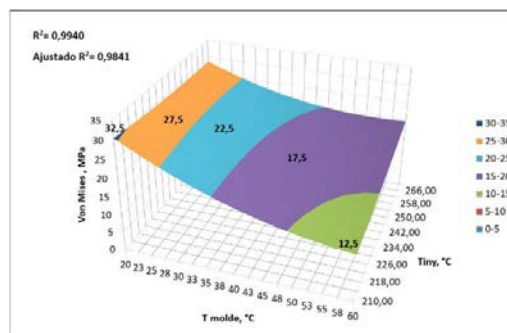


Figura 15. Superficie de respuesta para el PP a diferentes niveles de temperatura de inyección y de molde

El DE para el PP a diferentes niveles de temperatura de molde y de inyección pueden ser adecuadamente modelados empleando curvas de superficies de respuesta. En el caso del PP se observó un grado de curvatura considerable. Los niveles más bajos de esfuerzos residuales muestran la misma tendencia que los encontrados en el PC. El nivel más bajo de esfuerzo residual se observa a temperatura de molde más alta y temperatura de inyección baja. De otro lado, los más altos niveles de esfuerzo residual se encontraron a las temperaturas de molde y de inyección más bajas. De igual forma, al caso presentado previamente con el PC, al incrementar la temperatura de inyección el punto de inyección en el molde, se tarda mayor tiempo en solidificar lo que permite mayor cantidad de material inyectado en el molde, que a su vez permite una reducción de la contracción del material y el esfuerzo residual. La temperatura del molde tiene un efecto similar al explicado con la temperatura de inyección, pero de mayor magnitud con respecto a esta última [21, 22], ya que, adicionalmente, con una mayor temperatura de molde la región no solidificada es de mayor espesor en la pieza inyectada, lo que permite un mayor efecto de la etapa de empaque que reducirán las contracciones y los esfuerzos residuales.

La Figura 16 presenta la regresión del DE para PP a diferentes niveles de tiempo de enfriamiento, presión y tiempo de empaque. Se presentan el coeficiente de regresión y el coeficiente de regresión ajustado. Como en el caso del PC, la regresión robusta para el DE en el PP muestra grados de correlación más bajos que los obtenidos con el DE de temperaturas. Sin embargo, el modelo polinomial cuadrático de la regresión robusta es aún adecuado. La ecuación (4) describe el polinomio obtenido con la regresión robusta.

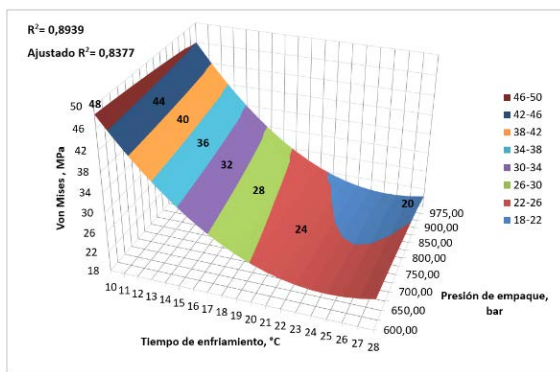


Figura 16. Superficie de respuesta para el PP a diferentes niveles de tiempo de enfriamiento, tiempo y presión de empaque

$$VM_{PP-Enf_Emp} = 91.137 + 8.052 * 10^{-3} * Pe - 4.715 * tenf - 1.359 * te - 7.597 * 10^{-6} * Pe^2 - 1.831 * 10^{-4} * Pe * tenf - 4.391 * 10^{-5} * Pe * te + 0.114 * tenf^2 - 8.511 * 10^{-2} * tenf * te + 0.145 * te^2 \quad (4)$$

Donde:

VM_{PP-Enf_Emp}: Esfuerzos residuales Von Mises del polipropileno en función del tiempo de enfriamiento, la presión y el tiempo de empaque, en MPa.

Pe: Presión de empaque, en bar.

te: Tiempo de empaque, en s.

tenf: Tiempo de enfriamiento, en s.

Los niveles más bajos de esfuerzos residuales se observan a un tiempo de 25 segundos de enfriamiento al nivel de presión de empaque más alto. Mientras que los niveles de esfuerzo residual más altos se obtuvieron a los niveles de temperatura de molde y de inyección más bajas. Estos resultados son los esperados porque se introduce más material durante la etapa de empaque, al incrementar la presión, de esta forma se compensa en mayor medida la contracción en la región central de la pieza moldeada. Además, se

observa un mayor grado de curvatura en la superficie de respuesta del PP comparada con la del PC, lo que puede explicarse a mayores contracciones registradas en un material semicristalino, como el PP, donde ocurren fenómenos de contracción por el efecto térmico y de cristalización. Adicionalmente, los tiempos de enfriamiento mayores permiten mayor tiempo de relajación molecular y, por lo tanto, menores niveles de esfuerzos residuales.

En la Tabla 5 se listan diferentes estudios realizados para analizar y medir los esfuerzos residuales generados en el proceso de inyección de polímeros termoplásticos, incluyendo el estudio actual para establecer un comparativo.

Tabla 5. Comparativo de estudios de esfuerzos residuales en piezas termoplásticas inyectadas

Medición de esfuerzos residuales (ER)	Variables que afectan los esfuerzos residuales	Observaciones	
Fotoelasticidad	Tiempo de enfriamiento Temperatura de inyección Espesor Polímero poliestireno	Los ER se reducen a alta temperaturas de inyección. Mayores ER a menor espesor	[1]
Método del taladro Simulación Moldflow (2.5D)	A una sola condición de proceso Polímero no especificado	Se miden los ER a través del espesor y en dos puntos diferentes de la pieza	[4]
Simulación Moldflow	Temperatura de molde Tiempo enfriamiento Espesor Presión de empaque Tiempo de empaque Polipropileno +50% madera	Se indican rangos de condiciones de proceso entre los cuales se espera reducir los ER	[5]
Simulación Moldflow (2.5D)	Una sola condición de proceso No se especifica polímero	Se calculan los ER para un posterior análisis de esfuerzos de adhesión entre polímero y metal	[8]
Simulación Moldflow	Temperatura molde Temperatura inyección Tiempo de empaque Presión de inyección Tiempo de inyección Polímero poliacetal	Se calculan los ER en el espesor con un diseño de experimentos ortogonal	[14]
Simulación Moldflow	Temperatura inyección Temperatura molde Tiempo inyección Presión de empaque Polímero policarbonato	Se calculan los ER con un diseño de experimentos factorial fraccionado. A temperatura de moldes altas se presenta menores ER	[15]
Simulación Moldex3D	Tiempo enfriamiento Temperatura inyección Presión de empaque Tiempo de inyección Polímero ABS	Reporte de esfuerzos residuales en las direcciones axial y transversal de la pieza	[17]
Simulación Moldflow	Tiempo inyección Temperatura inyección Refinamiento malla Polímero ABS	Se minimiza los ER controlando la temperatura y el tiempo de inyección	[19]
Remoción de capas	Temperatura de molde Polímero poliestireno, policarbonato y mezcla PPE-HIPS	La temperatura de molde reduce los ER principales, los ER a compresión se desplazan a la superficie de la pieza	[22]
Simulación numérica	Presión empaque Temperatura inyección Temperatura molde Velocidad inyección Polímero poliestireno	Se calculan ER sin tener en cuenta interacción de variables	[23]
Simulación Moldex3D y superficies de respuesta (estudio actual)	Temperatura molde Temperatura inyección Tiempo enfriamiento Presión empaque Tiempo empaque Polímero policarbonato	Se calculan ER por simulación con experimento factorial completo, prediciendo modelos de correlación robustos, con interacción entre variables, representado por superficies de respuesta.	

Para el caso particular simulado en el PP, el valor de esfuerzo residual mínimo se registró alrededor de los 25 segundos de tiempo de enfriamiento, como se indicó anteriormente. Sin embargo, datos adicionales para tiempos de enfriamiento mayores se requerirían para tener una conclusión más certera sobre este comportamiento. Sin embargo, este escenario no se explora en este estudio, porque en la práctica se manejarían tiempos de enfriamientos poco reales, que no reflejan lo que se observa en un procesamiento industrial que requiere alta productividad.

De acuerdo con los datos de la Tabla 5, se encuentra que la mayoría de estudios evalúan los esfuerzos residuales para condiciones de proceso fijas, variando las condiciones de proceso sin tener en cuenta la interacción entre variables o sin emplear un diseño de experimento completo, que involucre la mayoría de las variables que afectan el comportamiento de los esfuerzos residuales. La contribución del actual estudio es evaluar los esfuerzos residuales del proceso de inyección de termoplásticos, evaluando dos tipos de polímeros típicos: uno amorfo (PC) y otro semicristalino (PP), bajo las principales variables del proceso que afectan la generación de esfuerzos residuales, en niveles que cubren los rangos de procesamiento amplios y admitidos para cada tipo de polímero. Adicionalmente, se realiza un diseño de experimentos completo por simulación del proceso de inyección, donde los resultados de esfuerzos residuales permiten derivar un modelo polinómico en función de la interacción entre las variables, para predecir valores de esfuerzos residuales no contemplados en las simulaciones preliminares.

4. Conclusiones

La técnica de regresión multivariable robusta mostró ser una herramienta útil para el modelamiento de datos obtenidos de la simulación del proceso de inyección. Como se ilustra en el estudio, una considerable cantidad de información fue satisfactoriamente correlacionada y una herramienta predictiva fue derivada de los datos obtenidos de un diseño de experimentos (DE), empleando el software de simulación del proceso de inyección Moldex 3D. Se demostró que una función polinómica cuadrática es adecuada para la predicción y el análisis de datos simulados, además se evidenció las ventajas de la metodología de regresión robusta.

Los resultados obtenidos en las simulaciones fueron congruentes con el comportamiento teórico del fenómeno térmico y de deformaciones, presentes en una pieza inyectada y sometida a enfriamiento en un molde. Las variables del proceso de inyección más predominantes en la generación de esfuerzos residuales en la pieza plástica son la temperatura de molde y la presión de empaque, seguidas, pero en menor nivel de influencia que las variables anteriores, por la temperatura de inyección y los tiempos de enfriamiento y empaque. Estas últimas variables tienen un alto impacto en el incremento de los esfuerzos residuales a bajo tiempos. De otro lado, a altos tiempos se tiende a reducir los esfuerzos residuales por mayor tiempo de relajación molecular. Sin embargo, extender por tiempo prolongado el enfriamiento no redundará en una reducción significativa de los esfuerzos residuales, pero sí sacrificando altos tiempos de producción de la pieza inyectada, por lo que no se recomienda enfriar la pieza más allá de los tiempos recomendados, de acuerdo al tipo de material, espesor de pieza y condiciones de temperatura de molde e inyección.

Se mostró el aporte de este estudio con respecto a otros realizados para evaluar los esfuerzos residuales, donde se evalúa en forma completa la generación de estos y desarrollando un modelo para predecirlos y representarlos por superficies de respuesta. Actualmente se están desarrollando estudios que incluyen el efecto del espesor, las

propiedades mecánicas y la validación experimental de los esfuerzos residuales, mediante predicción por técnicas estandarizadas de fotoelasticidad. Para reportes futuros se esperan tener resultados que complementen el actual estudio expuesto.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico Metropolitano ITM, en la ciudad de Medellín, Colombia, por el apoyo financiero para realizar estos estudios.

Referencias

- [1] Acevedo, M. et al. (2014). [Effect of the molding temperature and cooling time on the residual stresses of crystal polystyrene](#). *Dyna* 81(187), pp. 73–80.
- [2] Callister, W. (2007). [Materials Science and Engineering An Introduction](#). New York: John Wiley.
- [3] Osswald, T. et al. (2010). [Ciencia de Polímeros para Ingenieros](#). Cúcuta: Editorial Guaduales.
- [4] Kim, S. et al. (2007). [Residual stresses and viscoelastic deformation of an injection molded automotive part](#). *Korea-Australia Rheology Journal* 19(4), pp. 183–190.
- [5] Azaman, M. et al. (2014). [Numerical simulation analysis of the in-cavity residual stress distribution of lignocellulosic \(wood\) polymer composites used in shallow thin-walled parts formed by the injection moulding process](#). *Materials & Design* 55, pp. 381–386.
- [6] Guevara, A. & Figueroa, U. (2014). [Residual stresses in injection molded products](#). *Journal of Material Science* 49(13), pp. 4399–4415.
- [7] Ramani, K. & Zhao, W. (1998). [The evolution of residual stresses in thermoplastic bonding to metals](#). *International Journal of Adhesion and Adhesives* 17(4), pp. 353–357.
- [8] Erdmann, M. & Holzleitner, J. (2008). [Computational analysis of injection-molding residual-stress development in direct-adhesion polymer-to-metal hybrid body-in-white components](#). *Journal of Materials Processing Technology* 203, pp. 19–36.
- [9] Maxwell, A. & Turnbull, A. (2004). [Influence of small fluctuating loads on environment stress cracking of polymers](#). *Polymer Testing* 23(4), pp. 419–422.
- [10] Lee, Y. et al. (2012). [Investigation on residual stress and stress-optical coefficient for flexible electronics by photoelasticity](#). *Measurement* 45(3), pp. 311–316.
- [11] Macías, C., Meza, O. & Pérez, E. (2015). [Relaxation of residual stresses in plastic cover lenses with applications in the injection molding process](#). *Engineering Failure Analysis* 57, pp. 490–498.
- [12] Sortino, M., Totis, G. & Kuljanic, E. (2014). [Comparison of Injection Molding Technologies for the Production of Micro-optical Devices](#). *Procedia Engineering* 69, pp. 1296–1305.
- [13] Kihlander, J. (2013). [Finite Element simulation of vibrating plastic components](#). Master Thesis. Linköping University.
- [14] Li, M., Zhang, H. & Nie, Y. (2012). [Simulation Analysis of Residual Stress of the Plastic Gear Based on Moldflow](#). *Key Engineering Materials* 501, pp. 339–343.
- [15] Weng, C., Lee, W. & To, S. (2009). [Birefringence techniques for the characterization of residual stresses in injection-moulded micro-lens arrays](#). *Polymer Testing* 28(7), pp. 709–714.
- [16] ASTM (2010). [Standard test method for tensile properties of plastics](#). D638-02a. ASM International.
- [17] Östergren, A. (2013). [Prediction of residual stresses in injection moulded parts](#). Master Thesis. Chalmers University of Technology.
- [18] De Oliveira, J. (2012). [Análise numérica de tensões induzidas pelo escoamento não isotérmico de um polímero no preenchimento de cavidades de paredes finas](#). Ph.D. Thesis. Universidade Federal do Rio Grande Do Sul.
- [19] Nita, A. & Oanta, E. (2010). [Improving the quality of the molded polymeric parts by reducing the residual stress](#). In *Proceedings of the 2nd International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems* (pp. 77–82). Constantza, Romania.
- [20] ETH Zürich (2012). [Robust regression](#). Online [un 2016].
- [21] Siegmann, A., Buchman, A. & Kenig, S. (1982). [Residual stresses in polymers III: The influence of injection-molding process conditions](#). *Polymer Engineering & Science* 22(9), pp. 560–568.
- [22] Hastenberg, H. et al. (1992). [The Measurement of Thermal Stress Distributions Along the Flow Path in Injection-Molded Flat Plates](#). *Polymer Engineering & Science* 32(7), pp. 506-515.
- [23] Choi A. & Im, Y. (1999). [Prediction of shrinkage and warpage in consideration of residual stress in integrated simulation of injection molding](#). *Composite Structures* 47(1-4), pp. 655–665.
- [24] Kurt, M. et al. (2009). [Experimental investigation of plastic injection molding : Assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products](#). *Materials & Design* 30(8), pp. 3217–3224.

- [25] Postawa, P. & Koszkul, J. (2005). [Change in injection moulded parts shrinkage and weight as a function of processing conditions](#). *Journal of Materials Processing Technology* 162-163, pp. 109–115.
- [26] Jansen, K., Van Dijk, D. & Husselman, M. (1998). [Effect of processing conditions on shrinkage in injection molding](#). *Polymer Engineering & Science* 38(5), pp. 838–846.
- [27] Jansen, K. & Titomanlio, G. (1996). [Effect of pressure history on shrinkage and residual stresses?injection molding with constrained shrinkage](#). *Polymer Engineering & Science* 36(15), pp. 2029–2040.
- [28] Bushko, W. & Stokes, V. (1995). [Solidification of thermoviscoelastic melts. Part II: Effects of processing conditions on shrinkage and residual stresses](#). *Polymer Engineering & Science* 35(4), pp. 365–383.
- [29] Tao, W. & Yue, Y. (2012). [Residual Stress Simulation and Process Optimization of Injection Molded Part](#). *China Plastics Industry* 12.
- [30] Wang, X., Zhao, G. & Wang, G. (2013). [Research on the reduction of sink mark and warpage of the molded part in rapid heat cycle molding process](#). *Materials & Design* 47, pp. 779–792.
- [31] Sánchez, R. et al. (2012). [On the relationship between cooling setup and warpage in injection molding](#). *Measurement* 45(5), pp. 1051–1056.

3. Diseño de un engranaje con perfil de diente especial bajo criterios geométricos y de resistencia a fatiga

Pedro Martínez H.¹

Nelson Arzola de la P.²

¹Universidad Militar Nueva Granada. Colombia

²Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

1. Introducción

Este capítulo presenta los aspectos más significativos en el diseño de los perfiles, para ello se hace una reseña de investigaciones sobre aspectos concernientes al perfil del diente y su respectivo conjugado en sistemas de transmisión de potencia. Para fundamentar la base matemática de las ecuaciones que rigen el trazado del perfil del diente en los engranajes, se presentan las ecuaciones utilizadas para los perfiles del sistema normal de módulo y las ecuaciones de perfiles especiales que presentan similares condiciones geométricas. De acuerdo con la metodología planteada, se selecciona un mismo tipo de acero para hacer las comparaciones y para establecer las diferencias dentro de la singularidad de cada uno de los diseños propuestos. Posteriormente, se detalla el procedimiento de modelamiento por elementos finitos, que permite obtener los resultados para comparar los diferentes tipos de diseño de pares conjugados.

En [1] se presenta un compendio de investigaciones pertenecientes al diseño de los perfiles de dientes para engranajes, donde se realiza una revisión sobre la metodología para el trazado de perfiles, capacidad de carga, error de transmisión, ángulo de presión, desgaste y análisis de falla más recurrentes en los engranajes. Esta revisión sirve de guía para la selección de los parámetros de diseño para perfiles de diente en engranajes.

Con respecto al diseño de nuevos perfiles, [2] presenta las relaciones geométricas para el trazado del perfil del diente en engranajes cilíndricos, valorando el grado de conjugación de los flancos activos de los dientes, que contribuye en gran medida a la eficiencia de la transmisión. Durante el modelamiento y para el trazado de la curva en la base del diente, llamada trocoide, la mayoría de autores simplifican el análisis sustituyéndola por un arco de circunferencia. Otro aporte en la metodología de diseño presentada por [2], es el trazado del perfil del diente en tres partes: 1) cresta del diente entre los puntos 1 y 2; 2) perfil del diente con trazado entre los puntos 2 y 3, cuyas coordenadas se definen en función de la geometría externa de la rueda y el flanco del borde cortante de la herramienta de generación; y 3) trazado de la curva de trocoide entre los puntos 3 y 4, tal como se muestra en la Figura 1.

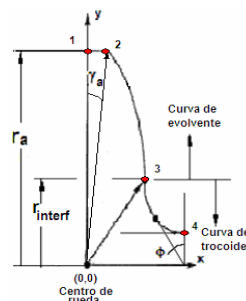


Figura1. Trazado del perfil con ubicación de los puntos externos de las curvas [2]

En el diseño del perfil del diente se utiliza la curva coseno como función generadora, donde toma la línea cero de la curva como círculo de paso [3], como se observa en la Figura

2. Esto confirma que la transmisión de engranaje con función coseno tiene un coeficiente de deslizamiento inferior al perfil de evolvente; además, que los esfuerzos de flexión y de contacto se reducen al ser comparados con el perfil de evolvente correspondiente al sistema normal de módulo. Estos resultados se obtienen mediante simulaciones de MEF.

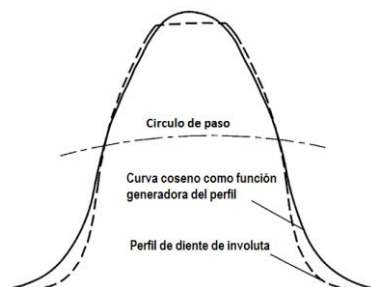


Figura 2. Perfil del diente con función coseno y con una función de involuta [3]

En el trabajo desarrollado por [4], se presenta un modelo matemático que incluye la ecuación de la línea de acción, utilizando curvas parabólicas para el diseño del perfil del diente y la ecuación del perfil conjugado con base en la teoría de engranaje. Según este método, el parámetro de parábolas se toma como una de las variables de diseño para determinar el perfil del diente. Entre los resultados obtenidos se destacan:

- La forma del perfil de los dientes en el círculo de paso es relevante para los parámetros de la parábola correspondiente. Esta propiedad le permite al diseñador equilibrar el espesor del *adendum* del diente.
- El número mínimo de dientes para evitar la interferencia se ve afectado por el parámetro de la parábola y se deriva de la ecuación de la línea de acción.
- El esfuerzo de contacto y los esfuerzos de flexión son inferiores a los que aparecen en los engranajes de evolvente. Los resultados muestran que los engranajes desarrollados podrían tener aplicación en el campo de bombas de engranajes.
- La metodología propuesta no se limita solamente al empleo de curvas parabólicas, por lo tanto, el uso de cualquiera otra curva como línea de acción podría mejorar la libertad de diseño del perfil del diente para engranajes de aplicación específica.

Generalmente, el diseño de perfiles de engranajes con función de *involuta* es el método más utilizado, debido a su amplia estandarización, facilidad de mecanizado y porque su punto de paso siempre coincide con la línea de engranaje. Dicho efecto y la necesidad de conseguir sistemas de transmisión más eficientes, despierta el interés por estudiar nuevos tipos de perfiles para aplicaciones particulares en la industria de sistemas de transmisión de potencia.

El objetivo central de este capítulo es desarrollar un análisis y evaluación del diseño de engranajes cilíndricos con un nuevo tipo de perfil de trabajo del dentado, para lo cual se emplean funciones especiales de tipo potencial para el engranaje generador. Esta propuesta se convierte en una nueva alternativa de diseño para los sistemas de transmisión de potencia de engranajes.

2. Materiales y métodos

Al construir un par de ruedas dentadas, el perfil del diente del primer engranaje se puede elegir arbitrariamente, tal como lo presenta [5]. En este caso, el perfil del diente del otro engranaje se calcula mediante el método general de determinación del perfil

conjugado. Luego se elige una función potencial para el trazado del perfil del diente en el engrane conductor. Esta función permite el control de convexidad y es posible alcanzar una desviación mínima respecto a los mismos puntos de trazo del perfil normalizado. El procedimiento para la generación de la geometría y su modelamiento a fatiga se obtiene mediante los siguientes pasos:

1. Determinar los parámetros de diseño para el perfil del sistema normal de módulo, constituido por las ecuaciones formuladas en [6] y que permiten establecer los diámetros para el trazado del perfil de acuerdo con las expresiones de la Tabla 1.

Tabla 1. Fórmulas para el trazado del perfil normalizado modular

m:	Módulo	Entrada predefinida de diseño	
N:	Número de dientes	Entrada predefinida de diseño	
α :	Angulo de presión	Entrada predefinida de diseño	
De:	Diámetro exterior	$D_e = m(N + 2)$	(1)
Dp:	Diámetro primitivo	$D_p = m * N$	(2)
Di:	Diámetro de raíz	$D_i = D_p - (2,33 * m)$	(3)
Db:	Diámetro base	$D_b = \cos \alpha (D_p)$	(4)

2. Elegir un sistema coordenado y trazar los diámetros calculados en la Tabla 1.
3. Desarrollar el trazado del perfil normalizado de involuta. Los puntos (x, y) se pueden determinar con las funciones paramétricas descritas en [7]. Las ecuaciones del perfil normalizado con módulo igual a 4mm se determinan con las ecuaciones (5) y (6).

$$x = 46,985[\cos(t) + \sin(t)] \quad (5)$$

$$y = 46,985[\sin(t) - (t) \cos(t)] \quad (6)$$

Dónde: $0 \leq t \leq 0,64$, que delimitan la altura total del diente para un módulo $m=4$ mm.

4. Conocidos los valores (x, y) del sistema normal de módulo, se remplazan en la ecuación (7) para determinar los nuevos pares ordenados (x_i, y_i) , que establecen la ecuación del perfil con función potencial que mejor se ajusta al perfil normalizado.

$$y_1 = y_0 X^k \quad (7)$$

Donde: y_1 : Perfil especial con función potencial. Para la ecuación (8), los valores de la constante k corresponden a números racionales. Siendo:

$$k = \frac{\ln(\Delta y)}{\ln(\Delta x)} = \frac{\ln(y_n) - \ln(y_1)}{\ln(x_n) - \ln(x_1)} \quad (8)$$

Donde: y_0 : Elemento del dominio que es un número real diferente de cero, se expresa con la ecuación (9).

$$y_0 = \frac{y}{x^k} \quad (9)$$

Es necesario destacar que, para obtener un perfil potencial equivalente al perfil modular, es necesario definir los dos valores extremos (y_n y y_1), que cubren todo el rango de valores del perfil modular. De esta manera la ecuación del perfil potencial equivalente será:

$$Y_{M4} = 0,1326X^{1,5643} \quad (10)$$

La ecuación (10) describe los mismos puntos (pares ordenados) que el perfil paramétrico definido en (5) y (6). A partir de (10) se determinan las ecuaciones de los perfiles especiales $Y_{-1,5}$ y $Y_{+1,5}$, variando en el mismo porcentaje la base y el exponente de la función equivalente de M4 (Y_{M4}), cuya variación se limita a +/- 1,5%.

5. Trazado del perfil del diente conjugado $Y_{C+/-1,5}$. El perfil conjugado geoméricamente se determina mediante el trazo de la curva tangente a la curva generadora, para las diferentes posiciones que tiene el perfil de diente del engranaje durante el giro sobre el diámetro primitivo de radio R_2 , de acuerdo con la Figura 3.

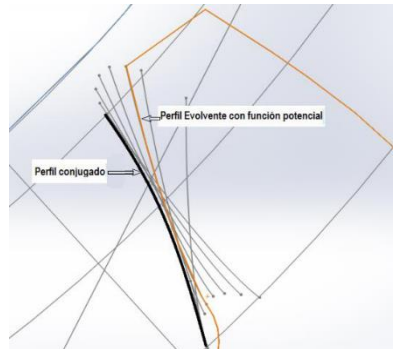


Figura 3. Obtención del perfil conjugado

Para determinar la ecuación del perfil conjugado se establece un nuevo sistema de coordenadas, correspondiente al engranaje conducido y cuyo origen (x_0, y_0) se ubica a una distancia equivalente a la suma de los radios de paso del engranaje. Conocidos los valores discretos (x_i, y_i) del perfil conjugado Y_c , que se indican en la Figura 3, se puede representar esta función mediante un ajuste por regresión con una función algebraica polinómica de cuarto orden, como indica la ecuación (11). Para ello, [8] emplea un procedimiento de ajuste del polinomio de orden m con una serie de puntos (x_i, y_i) .

$$y_c = a + bX + cX^2 + dX^3 + eX^4 \quad (11)$$

Donde:

y_c : Función polinómica.

a, b, c, d, e : coeficientes del polinomio.

S_r : Sirve para calcular el error estándar de aproximación basado en la regresión polinómica.

$$S_r = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - a - bX_i - cX_i^2 - dX_i^3 - eX_i^4)^2} \quad (12)$$

Derivando y ordenando respecto a cada coeficiente, de la ecuación (12) se obtiene un sistema de cinco ecuaciones con cinco incógnitas:

$$\begin{aligned} na + (\sum X_i)b + (\sum X_i^2)c + (\sum X_i^3)d + (\sum X_i^4)e &= \sum y_i \\ (\sum X_i)a + (\sum X_i^2)b + (\sum X_i^3)c + (\sum X_i^4)d + (\sum X_i^5)e &= \sum X_i y_i \\ (\sum X_i^2)a + (\sum X_i^3)b + (\sum X_i^4)c + (\sum X_i^5)d + (\sum X_i^6)e &= \sum X_i^2 y_i \\ (\sum X_i^3)a + (\sum X_i^4)b + (\sum X_i^5)c + (\sum X_i^6)d + (\sum X_i^7)e &= \sum X_i^3 y_i \\ (\sum X_i^4)a + (\sum X_i^5)b + (\sum X_i^6)c + (\sum X_i^7)d + (\sum X_i^8)e &= \sum X_i^4 y_i \end{aligned}$$

Resolviendo la matriz 5x5 se pueden determinar los valores de los coeficientes a, b, c, d, e de la ecuación (11) y la desviación estándar se calcula con la ecuación (13).

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 X_i - \dots - a_m X_i^m)^2}{n}} \quad (13)$$

Donde:

$S_{y/x}$: Desviación estándar

S_r : suma de los cuadrados de los residuos

n : Número de datos

m : Grado del polinomio

6. Selección del material para los engranajes. Son diversas las clases de aceros utilizados en sistemas de transmisión de potencia para engranajes, como se ve en la Tabla 2.

Tabla 2. Aceros y tratamientos térmicos empleados en la fabricación de engranajes [11, 12]

Templado y revenido		Cementado	
SAE 1045	Acero al carbono	SAE 2315	Níquel
SAE 3140	Níquel-Cromo	SAE 3115	Níquel-Cromo
SAE 4140	Cromo-molibdeno	SAE 4615	Níquel-Molibdeno
SAE 4640	Níquel-Molibdeno	SAE 6115	Cromo-Vanadio
SAE 5140	Cromo	AISI A8620	Cromo-Níquel-Molibdeno
AISI A8640	Cromo-Níquel-Molibdeno	AISI 8615	Manganeso-Cromo-Níquel

La elección se basa fundamentalmente en la aplicación tecnológica, condiciones de operación, ambiente y grado de responsabilidad de la transmisión bajo la cual se concibe el sistema de transmisión. En esta investigación se eligió como material para los engranajes un acero de bajo costo y de aplicación generalizada: el acero al carbono SAE 1045 [9, 10]. Los parámetros y propiedades mecánicas para este acero se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades mecánicas y cíclicas acero SAE 1045 [17]

Propiedades del material	Símbolo	Valor	Unidad
Densidad	ρ	7 870	kg/m ³
Dureza		163	Brinell
Coefficiente expansión térmica		11,5x10 ⁻⁶	°C ⁻¹
Temperatura de referencia	T	22	°C
Límite de fluencia	σ_{ys}	450	MPa
Esfuerzo último a la tensión	σ_u	585	MPa
Alargamiento a la rotura		12%	
Módulo de Young	E	206	GPa
Relación de Poisson	μ	0,29	
Módulo de Bulk		163,49	GPa
Módulo a cortante	G	79,84	GPa
Calor específico		0,486	J/g °C
Conductividad térmica		51,9	W/m.K
Coefficiente de tensión		960	MPa
Exponente de tensión		-0,08	
Exponente de deformación cíclica de endurecimiento		0,17	
Coefficiente de ductilidad	ϵ_f	0,50	
Coefficiente de esfuerzo a la fatiga	σ_f	959,75	MPa
Exponente de esfuerzo a la fatiga	b	-0,08	
Exponente de ductilidad a la fatiga	c	-0,52	

7. Formulación del modelo de elementos finitos. Para el diseño por fatiga y simulación por elementos finitos (FEA) se empleó el Software Ansys y para el modelo geométrico 3D de Solid Work. El procedimiento para el análisis de predicción de la vida a fatiga de los engranajes se muestra en la Figura 4.

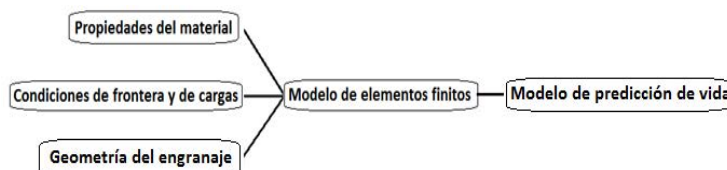


Figura 4. Estrategia de predicción de la vida a fatiga de los engranajes [13, 14]

- a) *Propiedades del material:* Luego de desarrollar el paso seis, se registran las propiedades para el acero normalizado SAE 1045 (Tabla 3) y el comportamiento del esfuerzo alternante a fatiga para el acero AISI 1045, como se observa en la Figura 5.

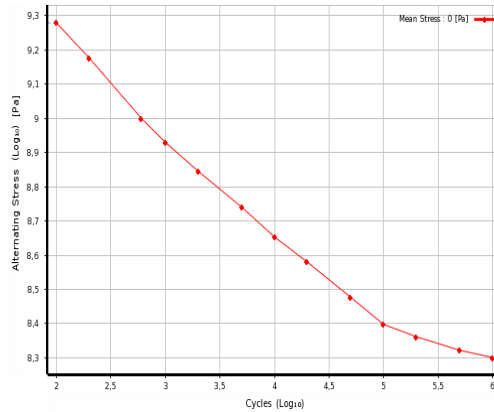


Figura 5. Esfuerzo alternante acero AISI 1045 [22]

- b) *Condiciones de frontera y de cargas:* Corresponde a la aplicación de la carga, par torsor, velocidad de rotación del engranaje, sitio de restricción del movimiento y apoyo de los elementos. Es decir, las condiciones de frontera definidas como las limitaciones de los desplazamientos de los nodos del contorno en el modelo del diente del engranaje objeto de estudio. Las fuerzas concentradas en el cuerpo del diente en una posición radial conocida simulan la carga, de manera que el momento total con que se carga es igual al momento en el eje del engranaje. Las variables cinemáticas empleadas con par torsor $7,9 \text{ N} \cdot \text{m} \leq T \leq 31,6 \text{ N} \cdot \text{m}$, velocidad angular constantes del perfil conductor $\omega = 188 \text{ rad/s}$.
- c) *Geometría de los perfiles:* El diseño geométrico de los diferentes tipos de perfiles de diente para el engranaje modular M_4 y perfiles especiales $Y_{+1,5}$, $Y_{C+1,5}$, $Y_{-1,5}$ y $Y_{C-1,5}$, se muestran en la Tabla 3, donde cada pareja de engranes se asocia al respectivo modelo en el *banner* de geometría.
- d) *Modelo de elementos finitos:* El análisis por elementos finitos es el método numérico que consiste en discretizar una geometría compleja en pequeñas partes de un tamaño predefinido, denominados elementos. El modelo geométrico para el sistema de engranaje está conformado por dos engranes: conductor y conducido. La asignación del mallado en las superficies de contacto se realiza mediante un mallado triangular, con una dimensión mínima de $93,73 \mu\text{m}$, cuya conexión se logra por contacto en las superficies de trabajo de los perfiles. Así mismo, para el ajuste del análisis estático estructural se tienen en cuenta los parámetros de velocidad angular constante de 188 rad/s , un par torsor entre $7,9 \text{ N} \cdot \text{m}$ y $31,6 \text{ N} \cdot \text{m}$ y un sistema de apoyo sin fricción, el cual se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Modelo FEA y mallado de un par de engranes en contacto

e) *Modelo de predicción de vida*: El cambio estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un punto del material sujeto a esfuerzos de amplitud variable, produce discontinuidades en el material, de donde surgen y se propagan grietas que conducen a la fractura total luego de determinado número de ciclos. Estas circunstancias generan fatiga, que es la causante de la rotura de los elementos de máquinas en servicio, además, es donde se produce la rotura bajo cargas que están aún dentro del rango elástico del comportamiento del material.

La rotura por fatiga es peligrosa porque no suele presentar indicios de fallo inminente, sino que se produce de modo repentino y sin deformaciones plásticas apreciables [15]. Existen varias teorías para predecir la falla por fatiga en engranajes o en cualquiera otro componente de máquina. En la Figura 7 se presentan las fronteras de falla para tres de las teorías más utilizadas: Goodman, Gerber y Soderberg, respectivamente. Una cuarta curva para limitar la falla por fluencia se representa junto a las fronteras de falla por fatiga. Cuando el punto representativo del estado tensional más crítico, definido por los esfuerzos equivalentes de von Mises de amplitud y medio respectivamente ($\sigma_{VM,A}$; $\sigma_{VM,M}$), está situado por debajo de cualquiera de las curvas de falla, se tiene bajo el respectivo criterio de falla la seguridad de operación para la duración que se considere; mientras que, si está por encima, el fallo se producirá antes de la duración definida. En la presente investigación se emplea la fatiga la curva de Goodman modificada como criterio de resistencia, es decir, considerando también la frontera de falla por fluencia para el material.

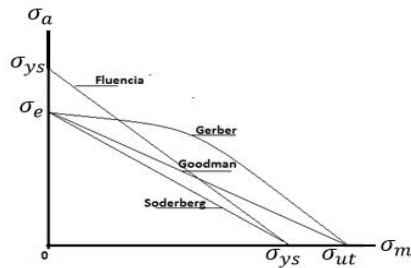


Figura 7. Diagrama de fatiga con criterios de Goodman, Soderberg y Gerber, y la frontera de falla por fluencia

Para los engranajes objeto de estudio se tiene un comportamiento pulsante de los esfuerzos equivalente von Mises de amplitud y medio, que pueden ser calculado con la ecuación (14).

$$\sigma_{VM,A} = \sigma_{VM,M} = \frac{\sigma_{VM,max}}{2} \quad (14)$$

El límite de resistencia a fatiga corregido se determina de acuerdo con la ecuación (15).

$$\sigma_e = \prod k_i \left(\frac{1}{2} \sigma_{ut} \right) \quad (15)$$

Donde los factores k_i que afectan el límite de resistencia a fatiga se determinan con las ecuaciones (16) a (19).

$$k_s = 272 \sigma_{ut}^{-0,995} \quad (16)$$

$$k_b = 1,24 D_{eq}^{-0,107} \quad (17)$$

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \quad (18)$$

$$k_c = 1 \text{ para } p_f = 50\% \quad (19)$$

Donde:

k_s : Factor de superficie

k_b : Factor de tamaño

k_g : Factor de concentración de esfuerzos a la fatiga

k_c : Factor de confiabilidad

σ_e : Límite de resistencia a fatiga corregido (MPa)

σ_{ut} : Resistencia última del material de los engranes (MPa)

D_{eq} : Diámetro equivalente de la sección transversal del diente en la posición de análisis (mm)

3. Resultados

En la Figura 8 se muestra la superposición de los tres tipos de perfiles: M4, Y+1.5 y Y-1.5, correspondientes a las formas geométricas obtenidas para los perfiles especiales. Es necesario recalcar que la convexidad de los perfiles especiales se afecta por la variación porcentual que se hace al valor establecido en la base y exponente del perfil potencial, equivalente al descrito en la ecuación (10), cuyo valor no debe exceder +/-1,5%. El empleo de una función potencial garantiza un manejo adaptativo flexible de la geometría del perfil de trabajo del diente, lo cual permite que la forma del perfil del diente sea suave y continua, y tan próxima a la función de involuta como se desee.

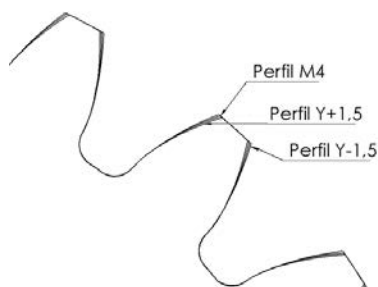


Figura 8. Comparación de la forma de los perfiles M4, Y+1.5, Y-1.5 por superposición

En la Tabla 4 se muestran las ecuaciones que determinan la geometría de los perfiles M4, Y+1.5, Y-1.5, respectivamente.

Tabla 4. Parámetros de diseño para el perfil modular y los perfiles potenciales

	Sim.	Perfil M4	Perfil EM4	Perfil Y+1,5	Conjugado C+1,5	Perfil Y-1,5	Conjugado C-1,5
Número de dientes	N	25	25	25	25	25	25
Diámetro Interior (mm)	D_i	90,66	90,66	90,66	90,66	90,66	90,66
Diámetro de base (mm)	D_b	93,97	93,97	93,97	93,97	93,97	93,97
Diámetro primitivo (mm)	D_p	100	100	100	100	100	100
Diámetro exterior (mm)	D_e	108	108	108	108	108	108
Distancia entre centros (mm)	DC	100	100	100	100	100	100
Altura del diente (mm)	h	8,67	8,67	8,67	8,67	8,67	8,67
Ancho del diente (mm)	b	5	5	5	5	5	5
Radio de pie (mm)	r	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Espacio entre dientes (mm)	c	6,28	6,28	6,39	6,17	6,24	6,32
Espesor del diente (mm)	e	6,28	6,28	6,17	6,39	6,32	6,24
Angulo de flanco (grados)	d	3,6	3,6	3,54	3,61	3,62	3,52
Paso circular (mm)	p	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56

Ecuación del perfil	$X = 46,985(\cos(t) + \sin(t))$
	$Y = 46,985(\sin(t) - (t) \cos(t))$ $0 \leq t \leq 0,5665306$
	$E_{m4} = 0,13258697758x^{1,56420954067}$
	$Y_{+1,5} = 0,1345757822x^{1,587753883}$
	$C_{+1,5} = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$ $a = 0,0015793$ $b = 0,2075554$ $c = 0,0481230$ $d = -0,0034905$ $e = 0,0002048$ $0 \leq x \leq 6,9378$
	$Y_{-1,5} = 0,1305981779x^{1,540825197}$
	$C_{-1,5} = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$ $a = 0,0080872$ $b = 0,0084717$ $c = 0,0878917$ $d = -0,0073008$ $e = 0,00035099$ $0 \leq x \leq 6,94377$

En las Tablas 5 y 6 se muestran los resultados de la simulación de los diferentes tipos de perfiles utilizando el análisis por medio de MEF. En este registro se muestra la deformación mínima y máxima, generada en el par de engranajes, el esfuerzo máximo de flexión generado en el engranaje, número de ciclos en los cuales se puede presentar daño y factor de seguridad según la relación del esfuerzo último del material y el esfuerzo máximo equivalente. Así mismo, en los requerimientos de diseño se establecieron perfiles cilíndricos con espesor de 5 mm, velocidad de giro en el engrane de entrada de 188 rad/s y coeficiente de fricción de 0,06. G: engrane conductor y C: engrane conducido.

Tabla 5. Resultado para relación de transmisión 1:1

	Perfiles M₄ & M_{c4}	Perfiles E_{+1,5} & E_{c+1,5}	Perfiles E_{-1,5} & E_{c-1,5}
T = 7,9 Nm			
Deformación min (mm)	0,0806	0,0841	0,0899
Deformación máx. (mm)	0,0929	0,0944	0,1080
Esfuerzo máx. (MPa)	78,93	74,59	101,42
Vida min (ciclos)	1E6	1E6	1E6
Daño máx. (ciclos)	1 000	173 690	1 000
Factor de seguridad a fatiga	2,53 en G	2,68 en G	1,97 en C
T = 15,8 Nm			
Deformación min (mm)	0,1629	0,1682	0,1808
Deformación máx. (mm)	0,1847	0,1896	0,2109
Esfuerzo máx. (MPa)	161,53	153,45	181,78
Vida min (ciclos)	1E6	1E6	1E6
Daño máx. (ciclos)	1000	185.210	1000
Factor de seguridad a fatiga	1,24 en G	1,30 en G	1,10 en C
T = 31,6 Nm			
Deformación min (mm)	0,3277	0,3351	0,3625
Deformación máx. (mm)	0,3683	0,3797	0,4165
Esfuerzo máx. (MPa)	326,66	311,14	342,92
Vida min (ciclos)	35 946	43 409	29 775
Daño máx. (ciclos)	27 819	127 800	33 585
Factor de seguridad a fatiga	0,61 en G	0,64 en G	0,58 en C

Tabla 6. Resultado para relación de transmisión 2:1

	Perfiles M₄ & M_{c4}	Perfiles E_{+1,5} & E_{c+1,5}	Perfiles E_{-1,5} & E_{c-1,5}
T = 7,9 Nm			
Deformación min (mm)	0,1659	0,1619	0,1591
Deformación máx. (mm)	0,1895	0,1849	0,1407
Esfuerzo máx. (MPa)	96,79	99,44	101,22
Vida min (ciclos)	1E6	1E6	1E6
Daño máx. (ciclos)	1000	99.435	1000
Factor de seguridad a fatiga	2,1 en G	2,01 en G	1,97 en G
T = 15,8 (Nm)			
Deformación min (mm)	0,3294	0,3242	0,2841
Deformación máx. (mm)	0,3757	0,3699	0,3212
Esfuerzo máx. (MPa)	195,2	200,3	202,27
Vida min (ciclos)	1E6	978.860	851.890
Daño máx. (ciclos)	1 000	830 960	1 174
Factor de seguridad a fatiga	1,02 en G	0,99 en G	0,98 en G
T = 31,6 Nm			
Deformación min (mm)	0,6290	0,6129	0,5589
Deformación máx. (mm)	0,7155	0,6975	0,6311
Esfuerzo máx. (MPa)	390,79	401,62	407,38
Vida min (ciclos)	17 832	15 941	15 036
Daño máx. (ciclos)	56 079	68 849	66 506
Factor de seguridad a fatiga	0,51 en G	0,49 en G	0,49 en C

A continuación, se muestran los resultados para el esfuerzo máximo equivalente en la base del diente, obtenidos mediante simulación de elementos finitos para una relación de transmisión 1:1. En la Figura 9 aparecen los resultados para el perfil modular, en la Figura 10 para el perfil especial potencial E+1,5 y en la Figura 11 para el perfil especial potencial E-1,5. Los resultados corresponden a un par torsor $T= 15,8 \text{ N.m}$, velocidad de giro de 188 rad/s y coeficiente de fricción entre las superficies de contacto $\mu=0,06$. El contacto de engranaje se garantiza justo para el polo del engranaje, estando un único par de dientes en contacto para esta posición.

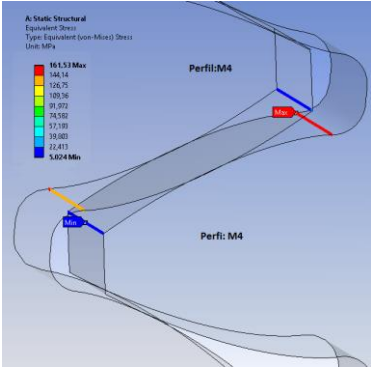


Figura 9. Esfuerzos equivalentes para el perfil M4 & Mc4

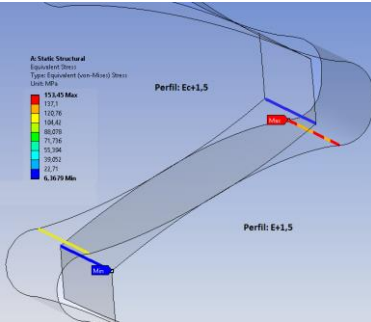


Figura 10. Esfuerzos equivalentes para el perfil E+1,5 & Ec+1,5

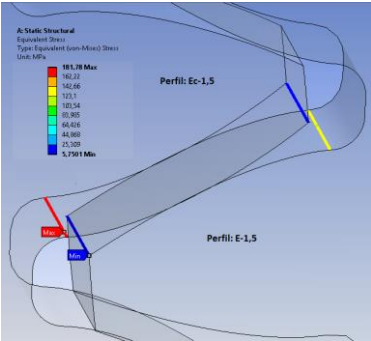


Figura 11. Esfuerzos equivalentes para el perfil E-1,5 & Ec-1,5

4. Conclusiones

- Al engranaje del sistema modular siempre le corresponde un perfil conjugado de forma geométrica similar, lo cual no sucede con el perfil especial debido a que el perfil con función potencial requiere un engranaje conjugado de condiciones geométricas diferentes para cumplir con la ley fundamental de engranaje. En consecuencia, el perfil conjugado se diseña utilizando una ecuación polinómica.

- Para una relación de transmisión 1:1 en la pareja de engranajes $E_{+1,5}$ y $E_{c+1,5}$ el esfuerzo máximo promedio generado se disminuye aproximadamente 5,27%, respecto del esfuerzo generado en la pareja de engranajes modular M4; mientras que para la pareja de engranajes especiales $E_{-1,5}$ y $E_{c-1,5}$ el esfuerzo máximo se incrementa en 12,54%.
- La deformación máxima en los perfiles especiales $E_{+1,5}$ y $E_{c+1,5}$ se incrementa en 1,2% respecto de la deformación máxima generada en el perfil modular M4.
- El factor de seguridad (FS) está directamente relacionado con el par torsor aplicado a los perfiles de diente, obteniéndose una variación $0,64 \leq FS \leq 2,68$ para una relación de transmisión 1:1 en los perfiles especiales $E_{+1,5}$ y $E_{c+1,5}$. Para los perfiles modulares el factor de seguridad tiene una variación $0,61 \leq FS \leq 2,53$.
- Para el perfil especial el error cuadrático medio para el engranaje entre el perfil generador y el conjugado no supera (0,7%), cuando se compara con la línea teórica de engranaje del perfil normalizado del sistema normal de módulo.
- La implementación de perfiles especiales del tipo $E_{+1,5}$ y $E_{c+1,5}$ puede ser una alternativa de diseño para aplicaciones muy particulares de sistemas de transmisión de potencia o sistemas reductores de velocidad, donde la capacidad de torque comparada con la del sistema modular sea un factor a tener en cuenta en el diseño del sistema.
- De acuerdo con los requerimientos tecnológicos para agilizar y asegurar la calidad en la obtención de perfiles especiales, los centros de mecanizado CNC, los equipos de corte por hilo o por láser, actualmente son una alternativa que ofrecen un alto rendimiento y alta precisión de mecanizado, la cual no se puede lograr con un sistema convencional porque se requiere una herramienta especial para cada perfil de diente.

Referencias

- [1] Martínez, P. & Arzola, N. (2014). [Estado del arte sobre perfiles de dientes para engranajes](#). *Prospectiva* 12(2), pp. 29-40.
- [2] Gonzalo, G. (2005). [Relaciones geométricas para trazado del perfil de los dientes de engranajes](#). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba.
- [3] Luo, S., Wu, Y. & Wang, J. (2008). [The generation principle and mathematical models of a novel cosine gear drive](#). *Mechanism and Machine Theory* 43(12), pp. 1543-1556.
- [4] Wang, J. et al. (2013). [Active design of tooth profiles using parabolic curve as the line of action](#). *Mechanism and Machine Theory* 67(9), pp. 47-63.
- [5] Pintor, J. (2014). [Teoría de Máquinas](#). Universidad Pública de Navarra.
- [6] Casillas, A. (2008). [Maquinas - Calculos de taller](#). Madrid: Hispanoamericana.
- [7] He, J. & Zhang, W. (2011). [Optimum Design and Research on the Involute Gear Tooth Profile](#). International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (pp. 837-840). Harbin, China.
- [8] Marvin, H. (2008). [Regresión lineal y regresión polinomial](#). Online [Oct 2015].
- [9] Cia. General de Aceros (2015). [SAE 1020 y SAE 1045](#). Online [Oct 2015].
- [10] Becerra, C. (2015). [Principios generales de los tratamientos térmicos de los aceros](#). Universidad Tecnológica Nacional de Argentina.
- [11] Spotts, F. (1977). [Proyecto de elementos de máquina](#). Barcelona: Reverte.
- [12] Díaz, F. (2007). [Tablas y gráficas para diseño de elementos de máquinas](#). Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, México.
- [13] Pinochet, J. (2007). [Análisis de falla de fatiga por flexión en la raíz de un diente de engranaje recto con pro/engineer](#). Universidad Austral de Chile.
- [14] Amol, B. & Padmanagan, K. (2014). [Design for fatigue and simulation of glass fibre/epoxy composite automobile leaf spring](#). *ARPN journal of Engineering and Applied Sciences* 9(3), pp. 196-203.
- [15] Eva, M. (2010). [Metodología para el análisis a fatiga mediante el código proengineer - Aplicación a un ajeje ferroviario](#). Universidad Carlos III de Madrid.
- [16] Adrian, M. (2010). [Simulación mediante el método de los elementos finitos de una estructura metálica](#). Universidad Carlos III de Madrid.

- [17] Abdelgalil, A. & Al-Zahen, Y. (2008). [Modeling of an actuator stem failure](#). International ANSYS Conference. Jubail, Saudi Arabia.
- [18] ISO (2006). [ISO 6336-3. Calculation of loadcapacity of spur and helical gears](#). Geneva, Switzarland.
- [19] AGMA (1989). [AGMA 908-B89 - Geometric factors for determining the pitting resistance and bending strength of spur, helical and herringbone gear teeth](#). American Gear Manufacturers Association.
- [20] Spitas, V., Costopoulos, T. & Spitas, C. (2007). [Fast modeling of conjugate gear tooth profiles using discrete presentation by involute segments](#). Mechanism and Machine Theory 42(6), pp. 751-762.
- [21] Fong, Z., Chiang, T. & Tsay, C. (2002). [Mathematical model for parametric tooth profile of spur gear using line of action](#). Mathematical and computer modelling 36(4-5), pp. 603-614.
- [22] Coffman, J. et al. (2006). [Finite Element Learning Module for Improving Knowledge of Fatigue using Commercial Software](#). Proceedings of the 2009 American Society for Engineering Education (pp. 1-27). Maryland, USA.
- [23] San Roman, J., Muñoz, B. & López, B. (2014). [Resistencia a la fatiga](#). Universidad Carlos III de Madrid.
- [24] Campbell, F. (2008). [Elements of Metallurgy and Engineering Alloys](#). ASM International.
- [25] Gonzalez, R. (2008). [Procedimiento para estimar la vida útil de engranajes ciclindricos de acero en base a la resistencia a la fatiga del material y norma AGMA 2101-D04 11\(2\)](#), pp. 35-41.

4. Problemas respiratorios y cáncer en vías aéreas asociados a la contaminación atmosférica: Una revisión del análisis del riesgo potencial en el Valle de Aburrá

Jhon F. Narváez¹

Erika Castrillón²

Francisco J. Molina³

^{1,2}Corporación Universitaria Remington. Medellín, Colombia

³Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

1. Introducción

Los problemas respiratorios, incluyendo el cáncer en vías aéreas, se han incrementado en las ciudades industrializadas, donde se emiten grandes cantidades de contaminantes atmosféricos [1] y, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), más de 1 millón de personas mueren anualmente por cáncer de pulmón. Además del hábito de fumar y la predisposición genética, se ha determinado que la contaminación atmosférica puede influir directamente en el desarrollo de cáncer pulmonar [2, 3], aunque la emisión de gases vehiculares es una de las mayores fuentes de contaminación debido al incremento del sector. Los autos emiten contaminantes tales como material particulado (PM), óxidos de nitrógeno y contaminantes orgánicos que representan alto riesgo para la salud, denominados Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) [4-6].

Se estima que cerca del 90% de la emisión de HAPs proviene de la combustión en automotores, una cifra importante debido a que algunos estudios han encontrado efectos genotóxicos de estas sustancias [7]. Por ejemplo, el venzo [a] pireno, clasificado como carcinogénico, se encuentra mezclado con otros HAP en el PM [8-10]. De acuerdo con algunos trabajos de investigación, se estima que la exposición humana al PM lleva a la distribución de los HAP en los alveolos (80%) y en la región traqueo-bronquial (20%) [11]. Esta situación puede aumentar la posibilidad de desarrollar cáncer en vías aéreas debido a procesos de bio-concentración o exposición directa a estas sustancias. El Valle de Aburrá (VA), ubicado en el departamento de Antioquia, se caracteriza por un alto desarrollo industrial y circulación vehicular, concentrados principalmente en la ciudad de Medellín [12]. Aunque los niveles de emisión atmosférica son elevados, todavía no hay evidencias contundentes que asocien los problemas respiratorios y el desarrollo de cáncer en vías aéreas por exposición. Sin embargo, la morbilidad y mortalidad por estos problemas de salud han incrementado en los últimos años.

Este trabajo tiene como objetivo aportar mediante un marco conceptual e investigativo a las posibles asociaciones entre la contaminación atmosférica y los problemas respiratorios en humanos. Estos resultados serán contrastados con información de calidad de aire, morbilidad y mortalidad en el VA. Esta revisión se fundamenta en resultados reportados durante los últimos 15 años en artículos indexados.

2. La contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica es la introducción de sustancias en el aire que alteran las proporciones de los componentes del mismo, que pueden producir un efecto adverso medible en organismos o en estructuras biológicas [13]. La principal fuente de contaminación atmosférica es el uso de combustibles fósiles, que aportan gran variedad de contaminantes y que se clasifican como gaseosos (óxidos de nitrógeno, azufre, carbono), orgánicos persistentes (dioxinas, PCBs), metales pesados (mercurio, plomo) y material particulado, donde se encuentra asociado a un grupo de contaminantes HAP.

El (PM) se clasifica de acuerdo con el tamaño aerodinámico de partícula medido en micrómetros (μm). De esta forma, el PM_{2.5}, PM₅ y PM₁₀ tienen un tamaño de partícula inferior a 2.5, 5 y 10 μm , respectivamente [14]. Cuanto menor es el tamaño del PM, mayor es la facilidad de ingreso a través del sistema respiratorio, por ejemplo, mientras que el PM₁₀ puede depositarse en el tracto respiratorio superior, el PM inferior a 2.5 (PM_{2.5}) puede llegar hasta los alvéolos, porque el tamaño de partícula le permite ingresar con mayor facilidad a través del tracto respiratorio [15]. La presencia de HAPs asociados al PM ha despertado gran interés ambiental, debido a que estas sustancias se reconocen como agentes cancerígenos de emisión atmosférica [16, 17]. Algunas organizaciones, como la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), han desarrollado trabajos con el objetivo de corroborar los efectos de estas sustancias [18].

2.1 Los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)

Los HAP son contaminantes orgánicos que se producen principalmente a partir de la quema de combustibles fósiles [19] y, de acuerdo con la Agencia para la Protección Ambiental (EPA), el aire impactado por alta combustión vehicular representa un riesgo de contaminación para los seres humanos [20]. Sustancias como antraceno, pireno, acenafteno, acenaftileno, criseno, fluoreno, naftaleno, fenantreno y benzo [a] pireno, han sido estudiadas ampliamente debido a su potencial carcinogénico [21]. Los HAP están constituidos principalmente por anillos aromáticos condensados, entre los que tienen más de 5 anillos representan el mayor potencial tóxico y, comúnmente, se asocian al PM debido a sus propiedades fisicoquímicas [22]. Lo anterior indica que el PM_{2.5} (respirable) es un importante vehículo para la acumulación de estas sustancias en el tracto respiratorio. Además, debido a los efectos carcinogénicos de los HAPs en ciudades industrializadas con valores de PM elevados, existe un elevado riesgo de alcanzar dichos efectos. En diversos trabajos se han encontrado concentraciones mayores de PM en zonas de monitoreo urbano, comparado con zonas alejadas, lo que indica un aporte considerable por actividades industriales y por combustión vehicular. Se estima que los HAP con 5 anillos representan más del 30% del total de contaminantes orgánicos analizados [23].

3. Problemas respiratorios y cáncer en vías aéreas

En las grandes ciudades los productos de combustión y los residuos industriales emitidos a la atmósfera, representan un riesgo elevado para la población [24]. Por eso, la medición de PM es una buena herramienta para medir el grado de contaminación en estos ambientes altamente influenciados por la actividad antrópica. Actualmente, en el VA se encuentran distribuidas estaciones de medición de PM₁₀ y PM_{2.5}, que permiten estimar el índice de calidad de aire [25], sin embargo, el PM_{2.5} ha despertado gran interés en muchas investigaciones debido a que permite estimar el ingreso de sustancias tóxicas a través del tracto respiratorio [26], por lo que las exigencias normativas son más estrictas para este indicador. Se estima que en 2016-2017 los estándares de calidad de aire en China incluirán valores permisibles de PM_{2.5} de 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [27].

La exposición a productos presentes en el PM, tales como óxidos de azufre y nitrógeno, producen irritación en la vía aérea superior incluyendo síntomas de bronco constricción y disnea [28]. Adicionalmente, el PM_{2.5} que se deposita en el tracto respiratorio inferior, específicamente en el epitelio alveolar, puede desencadenar inflamación pulmonar y otros problemas crónicos que pueden llevar a cáncer [29, 30]. En el PM_{2.5} se ha encontrado niveles de HAPs asociados a problemas de carcinogenicidad y mutagenicidad, incluso reportados por la EPA [31, 32]. Además, en el humo del cigarrillo se ha encontrado niveles

de HAPs, reportado como una fuente importante de estas sustancias [33]. Una investigación realizada en China demuestra que más del 1.6% de los casos de cáncer de pulmón reportados se asocia con los niveles de HAPs encontrados [34].

3.1 Problemas respiratorios

Debido a la baja calidad del aire, la morbilidad por consulta de problemas respiratorios va en aumento en Colombia, mientras que en el VA los problemas respiratorios fueron los principales motivos de consulta en 2013, con más de 9.000 pacientes atendidos.

Otra cuestión es que la contaminación del aire por ozono y metales pesados podría ser responsable de la reducción de la función pulmonar, asociándose a asma y enfisema [35, 36]. Además, la presencia de HAPs en el material particulado produce irritación y enfermedades respiratorias [37]; se han encontrado responsables de la expresión y liberación de moléculas pro-inflamatorias [38]; pueden activar la vía de señalización del factor nuclear Kappa β (NF- $\kappa\beta$), que juega un papel importante en el sistema inmune incluyendo reacciones inflamatorias [39]. Esta señalización, se da por la activación de receptores extracelulares, tales como el Toll-like receptors (TLRs) y, aunque los mecanismos no están totalmente claros, se ha encontrado la activación de estas vías durante la exposición a contaminantes atmosféricos [40, 41]. Algunos estudios en líneas celulares A549 de carcinoma de pulmón, demuestran la liberación de citoquinas y quimioquinas tales como CCL2 e IL-8, después de la exposición a PM2.5 [42]. La activación de las vías de señalización previamente descritas, indicarían que la exposición a contaminantes atmosféricos lleva a eventos inflamatorios asociados con la morbilidad de los problemas respiratorios encontrados en ciudades de alta emisión atmosférica.

3.2 Cáncer de pulmón

El cáncer de pulmón es uno de los tipos de cáncer con mayor mortalidad a nivel mundial y se estima que cerca de 1.4 millones de personas mueren anualmente por esta causa, presentándose una expectativa de vida de 5 años menor al 15% en países como Estados Unidos e Inglaterra [43]. Los HAP tienen mecanismos bioquímicos que llevan a este tipo de patologías, que ingresan hasta el tracto respiratorio inferior (Figura 1) donde se fijan a proteínas y al DNA, produciendo disrupciones bioquímicas y daños celulares irreversibles que llevan a mutaciones, malformaciones, tumores y cáncer [44].

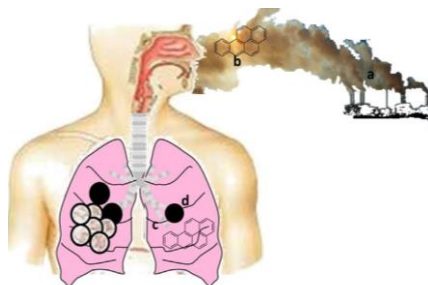


Figura 1. a) emisión de contaminación atmosférica, b) HAP que podría ser benzo [a] pireno, c) alvéolos y d) material particulado fino [43]

En la Figura 1 se muestra que el HAP asociado a material particulado, emitido por contaminación industrial y vehicular, ingresa a través de las vías respiratorias hasta los alvéolos. Una vez allí pueden generar una serie de respuestas celulares que activan una vía para cáncer. Livaloba [45] encontró que los HAP activan una vía de señalización celular que incluye un factor de crecimiento transformante (TGF- β), una citoquina que regula procesos celulares tales como morfogénesis, diferenciación, proliferación celular,

apoptosis e invasión en diferentes tipos de células [46]. Se cree que los HAPs activan esta vía, lo que podría llevar a cáncer [42, 45]. Aunque las evidencias científicas aún son tema de investigación, está claro que el riesgo de cáncer de pulmón se incrementa en ciudades con un desarrollo industrial elevado y con altas emisiones atmosféricas.

4. Análisis del riesgo por contaminación atmosférica en el Valle de Aburrá

Este valle se caracteriza por un alto desarrollo industrial y urbanístico, al punto que, en 2011 se estimó una densidad poblacional de 3.118 habitantes por Km², con un asentamiento topográfico favorable para la concentración de contaminantes por ser estrecho y encañonado. También cuenta con un alto número de asentamientos industriales considerados como fuentes importantes de contaminación, además de tener una condición meteorológica de inversión térmica, en la que el aire relativamente caliente se superpone a una capa fría, la que en las horas de la mañana origina una turbulencia mínima y pronunciada estabilidad, que tiende a elevar la concentración de contaminantes [47]. Estas condiciones lo convierten en una región con alto aporte de emisiones antrópicas [48].

De acuerdo con la secretaria de movilidad de Medellín, el parque automotor circulante estimado para vehículos en el Área Metropolitana en 2011, fue de 1.181.817 vehículos [49], lo que deja como resultado una alta emisión atmosférica de PM_{2.5}, reportado con un promedio anual mayor a 20 ug m⁻³. Además, se estima que, de la emisión de PM reportada, los combustibles diésel, gasolina y gas natural vehicular (GNV) representan el 78.7%, 20.3% y 1.0%, respectivamente. Por lo tanto, en el Área Metropolitana se han realizado campañas para promover el uso de GNV, debido a que las emisiones de PM son menores.

4.1 Valores de contaminación reportados en el valle

Actualmente, el Valle de Aburrá cuenta con varias estaciones de monitoreo para medir los niveles de contaminantes atmosféricos tales como PM₁₀ y PM_{2.5}. Los resultados pueden ser consultados de forma libre a través de la página del Área metropolitana para calidad de aire [25]. El número de estaciones y localizaciones se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Estaciones de calidad de aire en el VA

No.	Municipio	Tipo de PM	
		PM _{2.5}	PM ₁₀
9	Medellín	X	X
1	Sabaneta		X
2	Caldas	X	X
2	Estrella	X	X
0	Envigado		
4	Itagüí	X	X
1	Bello		X
1	Copacabana		X
1	Girardota		X
2	Barbosa		X

Los datos obtenidos en las diferentes estaciones indican si la calidad del aire se encuentra en la categoría buena, moderada, dañina para grupos sensibles (DGS), dañina, muy dañina o peligrosa. Además, indican cuándo están por encima de los valores permisibles, definidos como 100 µg/m³ para PM₁₀ y 50 ug/m³ para PM_{2.5} [50]. En la Figura 2 se muestra los municipios en los que se encontró calidad moderada del aire en el mes marzo de 2015.

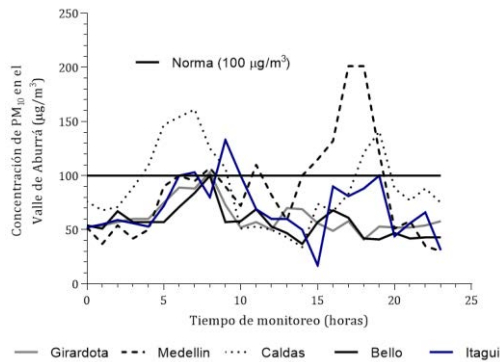


Figura 2. Niveles de PM10 en un ciclo de 24 horas en el Área Metropolitana [25]

Se puede encontrar picos de concentración de PM10 en aire entre las 5:00-10:00 y 16:00-20:00, que corresponden a las horas de mayor flujo vehicular. Sin embargo, es importante mencionar que existen otras fuentes de emisiones atmosféricas naturales, tales como polen de las plantas, polvo transportado por el viento, erupciones volcánicas, incendios forestales o actividades antrópicas tales como procesos industriales, centrales eléctricas, actividades de construcción y actividades de adiestramiento militar. De acuerdo con los reportes, el PM2.5 tiene alto impacto sobre la población expuesta, debido a la presencia de HAP y a la facilidad de este material para alcanzar los alvéolos. En la Figura 3 se muestra algunas estaciones en las que se encontraron niveles DGS para PM2.5 en el mismo día.

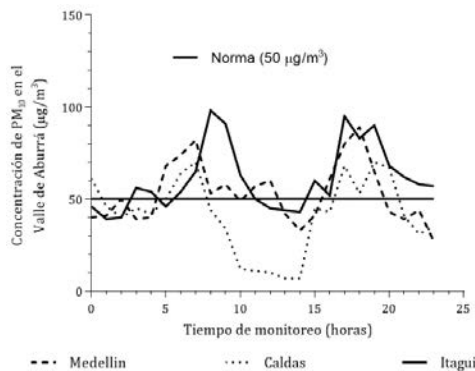


Figura 3. Niveles de PM2.5 en un ciclo de 24 horas en el Área Metropolitana [25]

Aunque los valores reportados corresponden al mes de marzo, se han encontrado tendencias similares en otros meses del año. Estas cifras indican que, en horas pico, los habitantes del VA están expuestos a valores de PM10 y PM2.5 que sobrepasan lo estipulado por la norma. Estos datos permiten inferir que, en algunos municipios del VA, la población estaría expuesta a periodos diarios de 10 a 15 horas de niveles de PM10 y PM2.5 por encima de los niveles permisibles según la normatividad vigente.

4.2 Morbilidad y mortalidad por enfermedades de vías respiratorias en el VA

La contaminación ambiental juega un papel importante en la manifestación de cuadros clínicos y enfermedades consultadas en los centros hospitalarios. En lugares con alta emisión de contaminantes atmosféricos la morbilidad se asocia principalmente con cuadros de enfermedades respiratorias y problemas asociados [51]. Para el caso del VA se evidencia un aumento en el número de consultas por problemas respiratorios y la Dirección Seccional de Salud de Antioquia (DSSA) cuenta con una base de datos detallada, en la que el reporte de casos permite identificar un aumento del número de pacientes que

consultan por síntomas respiratorios, comparado con otros motivos de consulta. Estos problemas representaron la primera causa de morbilidad (Figura 4) en centros hospitalarios en 2013 [52].



Figura 4. Morbilidad por hospitalización en el VA en 2013

De igual forma, los datos analizados demuestran un aumento en el número de pacientes con cáncer en vías aéreas, el cual incluye tráquea, bronquios y pulmón, en los últimos 15 años (Figura 5). Sin embargo, la etiología de esta enfermedad aún es objeto de investigación. Algunos han realizado estudios de asociación con la calidad del aire en el VA, debido a que la topografía y la emisión de contaminantes atmosféricos de origen vehicular e industrial favorecen la distribución de muchas sustancias en el aire [53].

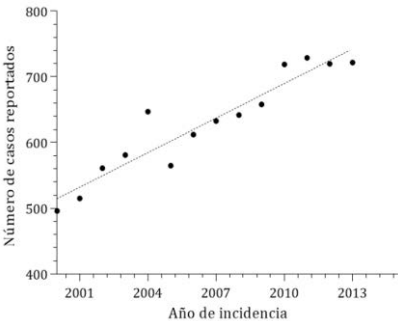


Figura 5. Incidencia de cáncer en vías aéreas en el VA en los últimos 15 años

En la figura se aprecia una tendencia creciente del número de habitantes con cáncer en vías aéreas, con el agravante que la proyección sugiere un aumento de pacientes con cáncer en vías aéreas desde 2015, cifras que podrían superar los 800 casos. Comparado con otros tipos de cáncer, la localización en vías aéreas representa el cuarto lugar después de otros localizados en mama, piel y próstata [52]. En cuanto a la mortalidad, la DSSA presenta una descripción detallada de las principales causas de mortalidad en la ciudad de Medellín, los cuales se muestran en la Figura 6, sin incluir muertes violentas o por accidentes de tránsito.



Figura 6. Principales causas de muerte no-violenta en la ciudad de Medellín en 2012

De acuerdo con estos datos, la muerte por problemas respiratorios ocupa la segunda causa en la ciudad, mientras que la muerte por tumores malignos en vías respiratorias se ubica como cuarta. Sin embargo, al sumar estas causas, los problemas en vías respiratorias en general se ubicarían como la primera causa de muerte.

5. Conclusiones y recomendaciones

La contaminación atmosférica representa un problema ambiental importante, debido a la exposición por vías aéreas a sustancias contaminantes que se transportan en el aire. En las grandes ciudades, la emisión vehicular e industrial ha preocupado a las autoridades ambientales debido al incremento de morbilidad y mortalidad asociada a problemas respiratorios. El PM10 y PM2.5 son parámetros usados para alertar sobre el grado de contaminación en un lugar determinado, pero el PM2.5 y el material más fino ha despertado el interés debido a que pueden alcanzar los alvéolos y el tracto respiratorio inferior en general. Adicionalmente, en el PM2.5 se han encontrado niveles de HAP con efectos crónicos, entre los que se incluye cáncer de pulmón. En el Valle de Aburrá el monitoreo indica que los niveles de PM10 y PM2.5 representan un alto riesgo para la población. Sin embargo, es necesario realizar trabajos contundentes de investigación que demuestren una asociación entre los niveles de contaminación y la alta morbilidad de problemas respiratorios en hospitales y la mortalidad por cáncer de pulmón.

De acuerdo con los niveles de contaminación en el VA, en las horas pico se presentan las mayores concentraciones ambientales de PM10 y PM2.5, lo que demuestra que la reducción de vehículos que circulan en el Área Metropolitana podría ser efectiva para disminuir el riesgo de exposición. Medidas como el pico y placa simplemente trasladan los periodos de exposición, debido a que los conductores cambian las horas de circulación, lo que no garantiza una reducción neta en las emisiones de PM. Como alternativas, la renovación del parque automotor, la mejora de los combustibles y mayores restricciones en el pico y placa (día completo), podrían ser más eficientes.

Finalmente, de acuerdo con los reportes realizados por la secretaria de movilidad de Medellín, el uso del GNV disminuye las emisiones de PM, por lo tanto, es necesario realizar campañas para promocionar su uso. Además, sería conveniente hacer estudios de emisiones de nuevos combustibles que generan cantidades menores de PM con procesos eficientes, para asegurar la calidad del aire que se respira y evitar problemas crónicos de los que aún no se tienen datos concretos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Corporación Universidad Remington por brindar estos espacios de investigación y al personal del grupo GAIA de la UdeA por su asesoría. Especial agradecimiento a Carlos Daniel Ramos Contreras, quien a través de su conocimiento y formación doctoral hizo aportes importantes.

Referencias

- [1] Doll, R. (1998). [Epidemiological evidence of the effects of behavior and the environment on the risk of human cancer](#). Recent Results in Cancer Research 154, pp. 3–21.
- [2] WHO (2015). [Tobacco](#). World Health Organization. Online [Apr 2015].
- [3] Wang, S. & Zhao, Y. (2006). [Air Pollution and Lung Cancer Risks](#). Science of the Total Environment 366(2–3), pp. 500–513.
- [4] Lewtas, J. (2007). [Air pollution combustion emissions: Characterization of causative agents and mechanisms associated with cancer, reproductive, and cardiovascular effects](#). Mutation Research 636, pp. 95–133.

- [5] Peter, B. et al. (2003). [Molecular epidemiology studies of carcinogenic environmental pollutants: Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons \(PAHs\) in environmental pollution on exogenous and oxidative DNA damage](#). *Mutation Research / Reviews in Mutation Research* 544(2-3), pp. 397–402.
- [6] Zhang, Y. et al. (2009). [Inhalation exposure to ambient polycyclic aromatic hydrocarbons and lung cancer risk of Chinese population](#). *PNAS* 106(50), pp. 63-67.
- [7] Binková, B. & Šrám, R. (2004). [The genotoxic effect of carcinogenic PAHs, their artificial and environmental mixtures \(EOM\) on human diploid lung fibroblasts](#). *Mutation Research* 547(1-2), pp. 109–121.
- [8] Boysen, G. & Hecht, S. (2003). [Analysis of DNA and protein adducts of benzo\[a\]pyrene in human tissues using structure-specific methods](#). *Mutation Research* 543(1), pp. 17–30.
- [9] Lau, H. & Baird, W. (1992). [The co-carcinogen benzo\[e\]- pyrene increases the binding of low dose of the carcinogen benzo \[a\] pyrene to DNA in Sencar mouse epidermis](#). *Cancer Lett.* 63(3), pp. 229–236.
- [10] Yu, Y. et al. (2008). [Mixed uncertainty analysis of polycyclic aromatic hydrocarbon inhalation and risk assessment in ambient air of Beijing](#). *Journal of Environmental Sciences* 20(4), pp. 505–512.
- [11] Dimosthenis, A. et al. (2015). [Lung cancer risk from PAHs emitted from biomass combustion](#). *Environmental Research* 137, pp.147–156.
- [12] Bedoya, J. & Martínez, E. (2008). [Calidad del aire en el Valle de Aburrá Antioquia - Colombia](#). *Dyna* 72(158), pp. 7-15.
- [13] Seaton, A. et al. (1995). [Particulate air pollution and acute health effects](#). *The Lancet* 345(8943), pp. 176–178.
- [14] Poschl, U. (2005). [Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects](#). *Angewandte Chemie International* 44(46), pp. 7520-7540.
- [15] Kampa, M. & Castanas, E. (2008). [Human health effects of air pollution](#). *Environmental Pollution* 151(2), pp. 362–367.
- [16] Mittal, R. & van Grieken, R. (2001). [Health risk assessment of urban suspended particulate matter with special reference to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review](#). *Rev. Environ. Health* 16(3), pp. 169–189.
- [17] Boström, C. et al. (2002). [Cancer risk assessment, indicators, and guidelines for polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air](#). *Environ. Health Perspect.* 110(3), pp. 451–487.
- [18] IARC. International Agency for Research on Cancer. Online [Apr 2015].
- [19] Baek, S. et al. (1991). [Phase distribution and particle size dependency of polycyclic atmosphere](#). *Chemosphere* 22(5-6), pp. 503–520.
- [20] [Polycyclic Aromatic Hydrocarbons \(PAHs\)](#). Environmental protection agency. Online [Marc 2015].
- [21] Hanedar, A. et al. (2011). [Concentrations and sources of PAHs at three stations in Istanbul, Turkey](#). *Atmospheric Research* 99(3-4), pp. 391–399.
- [22] Lu, H. & Chen, S. (2008). [Pollution level, phase distribution and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in indoor air at public places of Hangzhou, China](#). *Environ. Pollut.* 152(3), pp. 569–575.
- [23] Slezakova, K. et al. (2013). [Impact of vehicular traffic emissions on particulate-bound PAHs: Levels and associated health risks](#). *Atmospheric Research* 127, pp. 141–147.
- [24] Xia, Z. et al. (2013). [Pollution level, inhalation exposure and lung cancer risk of ambient atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons \(PAHs\) in Taiyuan, China](#). *Environmental Pollution* 173, pp. 150-156.
- [25] Área Metropolitana. [Calidad de aire, monitoreo en tiempo real](#). Online [Mar 2016].
- [26] Chen, S. & Liao, C. (2006). [Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution sources](#). *Sci. Total Environ* 366(1), pp. 112-123.
- [27] Wang, J. et al. (2015). [Long term observations of PM2.5-associated PAHs: Comparisons between normal and episode days](#). *Atmospheric Environment* 104, pp. 228-236.
- [28] Balmes, J., Fine, J. & Sheppard, D. (1987). [Symptomatic Bronchoconstriction after Short-Term Inhalation of Sulfur Dioxide](#). *Am. Rev. Respir. Dis* 136(5), pp. 1117-1121.
- [29] Uysal, N & Schapira, R. (2003). [Effects of ozone on lung function and lung diseases](#). *Curr. Opin. Pulm. Med* 9(2), pp. 144-150.
- [30] Kuo, C. et al. (2006). [Accumulation of chromium and nickel metals in lung tumors from lung cancer patients in Taiwan](#). *J. Toxicol. Environ. Health A* 69(14), pp. 1337-1344.
- [31] Brumsack, H., Heinrichs, H. & Lange, H. (1984). [West German coal power plants as sources of potentially toxic emissions](#). *Environ. Technol. Lett.* 5(1-11), pp. 7-22.
- [32] Lerda, D. (2011). [Technical Factsheet on: Polycyclic aromatic hydrocarbons](#). Belgium: European Commission.
- [33] Hecht, S. (1999). [Tobacco smoke carcinogens and lung cancer](#). *Journal of the national cancer institute* 91(14), pp. 1194-1210.
- [34] Zhang, Y. & Tao, S. (2009). [Global atmospheric emission inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons \(PAHs\) for 2004](#). *Atmos. Environ* 43(4), pp. 812-819.

- [35] Tager, I. et al. (2005). [Chronic exposure to ambient ozone and lung function in young adults](#). *Epidemiology* 16(6), pp. 751-759.
- [36] Nawrot, T. et al. (2006). [Environmental exposure to cadmium and risk of cancer: a prospective population-based study](#). *Lancet Oncol* 7(2), pp. 119-126.
- [37] Singh, V. et al. (2008a). [Blood levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in children and their association with oxidative stress indices: an Indian perspective](#). *Clin. Biochem* 41(3), pp. 152-161.
- [38] Ovreik, J. et al. (2010). [Differential effects of nitro-PAHs and amino-PAHs on cytokine and chemokine responses in human bronchial epithelial BEAS-2B cells](#). *Toxicol. Appl. Pharma-col* 242(3), pp. 270-280.
- [39] Vogel, C. & Matsumura, F. (2009). [A new cross-talk between the aryl hydrocarbon receptor and RelB, a member of the NF-kappaB family](#). *Biochem. Pharmacol* 77(4), pp. 734-745.
- [40] Goulaouic, S. et al. (2008). [Effect of poly-cyclic aromatic hydrocarbons and carbon black particles on pro-inflammatory cytokine secretion: impact of PAH coating onto particles](#). *J. Immunotoxicol* 5(3), pp. 337-345.
- [41] Bauer, R., Diaz, D. & Jaspers, I. (2012). [Effects of air pollutants on innate immunity: the role of Toll-like receptors and nucleotide-binding oligomerization domain-like receptors](#). *J. Allergy Clin. Immunol* 129(1), 14-24.
- [42] Libalová, H. (2014). [Analysis of gene expression changes in A549 cells induced by organic compounds from respirable air particles](#). *Mutation Research* 770, pp.94-105.
- [43] Wooda, S. et al. (2015). [Molecular histology of lung cancer: From targets to treatments](#). *Cancer Treatment Reviews*. 41(4), pp. 361-375.
- [44] Kim, K. et al. (2013). [A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons \(PAHs\) and their human health effects](#). *Environment International* 60, pp.71-80.
- [45] Libalová, K. et al. (2012). [Global gene expression changes in human embryonic lung fibroblasts induced by organic extracts from respirable air particles](#). *Part Fibre Toxicol*. 9(1), pp. 1-16.
- [46] Tian, M., Neil, J. & Schiemann, W. (2011). [Transforming growth factor-beta and the hallmarks of cancer](#). *Cell. Signal*. 23(6), pp. 951-962.
- [47] Arango, J., Tobón, C. & Mejía, J. (2012). [Aspectos descriptivos de la circulación en la capa límite atmosférica del Valle de Aburrá](#). *Revista Politécnica* 13, pp. 31-41.
- [48] Toro, V. et al. (2001). [Cálculo de la emisión vehicular de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Medellín mediante factores de emisión CORINAIR](#). *Revista ACODAL* 191, pp. 42-49.
- [49] Secretaria de movilidad de Medellín. [Parque Automotor Circulante Estimado Vehículos Área Metropolitana](#). Online [Oct 2015].
- [50] [Resolución 0610 de 2010 \(24 Marzo\)](#). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Online [Mar 2015].
- [51] Anderson, H. (2009). [Air pollution and mortality: A history](#). *Atmospheric Environment*, 43(1), pp. 142-152.
- [52] DSSA (2013). [Diez primeras causas de morbilidad por hospitalización, según subregión, municipio, sexo y zona. Antioquia](#). Dirección seccional de Salud de Antioquia. Online [Apr 2015].
- [53] Área Metropolitana (2012). [Informe final de calidad del aire en el Valle de Aburrá](#). Online [Mar 2015].

5. Uso de la biomasa extraída de los subproductos del arroz como aislante térmico

Dahiana Medina

Angy Palma

Hans Castro

Corporación Universitaria del Huila. Neiva, Colombia

1. Introducción

Hoy en día se exige conservar los recursos renovables o, por lo menos, buscar caminos que conduzcan a disminuir la depredación del medio ambiente. Es así como se presenta la necesidad de lograr algún beneficio con la paja, el tamo y la cascarilla de arroz, que se acumula en grandes extensiones de tierra, sin ningún uso adicional. En el Huila, los recursos agrícolas son abundantes, particularmente la producción de arroz, en la que se presenta un 30% de desecho con respecto a la producción total. Esto genera perjuicios para el medio ambiente, por lo que se crea la necesidad de generar alternativas para su aprovechamiento [1].

La agroindustria arrocerera tiene por objeto transformar el arroz cáscara en arroz blanco y otros subproductos, por medio de procesos de secamiento y molinería que, básicamente, consisten en el blanqueo del arroz sin producir demasiados granos partidos. Los principales productos del proceso de molinería son el arroz blanco, que tiene valor comercial, y los subproductos de desecho, que consiste en retirar la cáscara, una vez efectuado el proceso de trilla y que no tienen ningún valor [1]. Estos residuos se conocen como agregado liviano y, por su naturaleza, son de origen vegetal. Además, debido a que la celulosa es su principal componente, se convierten en una alternativa para extraerla y elaborar aislantes térmicos. La utilización de estos subproductos permite un mayor aprovechamiento de los residuos, al tiempo que se evitan los problemas que genera al medio ambiente. Por todo esto serían de utilidad e incrementarían la economía para la industria arrocerera, a la vez que un recurso para el fomento agroindustrial de la zona [2].

En el Huila las plantas procesadoras de arroz generan una cantidad de cascarilla, tamo y paja con cifras cercanas al 20% en peso de la producción total. Considerando el bajo peso específico de la cascarilla a granel (100 kg/m^3), su evacuación y transporte se convierte en un problema que implica costos elevados y un impacto perjudicial para el medio ambiente [2]. Esta cascarilla del arroz está compuesta fundamentalmente por fibras, celulosa y minerales, con una utilización restringida en el campo de la elaboración de alimentos concentrados para animales, debido a su alto contenido de sílice (SiO_2), un elemento que disminuye notablemente su digestibilidad. Debido a su constitución físico-química, es además es un desecho de muy difícil biodegradación [3].

La celulosa es un polímero natural que representa cerca de un tercio de los tejidos vegetales. Anualmente se produce en todo el mundo aproximadamente 1000 toneladas de celulosa por medios naturales, con formada por microfibrillas de celulosa que se encuentran fuertemente unidas entre sí por puentes de hidrógeno, por lignina y con la presencia de pectina. Estas microfibrillas de celulosa están formadas por regiones de celulosa amorfa y cristalina, y son las principales responsables de las propiedades mecánicas de las fibras naturales [4]. Por esto, la celulosa se aprovecha en diversos campos industriales, donde constituye el principal porcentaje de la materia prima del papel y también de los tejidos de fibras naturales [4]. Además, también se utiliza en la fabricación de explosivos, sedas, barnices, rayón, películas fotográficas, celofanes, bioetanol y aislantes térmicos, entre otros [5].

Por otro lado, el aislante térmico es un material usado en la construcción y en la industria, caracterizado por su alta resistencia térmica. Los criterios medioambientales de sostenibilidad son el reflejo actual de un pensamiento que no debe ser exclusivamente económico, sino que debe incluir el uso adecuado de los recursos, aspectos ecológicos y obtención de nuevos materiales. El razonamiento de usar biomasa en una pared térmica implica pensar desde el punto de vista energético, considerándola como una barrera que obstruirá el paso de la energía entre dos medios acuosos que, termodinámicamente, tienden al equilibrio térmico. Esto podría ser de interés en la construcción de viviendas o refrigeradores para comunidades desfavorecidas o con difícil acceso a la red eléctrica [6].

Los mejores aislantes térmicos se fabrican para las áreas de la salud y el clima, pero se sabe que el ahorro de energía no significa necesariamente sostenibilidad. Algunos aislantes térmicos desprenden gases que afectan la capa de ozono, tales como las espumas de poliuretano y los aerosoles, que contienen compuestos hidrofluorocarbonados (HCFCs). Además, los que utilizan algún tipo de pegante pueden contener formaldehído, que podría contribuir a la contaminación del aire con evidentes problemas potenciales para la salud. El efecto climático neto de los aislantes térmicos de los edificios es la suma de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la energía utilizada en la fabricación, además de la fuga a la atmósfera durante el uso de cualquier agente de expansión que tiene un efecto invernadero, menos las emisiones que evitan debido a la energía ahorrada como resultado del aislamiento (es cero si la energía renovable se utiliza para la calefacción/refrigeración). Aunque en el futuro los aislantes térmicos ahorrarán emisiones de carbono, las asociadas con su fabricación ya están presentes en la atmósfera.

Dado que existe la necesidad de luchar contra el cambio climático y a que hay que disminuir la liberación de gases de calentamiento global, los aislantes térmicos fabricados a partir de celulosa y otros materiales naturales pueden ser una opción amigable con el medio ambiente, debido a que capturan el carbono de la atmósfera durante su crecimiento. Como resultado del uso de estos aislantes, la sociedad podría capturar el carbono atmosférico en la estructura de edificios durante décadas. En consecuencia, los de mayor puntuación tienen emisiones de carbono negativas asociadas [7].

Otra cuestión es que la madera tiene más capacidad como aislante térmico que muchos otros materiales. En promedio es 15 veces superior a un muro de hormigón; sobre una pared, un friso de 20 mm aísla igual que un muro de 300 mm, por lo que reduce la necesidad de calentar o enfriar los ambientes. En este sentido, se vienen realizando estudios de las propiedades térmicas de la madera, cuyos resultados validan el hecho de que los espacios con madera evitan pérdidas bruscas de calor cuando, por ejemplo, se pisa el suelo con los pies descalzos. Esta característica se relaciona además con la eficiencia energética de los edificios, puesto que reduce la necesidad de enfriar los ambientes. Pero la madera también tiene propiedades acústicas, porque aísla los ruidos del exterior y acondiciona y absorbe las ondas sonoras evitando reverberación. Según estos estudios, los espacios interiores con madera generan un tiempo de reverberación menor que el de uno sin madera. Esto significa que hay menos ruidos y ecos, lo que mejora la inteligibilidad, además, al no resonar las palabras, la dicción es más clara, por lo que se aconseja la instalación de madera en espacios como aulas, salones o salas de reunión [6].

2. Problema ambiental y afectación a la salud por la quema de Biomasa

En el caso de la industria molinera del departamento del Huila, el impacto ambiental es alto debido a que genera grandes cantidades de subproductos (82 Ton/día), y porque

que actualmente se maneja inadecuadamente al disponerla en botadores de basura a cielo abierto e incinerarla y quemarla indiscriminadamente, afectando el suelo, el paisaje y el aire. Hasta el momento no existe una solución que permita su adecuado manejo o su inclusión en un proceso industrial productivo, que asegure el uso masivo del residuo para un producto que se pueda comercializar. De esta manera, la disposición final de la cascarilla de arroz, el tamo y la paja se convierte en otro de los factores que alteran el ecosistema y el medio ambiente en todo el territorio.

Analizando el entorno regional y lo consignado en el Informe de Empalme del Departamento de Sucre 2001-2003 [3] en relación con las actividades de cultivos de arroz, sorgo y pastos (pesticidas, abonos, herbicidas, etc.), el principal inconveniente que presentan sus subproductos es la baja capacidad de retención de humedad y lo difícil de lograr el reparto homogéneo de la misma (humectabilidad), cuando se usa como sustrato único en camas o bancadas. Por ejemplo, para mejorar la retención de humedad de los subproductos, se ha recurrido a su quema parcial. Aunque esta práctica mejora notablemente la humectabilidad, en realidad es perjudicial para el medio ambiente, porque el humo causa afectaciones en el sistema respiratorio. Por otro lado, se evaporan todos los fungicidas y venenos usados, enviándolos directamente a la atmósfera [3].

Otro problema que se genera en esta situación es la inadecuada disposición de residuos sólidos, porque se vierten en los cuerpos de agua, donde contribuyen a desarrollar focos de contaminación que restringen el uso de las fuentes de agua para actividades de contacto primario y secundario. Aunque el nivel de industrialización en la región es bajo, lo poco que existe es obsoleto, deficientes y altamente contaminantes, como se observa en los molinos arroceros. Esta industria contamina los cuerpos de agua y el suelo al verter los residuos del proceso de trillado del arroz (cascarilla) a campo abierto o directamente sobre ríos, caños o ciénagas. Además, contaminan el aire por emisión de partículas que producen afecciones respiratorias y de la piel, especialmente en la población infantil. Por el consumo directo de oxígeno disuelto en los procesos de biodegradación y de sedimentación, la contaminación que generan estos subproductos en las aguas superficiales disminuye el recurso hidrobiológico [2].

Conscientes del nivel de desarrollo del país, se hace necesario adelantar investigaciones y estudios conducentes a la explotación de recursos naturales, en especial los de desechos orgánicos, con el fin de implementar nuevas tecnologías dirigidas a su utilización racional. La conservación y buen manejo de los recursos naturales permiten que el desarrollo sostenible sea una realidad, con soluciones alcanzables para los problemas de contaminación ambiental, en salud, ecológicos y todos los originados en la agroindustria, como es el caso de los desechos producidos en la industria arrocera [2].

En las zonas arroceras de muchos países, el volumen de desechos de la cascarilla de arroz, el tamo y la paja es abundante, aunque ofrecen buenas propiedades como sustrato hidropónico. Entre sus principales propiedades físico-químicas se tienen que es un sustrato orgánico de baja tasa de descomposición, liviano, de buen drenaje y buena aireación, pero su principal desventaja es el costo de transporte [8]. Todos son subproductos difíciles de eliminar durante la cosecha, a lo que se suma el elevado costo de retirada y el nulo aprovechamiento, por lo que la práctica más frecuente es quemarlos en el campo en períodos de 15 a 20 días, lo que genera una gran concentración de emisiones al aire, provocando la contaminación del lugar y las zonas aledañas con partículas y gases resultantes de la combustión [3]. Los gases producidos en estas quemas son principalmente dióxido de carbono (CO), metano (CH₄) y otros en trazas, tales como el óxido nitroso (N₂O), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de

azufre (SO_x) [3]. Algo que agrava más esta situación es que estos subproductos se queman después de la cosecha, cuando la alta concentración temporal de las emisiones de gases y de partículas provocadas por la combustión, combinada con las condiciones meteorológicas, provocan que estos gases y partículas se dirijan a zonas urbanas [3].

Diversos análisis muestran que la quema de paja de arroz es una fuente considerable de contaminantes atmosféricos en forma de partículas, tales como CO_x , hidrocarburos, NO_x , SO , compuestos orgánicos volátiles (VOCs) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), compuestos policlorados y dioxinas y furanos. Por otro lado, las emisiones de dibenzodioxinas policloradas y dibenzofuran, que quedan en las cenizas de estas quemas, son altamente cancerígenas. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) que se adhieren a las partículas sólidas residuales de la combustión incompleta (carbonilla), producida tras la combustión de la paja, se introducen en los pulmones causando afecciones respiratorias agudas, asma, alergias y otras [9].

Como alternativas de aprovechamiento de estos subproductos se puede mencionar la generación de energía, tableros composites de fibra de paja y plásticos para envases, perfiles y la construcción, pasta de celulosa, pólvora, biocombustible y otros subproductos para la industria del papel, obtención de Celulosa, hemicelulosa, lignina y derivados.

3. Metodología

3.1 Materiales y reactivos

La recolección del material vegetal se hizo en cultivos arroceros cercanos al municipio de Campoalegre, Huila, donde se recolectaron subproductos del arroz, tales como paja, tamo y cascarilla. Se utilizó biomasa extraída de los subproductos del arroz, cal hidratada y aserrín como indicador. Los reactivos de grado analítico fueron:

- Ácido acético CH_3COOH
- Peróxido de Hidrogeno H_2O_2
- Hidróxido de Sodio NaOH
- Bisulfito de Sodio NaHSO_4

3.2 Tratamientos usados para la modificación de biomasa

La biomasa se modificó usando dos tratamientos: 1) los subproductos se tamizaron en un molino F2102 (Figura 1), luego se mezclaron con una disolución NaOH 0,1M durante 3 horas en un reflujo (Figura 2); el producto resultante se filtró hasta eliminar el NaOH residual (Figura 3) y se secó en un horno durante 4 horas a 100°C (Figura 4) para obtener 109g de biomasa. 2) Se aplicó el mismo proceso utilizando diferentes reactivos, tales como CH_3COOH , H_2O_2 , NaHSO_4 NaOH de manera consecutiva, obteniendo 140g de biomasa modificada. Ambas biomásas fueron caracterizadas usando espectroscopia de infrarrojo para implementarla en la construcción de paredes de biomasa.



Figura 1. Tamizado



Figura 2. Reflujo



Figura 3. Filtrado



Figura 4. Biomasa extraída

3.3 Fabricación de las paredes de biomasa

La biomasa obtenida se mezcló con cal hidratada para la construcción de las paredes, que se usaron para las pruebas como aislante térmico y caracterizado por espectroscopia de infrarrojo, densidad, humedad y absorción (Figura 5).



Figura 5. Diagrama del diseño experimental

Las paredes aislantes se preparan a partir de la mezcla de los subproductos del arroz en un 40% con la cal hidratada 60% (Figura 6). A la mezcla resultante se le adicionó agua hasta su homogenización (Figura 7). Esta parte del proceso se realizó en las instalaciones del laboratorio de química de Ingeniería Ambiental de CORHUILA y se necesitaron varias pruebas para su preparación. Primero se construyó una pared de aserrín y se tomó como referencia para las paredes de biomasa. Se pesaron 60g de aserrín y 203g de cal hidratada para la mezcla y se moldeó un tamaño de base 30 cm, altura 20cm y longitud 2cm (Figura 8). Una vez realizada la pared de aserrín, se elaboraron dos paredes más con las mismas proporciones y el mismo procedimiento, una con biomasa modificada y otra con biomasa sin modificar.

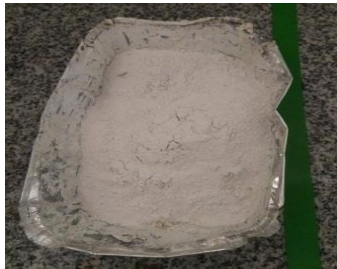


Figura 6. Mezcla biomasa y cal



Figura 7. Homogenización



Figura 8. Pared de biomasa

3.4 Aislantes térmicos

Para llevar a cabo el estudio de conductividad térmica se elaboró un diseño compuesto por un cubo de 15x20 cm en acrílico; al interior se adhirieron 2 celdas de aluminio con silicona, de la misma medida del cubo, cubriéndolo totalmente para separarlo en dos celdas con una apertura de 2 cm para introducir cada pared aislante. Un esquema simplificado se presenta en la Figura 9. El cubo se introdujo en un termo de icopor para proteger el diseño y evitar que la temperatura ambiente afectara el estudio de conductividad térmica.

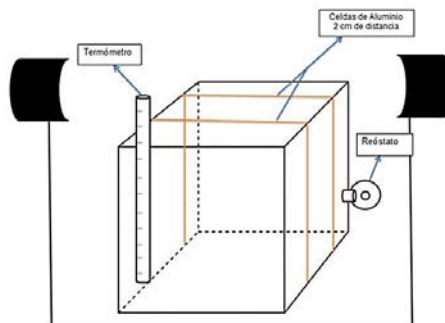


Figura 9. Diseño de conductividad térmica

Se adicionaron 250 mL de agua a cada celda del cubo. En una de las celdas se calienta el agua usando un calentador comercial hasta a una temperatura de 80°C, mientras se medía las diferencias de temperatura en la otra celda que, inicialmente, se encontraba a temperatura ambiente (31°C). De esta manera se establece si la pared cumple su rol de aislante térmico. La temperatura se midió cada 10 min durante 30 min. Una representación de este procedimiento se presenta en la Figura 10. En este estudio se realizaron tres pruebas, donde se analizó la temperatura del agua contenida en una celda usando las tres paredes diferentes, denominadas como P₁= Pared de Aserrín, P₂= Pared de biomasa y P₃= Pared de biomasa modificada.



Figura 10. Estudio de conductividad térmica en las paredes aislantes

3.5 Caracterización de biomasa y de las paredes

Los espectros de infrarrojo FTIR de los subproductos de arroz, tales como paja, tamo y cascarilla de arroz, se obtuvieron usando un espectrómetro anis50 FT-IR Nicolet ThermoScientific. Todos los espectros fueron registrados a 20° C, en el rango de 400-4000 cm⁻¹ con la acumulación de 32 escaneos. Estos espectros fueron obtenidos en el laboratorio de espectrometría de infrarrojo de la Universidad de Santander.

Las pruebas de densidad, humedad y absorción de las paredes se hicieron con base en la norma ASTM C 1185. Para la prueba de humedad se utilizó la muestra en forma de rectángulo, se midió con un calibrador para determinar sus dimensiones: 5cm de base, 5cm de altura y 1.5cm de largo (Figura 11). Luego se pesó en una báscula de precisión para obtener su peso inicial, después se sumergió en un recipiente con agua durante 24 h, sin colocarles peso encima y sin que se tocaran entre sí (Figura 12). Al terminar, se retiraron en un paño para tomar el peso y valores finales. En el proceso de la prueba de densidad, contenido de humedad y absorción, se recabaron los siguientes datos: dimensiones de la muestra, peso inicial en condiciones ambientales y peso saturado de agua después de 24h.



Figura 11. Muestras de paredes P₁, P₂, P₃



Figura 12. Muestras sumergidas

- *Humedad.* El contenido de humedad se calculó con la ecuación (1).

$$Hum = 100 (W_i - W_d) / W_d \quad (1)$$

Donde:

Hum = Contenido de humedad

W_i = Peso inicial de la pared

W_d = Peso seco de la pared

- *Densidad.* El contenido de densidad se calculó con la ecuación (2).

$$\rho = Wd/V \quad (2)$$

Donde:

ρ = Densidad, en kg/cm³

m = Masa en kg,

V = Volumen en cm³

- *Absorción.* El contenido de absorción se calculó con la ecuación (3).

$$Hum = 100 (Ws - Wd)/Wd \quad (3)$$

Donde:

Abs = Absorción

Wi = Peso inicial de la pared.

Wd = Peso seco de la pared

4. Resultados y discusión

4.1 Espectroscopia de infrarrojo

Los espectros de infrarrojo característicos de los subproductos del arroz, tales como tamo, paja y cascarilla de arroz, obtenidos en los tratamientos de reflujo, se observan en las Figuras 13 a 15.

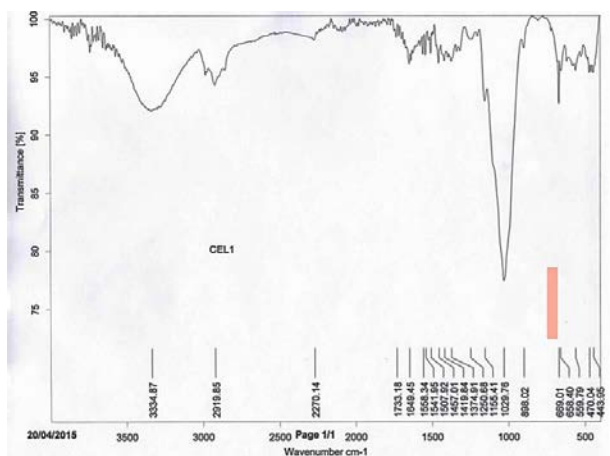


Figura 13: Prueba de Espectro de Infrarroja de Biomasa (Tamo)

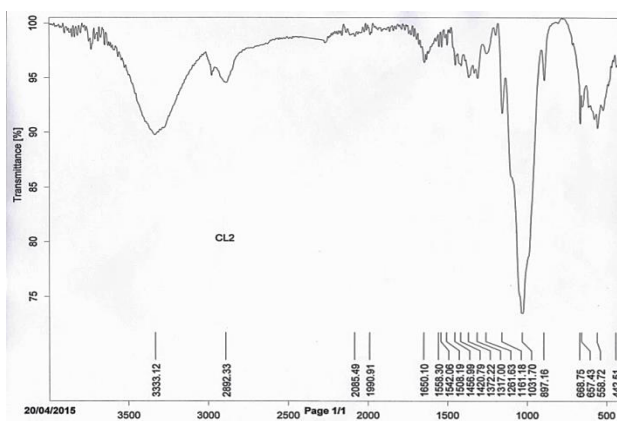


Figura 14. Prueba de Espectro de Infrarroja de Biomasa (Paja)

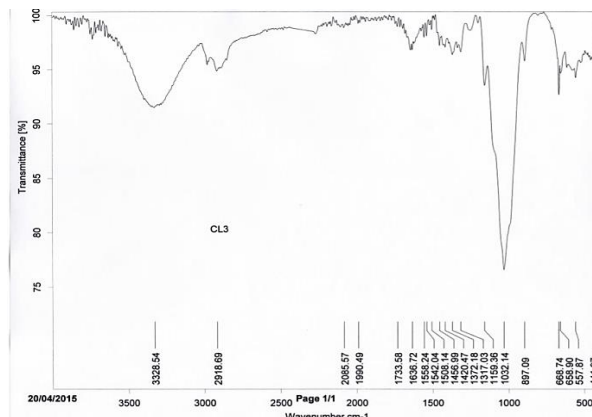


Figura 15. Prueba de Espectro de Infrarroja de Biomasa (Cascarilla)

El análisis mediante las pruebas de espectroscopia infrarroja permite caracterizar la estructura química de la biomasa obtenida mediante los grupos funcionales presentes en cada muestra analizada. La celulosa, la hemicelulosa y la lignina están compuestas por alcanos, ésteres, cetonas, alcoholes y anillos aromáticos con diferentes grupos funcionales. Las bandas características de los espectros de infrarrojo de los subproductos del arroz se presentan en la Tabla 1. Los tres espectros presentan perfiles muy parecidos entre sí y a lo reportado en la literatura [4]. Los picos característicos en el rango de 3328.54 cm^{-1} - 3334.87 cm^{-1} corresponden al grupo de hidroxilo presente en las bases de glucosa de la celulosa, los picos en el rango 1507.92 cm^{-1} - 1558.30 cm^{-1} corresponden al grupo de anillos aromáticos, lo mismo que los grupos funcionales de C-O-C, C-O, -O-CH₃ característicos de la lignina y la presencia de grupos de C=O en el rango de 1636.72 cm^{-1} - 1670 cm^{-1} presentes en el perfil de la hemicelulosa.

Tabla 1. Bandas características de los espectros de infrarrojo para B₁, B₂, B₃

Picos	Tamo	Paja	Cascarilla	[4]
OH	3334.87	3333.12	3328.54	3500
C-OC, C-O, -O-CH ₃	1733.18	1650.10	1773.58	1730-1830
C=O	1649.45	1670	1636.72	1670
Anillos aromáticos	1507.92-1558.34	1508.19-1558.30	1508.14-1558.24	1500-1600

4.2 Pruebas de aislante térmica

Los resultados de las pruebas de aislante térmica realizadas para las paredes construidas y la de referencia (aserrín), se presentan en la Tabla 2. En esta tabla se registran los valores de temperatura cada 5 min durante 30 min para cada pared. La temperatura no varía durante el experimento en cada pared, lo que indica que el paso de energía desde una celda de agua a la otra fue mínimo, mostrando la efectividad de cada pared fabricada como aislante térmico. Además, se observa que el comportamiento térmico de cada pared es similar al mostrado por la pared de aserrín.

Tabla 2. Valores de temperatura en el estudio de conductividad térmica (n=3, $x \pm \sigma$)

Tiempo (min)	Temperatura °C		
	Aserrín	Biomasa	Biomasa modificada
5	31±1	31±1	31±1
10	31±1	31±1	31±1
15	31±1	31±1	31±1
20	31±1	31±1	31±1
25	31±1	31±1	31±1
30	32±1	31±1	31±1

En la construcción de las paredes se determinó incluir mayor proporción de cal hidrata para el rendimiento de conductividad térmica, tal como lo recomienda [10]. Este autor plantea que la conductividad térmica en la mayoría de las muestras se debe obtener con un método matemático aproximado, relacionado con la densidad del compuesto y la proporción de papel en la mezcla. Por lo tanto, a mayor cantidad de papel menor conductividad térmica y viceversa.

4.3 Pruebas de humedad, densidad y absorción

Tabla 3. Valores de pruebas aplicadas. P₁=biomasa, P₂=biomasa modificada y P₃=aserrín.

Paredes	Humedad relativa (%)	Densidad (kg/m ³)	Absorción de agua (%)
Biomasa	34.14	0.90	34.14
Biomasa modificada	73.60	0.95	73.60
Aserrín	36.43	0.87	36.43

Las paredes que presentaron el valor más bajo de humedad (Tabla 3), densidad y absorción fueron biomasa (34.14 %), Aserrín (0.87 kg/m³) y biomasa (34.14%) respectivamente, y la pared que presentó los valores más altos para las mismas variables fue la de biomasa modificada: humedad (73.60%), densidad (0.95 kg/m³) y absorción (73.60%). Teniendo en cuenta esto, la pared con mejores características para ser aislante térmico es la biomasa. Debido a que se encuentra de menor humedad, pues la madera es capaz de alcanzar una humedad relativa del 5%, [11], se utilizaron menos reactivos para su extracción. Por su baja densidad es apropiada principalmente en dos aspectos: 1) se reduce el requerimiento en sistemas de sustento, y 2) es factor para una mayor resistencia térmica. Posiblemente, la razón radica en la diferencia de porosidad que hubo entre las diferentes paredes.

4.4 Pruebas de Estereoscopia Óptica

En las Figuras 16 a 18 se observan los resultados. Durante la observación en el microscopio HIROX se determinó que el poro era de forma ovalada y que presentaba una tonalidad más oscura, además, las fibras de la biomasa se logran identificar por la coloración amarilla, a diferencia de la porosidad de la cal hidratada que fue reconocida por una coloración más clara. Según [12], la porosidad observada se debe a la presencia de aire atrapado en el poro. Las dimensiones de los poros podrían verse afectadas con la cantidad de agua absorbida durante la mezcla, porque al evaporarse contribuiría a su tamaño.

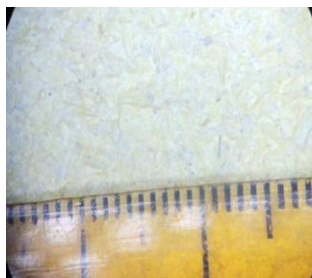


Figura16
Biomasa modificada 1

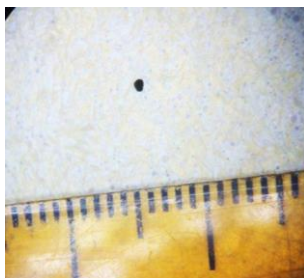


Figura 17
Biomasa modificada 2



Figura18
Aserrín

5. Conclusiones

Las paredes de biomasa obtenidas de los subproductos del arroz presentaron una humedad entre 34.14% y 73.60%, absorción de agua entre 34.14 % y 73.60% y densidad

entre 0.87 kg/m³ y 0.95 kg/m³, apropiadas para ser aislante térmico. Los espectros de infrarrojo de los subproductos del arroz, tales como la paja, el tamo y la cascarilla del arroz mostraron bandas características de la celulosa, la lignina y la hemicelulosa. Las imágenes obtenidas de las paredes mostraron una superficie porosa y poros de diferentes diámetros (<1mm). Las paredes usadas en las pruebas de aislante térmico presentaron un adecuado comportamiento, similar al reportado del aserrín, que fue el material de referencia.

El aprovechamiento de los subproductos del arroz ayuda a conservar los recursos naturales, cuidar el planeta y con la esperanza de aumentar el desarrollo del departamento del Huila. Estas paredes se podrían usar como una alternativa de solución para los pobladores de veredas del Huila, que no tengan acceso a la energía eléctrica, por ejemplo, como una forma de conservación de alimentos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. Arnold Romero, de la Universidad Industrial de Santander, quien realizó los estudios de espectroscopia de infrarrojo como parte de una cooperación inter-universitaria. También reconocen el apoyo de la Corporación Universitaria del Huila en la financiación del proyecto.

Referencias

- [1] Duran, E. & Muñoz, O. (2005). [Transformacion de un planeacion estrategica en la arrocera el Dorado de la Ciudad de Bucaramanga](#). Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander.
- [2] Piñeros, Y et al. (2011). [Aplicación de tecnologías para el aprovechamiento de la Cascarilla de arroz](#). Universidad Jorde Tadeo Lozano.
- [3] Sierra, J. (2004). [Alternativas de Aprovechamiento de la Cascarilla de Arroz](#). Trabajo de grado. Universidad de Sucre.
- [4] Moran, J. (2008). [Extraccion de celulosa y obtencion de nanocelulosa a partir de fibra sisal-caracterizacion](#). En 2do Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales. Posadas, Argentina.
- [5] Biología (2010). [Aplicaciones y derivados de la celulosa](#). Online [Feb 2016].
- [6] Aisla Home. [Aislamiento termico y acustico con celulosa](#). Online [Feb 2016].
- [7] Vecinolisto. (2014). [Cuáles son los aislantes termicos para un reforma ecológica?](#) Online [Jan 2016].
- [8] Calderón, F. (2002). [La cascarilla de arroz "Caolinizada" - Una alternativa para mejorar la retención de humedad como sustrato para cultivos hidroponicos](#). Calderón Labs.
- [9] Abril, D., navarro, E. & Abril, A. (2009). [La paja de arroz. Consecuencias de su manejo y alternativas de aprovechamiento](#). *Agronomía* 17(2), pp. 69-79.
- [10] Vargas, L. (2007). [Uso de fibras de papel periodico, cal hidratada y alumbre, en la elaboracion de un material compuesto](#). Tesis Maestría. Universidad de Colima.
- [11] Medrano, S. (2003). [Humedad en maderas](#). La guía Metas 3(2), pp. 1-2.
- [12] Garavito, A. & González, J. (2012). [Evaluacion de la porosidad de muestras de concreto sin refuerzo mediante análisis petrográfico y medidas de velocidad de pulso ultrasonico \(VPU\)](#). Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander.
- [13] Fotocasa. [Las ventajas de apostar por la madera para nuestra vivienda](#). Online [Jan 2016].

6. Evaluación y modelación de las condiciones hidráulicas del tanque de aireación de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Autónoma de Occidente

Javier López G.

Julio Cuaran C.

Javier Holguín G.

Universidad Autónoma de Occidente. Cali, Colombia

1. Introducción

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) generan diversos impactos en la sociedad, los cuales involucran factores sociales, económicos y ambientales, entre otros. Estos sistemas de tratamiento permiten mejorar la calidad de las aguas residuales (ARs) vertidas a los cuerpos hídricos mediante la aplicación de diferentes procesos y operaciones. Por tal motivo, el adecuado uso de este tipo de tecnologías permite la disminución del riesgo sanitario, mejorar la calidad de vida y demás aspectos que están relacionados con la comunidad atendida y el recurso hídrico.

Actualmente, los ingenieros, tratando de entender y representar los procesos fisicoquímicos, biológicos e hidráulicos que se llevan a cabo en el interior de los módulos de las PTARs, hacen uso de la modelación matemática, la cual ha permitido que, en las últimas décadas, se presente un desarrollo constante asociado a la optimización de los sistemas de tratamiento empleados en las PTARs. Este tipo de herramientas emplean conceptos y técnicas esencialmente matemáticas para el análisis de situaciones reales [1], las cuales facilitan comprender y representar el comportamiento real del sistema, teniendo en cuenta los diferentes fenómenos propios de cada uno de los módulos, ya sea en un momento determinado o en cada instante [2].

Tradicionalmente, los modelos matemáticos más usados para representar la hidráulica de reactores son conocidos como modelos de flujo no-ideal (tanques en serie, dispersión y compartimentos) [3]. En el contexto de la evaluación del funcionamiento de las PTARs, estos modelos son importantes porque permiten: 1) evaluar con alto grado de precisión (según la calidad de los datos de entrada) el componente hidráulico de la mayoría de las unidades que conforman una PTAR; 2) definir el tipo de flujo predominante en el reactor; y 3) identificar inconsistencias en estos módulos (cortocircuitos, zonas muertas o de estancamiento, entre otras). Además, proporcionan una oportunidad para examinar configuraciones alternativas de entrada o de salida del flujo en las unidades, lo que permite comprender mejor los procesos internos e identificar posibles problemas con antelación, que se pueden traducir en un rediseño del módulo y una PTAR más eficiente.

Para emplear este tipo de herramientas se requiere realizar un experimento con una sustancia trazadora y su posterior construcción de curvas de distribución de concentraciones, para, finalmente, evaluar el ajuste de los datos observados con las curvas teóricas obtenidas a partir de este tipo de modelos [4]. Dada la importancia de las PTARs en una comunidad, esta investigación se centró en conocer el componente hidráulico de un módulo en particular, el reactor aerobio o tanque de aireación de la PTAR de la Universidad Autónoma de Occidente (UAO). Este reactor es una unidad para la depuración de aguas residuales acondicionado para tratar afluentes de alta y baja carga orgánica. En el interior del sistema se lleva a cabo la transformación de la materia orgánica, presente en el agua residual, por acción de microorganismos aerobios (biomasa) en presencia de oxígeno disuelto y en condiciones de agitación. Es importante mencionar que, siempre y

cuando el afluente permanezca el tiempo adecuado en el interior del reactor y bajo las condiciones adecuadas, se puede lograr una alta eficiencia en la remoción del material orgánico biodegradable [5]. Para evaluar el componente hidráulico se llevó a cabo un experimento con una sustancia trazadora y, a partir de las distribuciones de concentración del trazador en el reactor, se evaluó el ajuste de tres modelos que representan el flujo no-ideal: de dispersión, el de tanques en serie con recirculación y el de compartimentos.

2. Materiales y métodos

Esta investigación se realizó en seis etapas: 1) inyección tipo impulso de una cantidad determinada del trazador a la entrada del tanque de aireación; 2) medición de la concentración de Rodamina WT al 20% a la salida del sistema; 3) construcción de las curvas de distribución de flujos y tiempo de residencia (curva C impulso, curva E teórica); 4) implementación de los modelos de flujo no ideal (modelos de dispersión, tanques en serie y compartimentos); 5) ajuste respectivo de las curvas teóricas y experimentales (curva E, distribución de tiempos de residencia); y 6) evaluación del comportamiento hidráulico del sistema.

2.1 Descripción del sitio de estudio

- *Pozo de bombeo 1.* Dentro del cual se realiza el desbaste o remoción de sólidos gruesos a través de una canastilla en acero, además, se encuentra un sistema de bombeo tipo sumergible y cuchillas en la succión que conduce el agua al tanque de aireación. Aquí es donde coinciden las aguas crudas provenientes de la institución y de la cámara de espuma.
- *Tanque de aireación.* A este tanque llegan las aguas crudas y allí proliferan y se desarrollan bacterias aeróbicas, las cuales realizan un proceso de biodegradación. El oxígeno necesario para la supervivencia de dichas bacterias lo proporciona una turbina, cuyo funcionamiento depende de las necesidades y la cantidad de afluente. En la Tabla 1 se detallan los parámetros de diseño de la unidad de aireación.

Tabla 1. Parámetros de diseño del tanque de aireación de la PTAR UAO

Unidad	Volumen (m ³)	TRH (h)	Caudal (m ³ /h)
Tanque de aireación	177,30	13,31	13,32

- *Tanque de sedimentación.* Las aguas tratadas en el tanque de aireación pasan a través de tabiques de transferencia al tanque de sedimentación, donde los lodos oxidados se recogen en el fondo por un sistema de bombeo y los retorna al tanque de aireación (primera recirculación). Los lodos en exceso son enviados a los lechos de secado. El efluente libre de materias en suspensión es tratado con un sistema dosificador de hipoclorito de sodio para ser enviado al pozo de bombeo 2. Es importante mencionar que este tanque tiene una re-circulación externa, debido a que cuenta con un rebose que, en promedio, tiene un caudal entre un rango de 2 a 4 l/s, relativamente alto en relación con el caudal de diseño de 2,2 l/s del sistema. Este caudal de rebose es conducido del sedimentador a la cámara de espumas, luego se retorna al pozo de bombeo 1 y, finalmente, vuelve a entrar al tanque de aireación en un intervalo de tiempo corto (considerando como referencia el tiempo de retención hidráulico del tanque de aireación y sedimentador).
- *Disposición de lodos.* Los lodos enviados al lecho de secado, formado por capas de arena y grava, son recuperados después de unos días y reutilizados en un sistema de lombricompatje de residuos orgánicos. El agua sobrante retorna al pozo de bombeo 2.

- *Pozo de bombeo 2.* Se recupera el agua en condiciones apropiadas para verter por medio de un sistema de bombeo en la acequia llamada Gochelandia.
- *Unidad de filtración.* Corresponde a un tanque con lecho filtrante en arena y grava para el pulimiento del agua residual que sale del sedimentador. Esta filtración es de forma descendente y en el fondo del tanque existe un falso fondo a través del cual se desaloja el efluente.
- *Unidad de desinfección LUV.* Esta unidad compacta efectúa la desinfección del efluente de filtración con un sistema de luz ultra violeta.
- *Tanque de almacenamiento.* Esta unidad almacena el agua debidamente filtrada y desinfectada para luego ser reutilizada para el riego ornamental en las zonas verdes de la UAO. En la Figura 1 se esquematiza la planta de tratamiento, donde las flechas de color negro indican la dirección del flujo de entrada y salida de las diferentes recirculaciones que afectan al sistema, que denominados como externas.

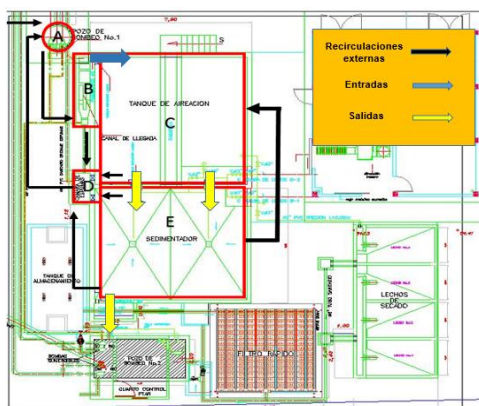


Figura 1. Esquema de la planta de tratamiento de aguas residuales de la UAO

En la figura 2 se observan las unidades de mayor importancia que conforman la PTAR.



Figura 2. Unidades que conforman la PTAR de la UAO

En la Figura 3 se muestra el lugar en el que las unidades recirculan sus caudales.

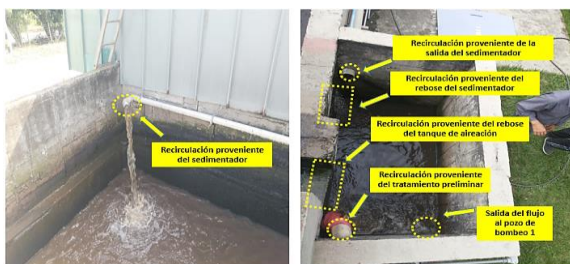


Figura 3. Recirculaciones en la PTAR UAO

2.2 Inyección del trazador y medición

En esta investigación se empleó el equipo portable de medición de Rodamina WT al 20%, CYCLOPS-7 Sumersible Sensors. Este equipo de medición continua fue instalado en el tanque de aireación para el muestreo a escala real para obtener la curva C impulso, que permitió la construcción de la curva E teórica para cada modelo.

2.3 Construcción de los modelos

En los siguientes apartados se describen las consideraciones realizadas para el desarrollo de cada uno de los modelos, teniendo en cuenta las recomendaciones y los supuestos bajo los cuales se realizaron estudios sobre la implementación de modelos de flujo no-ideal, para la modelación de reactores mediante la curva C impulso.

1. Modelo de dispersión

Este modelo se desarrolló a partir de la ecuación (1) y los datos obtenidos del experimento con la sustancia trazadora Rodamina WT al 20% (curva C impulso). Para el modelo se consideró la condición de frontera cerrada (recipiente cerrado), teniendo en cuenta que las condiciones del sistema afectan en gran medida la forma de la curva del trazador, además de la relación entre sus parámetros y el módulo de dispersión [3].

$$E(\theta) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\theta(D/uL)}} \exp\left(-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/uL)}\right) \quad (1)$$

Donde:

$E(\theta)$: Curva de dispersión

θ : Tiempo normalizado (s)

D : Coeficiente de dispersión (m²/s)

u : Velocidad lineal del fluido (m/s)

L : Longitud del reactor (m)

Las consideraciones por las cuales se asume como recipiente cerrado al modelo se debe al flujo de entrada a la unidad de aireación, porque es regulado por un vertedero triangular que llena un volumen determinado y, posteriormente, entra al sistema en un flujo tipo pistón. Adicionalmente, la salida de la unidad presenta un comportamiento similar debido a que el caudal es regulado con una protección metálica, que lo condiciona hacia el flujo pistón. En la Figura 4 se muestra la condición de frontera cerrada.

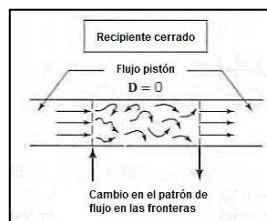


Figura 4. Condición de frontera cerrada

En la Figura 5 se aprecia la condición de recipiente cerrado debido a las condiciones del flujo de entrada y salida.



Figura 5. Condición de frontera caso de estudio

Adicionalmente, para este tipo de condiciones y de acuerdo con lo reportado por [3], se tienen las curvas E características, que asocian su simetría al módulo de dispersión. Cuando este módulo tiende a cero hay una dispersión insignificante, lo que significa que se presenta flujo pistón. Por otra parte, cuando tiende a infinito está en la condición de tanque agitado. En la Figura 6 se muestran la tendencia de las curvas E de un recipiente cerrado y de acuerdo su módulo de dispersión. Se pueden presentar dos casos referentes al módulo de dispersión: cuando es menor y cuando es mayor a 0,01. En el primer caso, como se observa en la Figura 6, para valores pequeños se presentan picos más altos (flujo de tipo pistón), mientras que a medida que el modulo aumenta (mayor o igual a 10) el comportamiento tiende a estabilizarse (tanque agitado). En sistemas con un porcentaje alto de funcionamiento en flujo pistón, el modelo es capaz de representar mejor el comportamiento del sistema.

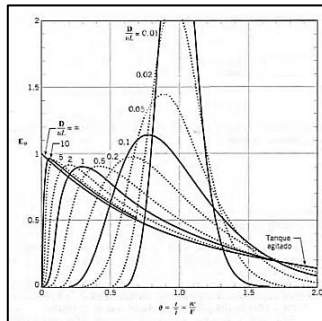


Figura 6. Curva E recipiente cerrado

2. Modelo de tanques en serie con recirculación

En primera instancia y mediante la ecuación (2), se procedió a determinar el número de tanques en serie que componen el modelo, obteniendo un total de 15. También fue necesario conocer el módulo de dispersión porque, a partir de esta variable, se puede determinar el dominio total o parcial de flujo pistón o flujo mezclado al interior del reactor; además, permite tomar consideraciones con el fin de lograr que el modelo represente adecuadamente la tendencia del flujo que se da dentro del reactor.

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{N} \quad (2)$$

Donde:

σ_{θ}^2 : Varianza normalizada (s)

N: Número de tanques en serie

La ecuación (3) que representa el módulo de dispersión y pertenece a un grupo especial de ecuaciones conocidas como trascendentes, que solamente se pueden resolver utilizando métodos numéricos para solución de ecuaciones, como el de Newton Raphson.

$$\sigma_{\theta}^2 = 2 \frac{D}{uL} - 2 \left(\frac{D}{uL} \right)^2 (1 - e^{-uL/D}) \quad (3)$$

Donde:

σ_{θ}^2 : Varianza normalizada (s)

D: Coeficiente dispersión (m²/s)

u: Velocidad lineal del fluido (m/s)

L: Longitud del reactor (m)

De esta manera se obtuvo un valor para el módulo de dispersión de 0,13, lo que indica que el reactor presenta una desviación del flujo pistón. Sin embargo, esta unidad conserva un porcentaje significativo en el sistema respecto a este flujo, por lo que se consideró en del desarrollo de este modelo [6].

Para evaluar esta tendencia se aumentó el número de tanques en serie a 16 y se varió hasta llegar a 1, obteniendo que la variación más adecuada respecto al número de tanques guarda similitud con la curva E, pero sin perder la tendencia característica de la misma. En la Figura 7 se puede apreciar el comportamiento característico de las curvas obtenidas partir de estos modelos.

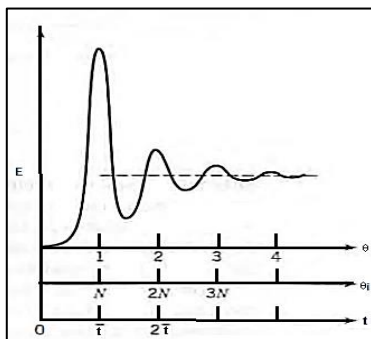


Figura 7. Curva E representativa para tanques en serie con recirculación

De esta manera se determinó que la cantidad máxima permisible de tanques es 11, porque si se toma un valor superior, al momento de implementar la ecuación (4) (que permite la construcción de la curva E teórica del modelo de tanques en serie con recirculación y tiene implícita esta variable) se obtiene un valor indeterminado, lo que hace imposible la construcción de la curva.

$$E_{\theta} = N e^{-N\theta} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(N\theta)^{mN-1}}{(mN-1)!} \quad (4)1$$

Donde:

E_{θ} : Curva tanques en serie con recirculación

N: Numero de tanques

θ : Tiempo normalizado

m: Número de pasadas

Por otro lado, a medida que disminuye el número de tanques en serie ambas curvas (E teórica y experimental) tienden a marcar un comportamiento lineal, lo que para el modelo de tanques en serie no permite representar adecuadamente la unidad de aireación. Adicionalmente, la variable correspondiente al número de pasadas, implícita en la ecuación (4), fue evaluada para determinar la cantidad de veces que debe recircular el flujo por los 11 tanques en serie, considerando un rango entre 1 y 16. El modelo de tanques en serie con recirculación no presentó variación en la curva E teórica cuando el número de pasados se mantuvo dentro del intervalo de 1 a 15, sin embargo, cuando se emplearon valores mayores la ecuación tiende a un valor indeterminado, por lo que finalmente se definió esta variable con un valor de 15, debido a que cualquier valor dentro del rango (1 a 15) no altera significativamente los resultados. En la Figura 8 se muestra el esquema del modelo empleado que representa el sistema, con un número de tanques en serie de 11 y 15 pasadas.

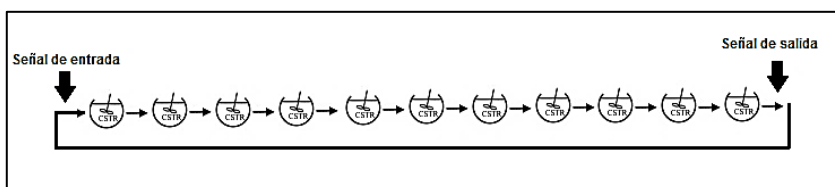


Figura 8. Esquema del modelo de tanques en serie con recirculación

3. Modelo de compartimentos

De acuerdo con Claudel [7] la configuración ideal para la unidad de aireación en este caso se modela mediante dos compartimentos, cada uno conformado por dos reactores idénticos perfectamente mezclados (CSTR). Esta información la confirma Qi [8], para quien este tipo de modelo compartimental o de cascada de CSTR representa bien un sistema de tanque agitado. Estos modelos tienen la restricción de que parten del supuesto de que las líneas de corriente siguen la geometría del sistema, lo que implica que no se consideran zonas de estancamiento, muertas, etc.

Por otra parte, teniendo en cuenta la cantidad de picos que presenta la curva E obtenida a partir del experimento de tipo impulso (ver Figura 11), es necesario considerar que el modelo incluyera un bucle de recirculación interna en cada compartimento. Una vez se obtuvo el esquema del modelo se procedió a replantear el propuesto por [8], de tal manera que se consideren los bucles de recirculación. Posteriormente, se calculó el número de tanques conectados en serie correspondientes a cada compartimento. En la Figura 9 se muestra el diagrama del modelo propuesto por [8] y sus respectivas ecuaciones.

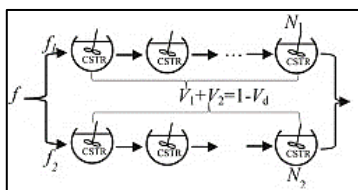


Figura 9. Curva E recipiente cerrado

La distribución del flujo en la entrada y el volumen del reactor se puede, calcular con la ecuación (5), donde f' y V' son la fracción de flujo y de volumen del reactor.

$$\left\{ \begin{array}{l} V = V_1 + V_2; f = f_1 + f_2 \\ \theta_1 = \frac{t}{\tau_1} = \frac{f_1/V_1}{f/V} \cdot \theta; \theta_2 = \frac{t}{\tau_2} = \frac{f_2/V_2}{f/V} \cdot \theta \\ f'_1 = \frac{f_1}{f}; f'_2 = \frac{f_2}{f} \\ V'_1 = \frac{V_1}{f}; V'_2 = \frac{V_2}{f} \end{array} \right. \quad (5)$$

De acuerdo con el balance de masa del trazador la curva $E(\theta)$ de combinación se calcula con la ecuación (6).

$$E(\theta) = \frac{\tau(f_1+f_2)(f_1 C_1(\theta_1)+f_2 C_2(\theta_2))/(f_1+f_2)}{M} = \frac{V f_1}{f M} C_1(\theta_1) + \frac{V f_2}{f M} C_2(\theta_2) \quad (6)$$

La función RTD de los dos flujos en la región se encuentra con la ecuación (7).

$$\left\{ \begin{array}{l} E_1(\theta_1) = \frac{V_1 f}{M f_1} C_1(\theta_1) \\ E_2(\theta_2) = \frac{V_2 f}{M f_2} C_2(\theta_2) \end{array} \right. \quad (7)$$

Sustituyendo $C_1(\theta_1)$ y $C_2(\theta_2)$ en la ecuación (6) y usando la ecuación (7), se reordenan en la ecuación (8).

$$E(\theta) = \frac{(f_1/f)^2}{(V_1/V)} E_1(\theta_1) + \frac{(f_2/f)^2}{(V_2/V)} E_2(\theta_2) \quad (8)$$

Donde:

f: Fracción de flujo (l/s)

V: Fracción de volumen (l)

Cuando cada región o compartimento se considera como un reactor de tanques en serie, el modelo de compartimentos de cascada de CSTR se encuentra con la ecuación (9).

$$E(\theta) = \frac{f_1^2 N^N}{V_1(N-1)!} \left(\frac{f_1}{V_1} \theta\right)^{N-1} e^{-N\left(\frac{f_1}{V_1} \theta\right)} + \frac{f_2^2 N^N}{V_2(N-1)!} \left(\frac{f_2}{V_2} \theta\right)^{N-1} e^{-N\left(\frac{f_2}{V_2} \theta\right)} \quad (9)$$

La ecuación (9) se debe replantear debido a que cada compartimiento tiene un bucle de recirculación, por lo que es necesario considerar la variable correspondiente al número de pasadas (ecuación (4)), de esta manera el modelo propuesto de compartimientos que representa el tanque de aireación se da con la ecuación (10).

$$E(\theta) = N e^{-N\left(\frac{f_1}{V_1} \theta\right)} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{f_1^2 N^N}{V_1(mN-1)!} \left(\frac{f_1}{V_1} \theta\right)^{mN-1} + N e^{-N\left(\frac{f_2}{V_2} \theta\right)} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{f_2^2 N^N}{V_2(mN-1)!} \left(\frac{f_2}{V_2} \theta\right)^{mN-1} \quad (10)$$

Posteriormente, se calcula el número de tanques en serie correspondiente a cada compartimiento, por lo que en primera instancia fue necesario encontrar el número de Peclet ($Pe = 6,6$), que se halló mediante la ecuación (11).

$$Pe = \frac{uL}{D} \quad (11)$$

Luego se determinó el número de tanques como función de este valor [9] mediante la ecuación (12).

$$2(n - 1) = Pe \quad (12)2$$

Donde n representa el número equivalente de tanques completamente mezclados y conectados en serie, que para este caso toma el valor de 4. Adicionalmente y por cuestiones prácticas, se consideró que el número de pasadas también toma este mismo valor, porque en la construcción del modelo de tanques en serie con recirculación un valor de m entre 1 y 15 es prácticamente el mismo y no afecta significativamente al modelo. En la Figura 10 se muestra el esquema del modelo.

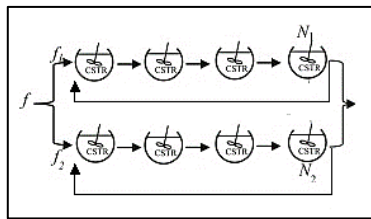


Figura 10. Esquema del modelo de compartimientos

Para las variables de fracción de flujo y fracción de volumen del reactor, se tomaron los valores reportados en la Tabla 2, ya que se trabajó bajo el supuesto de que en el reactor no existen zonas de estancamientos, corto circuitos, agitación turbulenta, etc. Por lo que el flujo de caudal y el volumen total del tanque de aireación se distribuyen de tal manera que, a cada compartimiento, le entre la mitad del caudal y que el volumen corresponde también a la mitad del volumen del tanque de aireación.

Tabla 2. Variables supuestas modelo de compartimientos

Numero de tanques en serie por compartimiento	4
Caudal de entrada al tanque de aireación (l/s)	3,7
Fracción de flujo - compartimiento 1 (f_1) (l/s)	1,85
Fracción de flujo - compartimiento 2 (f_2) (l/s)	1,85
Volumen del tanque de aireación (l)	177300
Fracción de volumen - compartimiento 1 (V_1) (l)	88650
Fracción de volumen - compartimiento 2 (V_2)	88650

Es importante mencionar que a partir de la curva E experimental se puede calcular la varianza, la varianza normalizada, el tiempo medio y el porcentaje de recuperación del trazador, mediante las ecuaciones (13) a (17) [2], respectivamente. El tiempo mediano t_m corresponde al paso del 50% del trazador y se determina mediante la ecuación (13).

$$t_m \cong \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad (13)$$

A partir de la ecuación anterior se normaliza el tiempo, como se muestra en la ecuación (14) [2].

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_m} \quad (14)$$

La varianza se puede calcular con la ecuación (15).

$$\sigma^2 = \frac{\sum (t_i - t_m)^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad (15)$$

La varianza normalizada se calcula con la ecuación (16).

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma^2}{t_m^2} \quad (16)$$

La ecuación (17) permite calcular el porcentaje de recuperación rodamina [10].

$$R = \frac{\int_0^\infty Q(t)C(t)dt}{M} * 100 = \frac{\sum Q(t_i)C(t_i)\Delta t_i}{M} * 100 \quad (17)$$

3. Resultados y discusión

El experimento con la sustancia trazadora se realizó durante los días 24 a 27 de noviembre de 2015, la toma de datos tuvo una duración 307196 segundos (3,6 días), el inicio de la detección de la Rodamina WT al 20% se da en el segundo 29544 (8,20 horas).

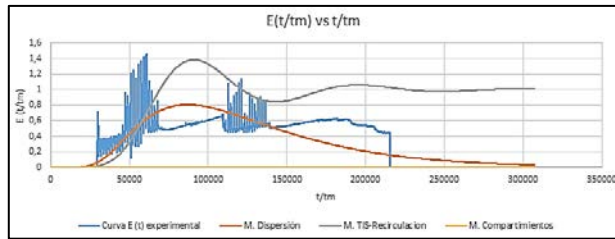


Figura 11. Curva E (t) experimental y teórica, según el modelo de dispersión, tanques en serie con recirculación y compartimentos

A partir de la curva E (t) se determinaron diferentes parámetros, tales como el tiempo medio (1,15 días), la varianza (2595931225,11), la varianza normalizada (0,26) y el porcentaje de recuperación del trazador (70,9%). Cabe resaltar que se modeló el comportamiento del reactor partiendo del supuesto de que, la cantidad de Rodamina WT al 20% recuperada, permitía una adecuada implementación de los modelos de flujo no-ideal, teniendo en cuenta que solamente se muestreó una salida de la unidad (Figura 12, salida 1), este porcentaje de recuperación de trazador es próximo al recomendado por la literatura revisada en esta investigación.



Figura 12. Punto de medición de la sustancia trazadora (salida 1)

3.1 Modelo de dispersión

Se obtuvo un valor de 0,73 para el coeficiente de dispersión axial (D), lo que indica que predomina el flujo pistón, de acuerdo con consideraciones reportadas por Levelspeel [3] ($D=0$); sin embargo, si se contrasta este resultado con módulo de dispersión ($D/uL= 0.13$), indica que se está presentando una desviación grande respecto del flujo pistón. Este comportamiento se explica porque al coeficiente de dispersión tiene un valor próximo a (1) y no igual a (0) y, según la literatura, cuando se presentan valores pequeños en esta variable el comportamiento del modelo tiene una tendencia hacia la dispersión lenta [3], por lo que no se descarta la presencia de zonas de corto circuito.

Esta situación se corrobora mediante la ecuación (11), que permitió calcular un número de Peclet (Pe) con valor de 6,2; Además, cuando este valor es mayor a 1 se puede establecer que se presenta transporte de masa en el sistema de tipo advectivo [11]. Un valor similar se identificó en los estudios reportados por Laurent [10] en la modelación del humedal Wahlbach con un número de Peclet (Pe) de 7,9, donde predominaba el transporte por advección. La cercanía entre los valores en el número de Peclet en los estudios anteriores se debe a que ambos sistemas tienen velocidades de salida del flujo relativamente altas. En el caso del humedal, se debe a que no se presentan obstrucciones en la trayectoria de sus partículas, lo que les permite viajar libremente a través de la unidad; en el caso del aireador se presenta debido a la fuerza ejercida por la turbina para generar la mezcla completa.

Otro factor que puede afectar este comportamiento es el aumento de caudal relacionado con la sobrecarga poblacional en el sistema, lo que puede influir en las zonas de corto circuito, en la disminución del TRH y en una mayor salida en el flujo. Debido a estas situaciones se puede encontrar que la velocidad en el sistema sea relativamente alta, lo que genera que el número de Peclet presente ese valor. Por otra parte, debido a las condiciones de entrada y salida del sistema, y partiendo de que el tanque de aireación funciona como un recipiente cerrado, la curva E obtenida es asimétrica, lo cual concuerda con una de las posibles tendencias para este tipo de condiciones de frontera (Figura 6).

Como se observa en la Figura 11, la superposición del modelo de dispersión y la curva experimental presenta un buen ajuste, que se corrobora teniendo en cuenta que el coeficiente de correlación presentó un 77% y una representatividad de los datos del 88%, evidenciando la buena proximidad y tendencia de la curva E teórica generada a partir del modelo de dispersión y la curva $E(t)$ experimental. Finalmente, es importante aclarar que, a pesar del buen ajuste obtenido entre el modelo y el reactor, en la literatura revisada no se encontró que se empleara en algún caso de estudio, o que el modelo de dispersión para representar reactores cuya curva C impulso tuviera múltiples picos, característicos de sistemas que presentan recirculaciones de flujo, por lo que existe un grado de incertidumbre en la veracidad de los resultados obtenidos a partir de este modelo.

3.2 Modelo de tanques en serie con recirculación

A partir de la ecuación (4) se construyó la curva $E(\theta)$ teórica del modelo de tanques en serie con recirculación y se procedió a analizar el ajuste obtenido de esta curva respecto a la curva $E(t)$ experimental. En la Figura 11 se puede apreciar que el modelo de tanques en serie con recirculación no se ajusta al tanque de aireación, porque a pesar de tener cierto grado de proximidad al inicio de las curvas, la curva $E(t)$ experimental y la E teórica entre los tiempos ($0 < \text{tiempo} < 69000$), posteriormente esta última pierde la tendencia alejándose completamente del comportamiento descrito. Lo anterior es coherente de acuerdo a que el resultado obtenido con el coeficiente de correlación presenta un valor

del 29% y una representatividad de los datos del 53%, lo que se puede explicar porque ambas curvas tienden a seguir, en determinados momentos, el mismo comportamiento.

Por otro lado, si se disminuye el número de tanques en serie que conforman el modelo ($N= 15$), tratando de reducir la tendencia de representar un flujo pistón y más a representar una mezcla completa, se obtiene que las curvas tienden a ser lineales e, incluso, el modelo se ajusta menos con el sistema, tal como se evidencia en el reporte de Alvarado [11], quien, mediante un modelo de tanques en serie con recirculación, contrastó la tendencia de este cuando lo conforman $N= 100$ y $N=25$. Teniendo en cuenta que el tanque de aireación es un sistema complejo de modelar, debido a las diversas recirculaciones externas del flujo a través de él, las cuales reflejan una curva C impulso con múltiples picos, en este punto es importante mencionar que, según Laurent [10], la modelación clásica de tanques en serie con recirculación podría ser insuficiente para describir hidrodinámicas complejas. Por lo tanto, se evidencia que el sistema estudiado en esta investigación tiene un grado de complejidad que no se puede abordar por el modelo de tanques en serie con recirculación, porque no presenta un buen ajuste.

3.3 Modelo de compartimientos

A partir de la ecuación (10) se construyó la curva $E(\theta)$ teórica del modelo de compartimientos y se procedió a analizar el ajuste obtenido de esta curva respecto a la curva $E(t)$ experimental. En la Figura 13 se muestra la tendencia descrita por este modelo.



Figura 13. Curva E teórica modelo de compartimientos

De la Figura 13 se puede realizar una observación relacionada con la forma o tendencia de la curva $E(\theta)$ teórica de este modelo, porque debería tener una forma similar a la curva $E(t)$ sin embargo, esta similitud no se presenta, lo que demuestra que ya sea en la parte estructural o en la paramétrica del modelo, se tienen valores asociados inapropiados, debido a que las herramientas no permiten que se determinen adecuadamente, por ende, el ajuste entre el modelo y el reactor es nulo. Otra observación hace referencia a la poca similitud entre el comportamiento de las curvas $E(\theta)$ teórica del modelo y la $E(t)$ experimental, debido a que en el rango que describe la tendencia del sistema (0 a $1,8e-10$ y 0 a $1,5$) respectivamente, las curvas siguen trayectorias totalmente diferentes, lo cual se corroborado mediante el coeficiente de correlación que presenta un valor negativo de 61% y la indeterminación de la representación de los datos por el modelo.

Estos modelos son capaces de representar adecuadamente este tipo de reactores siempre y cuando se tenga un correcto análisis de la curva RTD e información acerca del sistema, tales como variables referentes al campo de velocidad, líneas de corriente, etc. Sin embargo, solamente se obtendrían a través del análisis del movimiento de la turbina, ya que en función de la agitación provocada por este elemento se determina este tipo de variables fundamentales, pero solamente pueden ser calculadas mediante simulaciones a través de potentes herramientas.

Por lo tanto, los supuestos bajo los cuales se desarrolló el modelo de compartimientos en este estudio, en los que se consideraba que las líneas de corriente seguían la geometría

del sistema y que no se presentaba agitación turbulenta del flujo, no fueron los más adecuados para representar las condiciones del tanque de aireación, porque el sistema actualmente opera con sobrecarga y se presentan cortocircuitos y zonas muertas, afectando variables como la fracción de flujo y fracción de volumen (ecuación (36)), que requieren un mayor y más complejo análisis para su determinación.

Un caso de determinación adecuada de supuestos es el reportado por Qi [8] para el estudio de la modelación hidráulico de un filtro de arena, en el que se calcularon las variables fracción de flujo y fracción con un valor de 0,85 y 0,75 respectivamente y mediante el modelo de cascadas de CSTR, logrando una buena modelación con el ajuste de los datos del experimento con trazadores. A pesar que el modelo de compartimientos está en la capacidad de representar tanto la unidad filtro de arena como el tanque de aireación, es fundamental la implementación de la técnica Computacional Fluid Dynamics (CFD) para la determinación del campo de flujo y, posteriormente, los valores para la fracción de flujo y volumen, obteniendo una representación correcta del caso de estudio.

3.4 Consideraciones finales de los modelos de flujo no ideal

Es importante mencionar que el tanque de aireación es un sistema complejo para modelar mediante un experimento con trazadores, porque, como lo demuestra la literatura consultada, diferentes sistemas fueron modelados satisfactoriamente por diversos investigadores mediante modelos de flujo no-ideal, considerando siempre que la sustancia trazadora entra y sale una sola vez del sistema. Sin embargo, para esta investigación el tanque de aireación de la UAO se afecta por múltiples recirculaciones externas que, evidentemente, alteran la curva C impulso incrementando la complejidad del sistema, lo que no permite que los modelos de flujo no-ideal representen la hidráulica de la unidad.

De acuerdo con esto, Bodin [12] reporta que la tendencia de las curvas C impulso, cuando presentan picos característicos de recirculación, tienden a descender hasta llegar al nivel base de detección de la sustancia trazadora, pero, en este caso, las concentraciones descienden y posteriormente aumentan, como se aprecia en la Figura 7, donde para el segundo 29000 al 47000 descienden y en el segundo 47000 al 77000 asciende nuevamente. Es importante mencionar que este tipo de comportamiento no se presentó en ninguno de los sistemas modelados en los casos de estudio que fueron consultados.

Es por eso que la tendencia de la curva C impulso permite determinar el grado de complejidad del sistema a evaluar y, de esta forma, también ayuda a definir de qué manera se debe abordar la modelación del reactor. En la revisión se encontraron diferentes casos, como el reportado por Alvarado [11], donde en función de la curva C impulso el sistema modelado requirió de herramientas como la CFD para representarlo adecuadamente, sin embargo, casos como el de Molina [2] solamente requirieron dos reactores a escala piloto mediante la modelación clásica con el modelo de tanques en serie a representar.

De acuerdo con esto, cuando se quiere modelar mediante una prueba con trazadores hidrodinámicos de sistemas complejos, como la estudiada en esta investigación, se puede recurrir a diferentes métodos: como el reportado por Janex [13], Stamou [14] o Qi [8], quienes implementaron herramientas computacionales (CFD) potentes y eficientes y obtuvieron resultados satisfactorios, pero que requieren cierto conocimiento y experiencia por parte del investigador empleando estos programas.

La segunda, tal como lo reporta Makinia [15], consiste en hacer del sistema complejo uno más simple cerrando las recirculaciones externas. Sin embargo, esto puede afectar significativamente el patrón del comportamiento del sistema evaluado, por lo que no se

pueden aplicar en todos los casos, como en esta investigación, ya que no era posible parar las recirculaciones externas del sistema, debido a que en el momento en que se realizó la inyección la institución se encontraba en periodo académico, lo que afectaría significativamente el funcionamiento del tren de tratamiento y por ende la calidad del efluente. De esta manera, se puede afirmar que, tanto el modelo de tanques en serie con recirculación como el de compartimientos, deben ser abordados mediante la CFD.

A pesar que no se detuvieron las recirculaciones y que no se implementó CFD, el modelo de dispersión fue en teoría el que mejor representó el comportamiento hidráulico del reactor, porque se pudo determinar que existe cierta desviación del flujo de tipo pistón en la unidad, además de que el transporte de masa se debe a la advección.

4. Conclusiones

Esta investigación permitió evaluar el comportamiento hidráulico del tanque de aireación de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Autónoma de Occidente, mediante la evaluación de modelos matemáticos estocásticos considerando modelos hidráulicos en reactores de flujo no-ideal y experimentos con una sustancia trazadora. Se evaluaron tres modelos: de dispersión, tanques en serie con recirculación y el de compartimientos. A pesar de que el ajuste de los tres modelos evaluados a los datos observados del experimento con trazadores fue, en general, bajo, el modelo de dispersión presentó el mayor ajuste debido a que la unidad presenta una variación desde flujo pistón hasta tanque agitado típica de este modelo, de acuerdo con los valores obtenidos a partir del coeficiente de dispersión axial, el módulo de dispersión y el número de Peclet.

Mediante el experimento de tipo impulso con la sustancia trazadora Rodamina WT al 20%, en el tanque de aireación se obtuvo una curva C impulso poco común, muy diferente a la reportada en la literatura para modelos de reactores de flujo no-ideales. Este comportamiento se debe a que el reactor no tiene una distribución habitual de flujos, una entrada y una salida, como generalmente se plantea en la literatura. Por el contrario, el tanque de aireación evaluado presenta múltiples recirculaciones externas de agua residual, lodo del sedimentador secundario y los reboses de esta unidad, lo que afecta la tendencia de la curva C impulso, limitando la representatividad de los modelos tradicionales de flujo no-ideal.

De acuerdo con la literatura consultada, en este tipo de estudios se recomienda suspender las recirculaciones externas porque afectan el sistema, como se evidenció en el análisis hidráulico de la unidad de aireación. Sin embargo, estas configuraciones de recirculación en el tanque de aireación no se pudieron alterar debido a que:

1. La carga que el tren de tratamiento del agua residual en la PTAR presenta actualmente, por lo que requiere que funcione continuamente la recirculación del ARD y no afectar el funcionamiento del sistema.
2. La representatividad del sistema, porque al suspender la recirculación en el reactor se generarían cambios en el flujo de agua al interior de la unidad, ocasionando una incorrecta modelación del comportamiento real del sistema. Por lo tanto, era necesario trabajar con las condiciones normales de funcionamiento del reactor, a pesar de que esto vuelve al sistema muy complejo de modelar.

La limitación de la representatividad de los modelos tradicionales de flujo no-ideal, para evaluar el comportamiento hidráulico en un sistema complejo conformado por un reactor con múltiples recirculaciones, hace necesario el desarrollo de nuevas investigaciones que permitan plantear nuevos parámetros en estos modelos tradicionales

y validar los nuevos supuestos considerados para el desarrollo de este tipo de modelos. Como alternativa al uso de modelos tradicionales de flujo no-ideal modificados, se planea el uso de herramientas computacionales tales como Computacional Fluid Dynamics (CFD).

La complejidad del sistema se evidencia en la curva C impulso, porque modelos como los de tanques en serie con recirculación y comportamientos son los que mejor representan este tipo de sistemas, según la literatura. Sin embargo, no pudieron representar la hidráulica de la unidad debido a que se requieren herramientas como CFD para lograr una apropiada determinación de las variables o supuestos para la modelación.

El modelo de dispersión tuvo un buen ajuste a pesar que en la literatura consultada no se reporta su implementación para curvas C impulso con múltiples picos, por lo que se debe verificar si el grado de dispersión y desviación del flujo pistón en el reactor corresponde efectivamente al comportamiento de la unidad, mediante el contraste de estudio con herramientas computacionales como CFD.

Es importante mencionar que el TRH obtenido para el tanque de aireación mediante el experimento con trazadores (27,6 horas), está dentro del rango estimado para los sistemas con aireación extendida (15 a 36 horas); sin embargo, debido a las recirculaciones externas la sustancia trazadora permanece mucho más tiempo en la unidad, por lo que el TRH real del aireador debe ser menor al valor reportado en esta investigación.

Referencias

- [1] Nagle, K., Saff, E. & Snider, A. (2005). [Ecuaciones diferenciales y problemas con valores en la frontera](#). México: Pearson.
- [2] Sánchez, J. & Gallo, S. (2009). [Evaluación del comportamiento hidráulico de un reactor aerobio y un reactor anaerobio, en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de pequeña escala](#). Avance de los recursos hidráulicos. Avances en recursos hidráulicos 20, pp. 65-80.
- [3] Levenspiel, O. (2004). [Ingeniería de las reacciones químicas](#). México: Limusa.
- [4] Association, A. W (2010). Sixth Edition Water quality & treatment a handbook on drinking water, pp 237-245.
- [5] Osdemir, S. et al. (2014). [Effect of extended aeration on the fate of particulate components in sludge stabilization](#). Bioresource Technology 174, pp. 88-94.
- [6] Sheridan, C., Glasser, D. & Hidebrandt, D. (2014). [Estimating rate constants of contaminant removal in constructed wetlands treating winery effluent: A comparison of three different methods](#). Process Safety and Environmental Protection 92(6), pp 903-916.
- [7] Claudel, S. et al. (2013). [Application of the possibility theory to the compartment modelling of flow pattern in industrial processes](#). Chemical Engineering Science 58, pp. 4005-4016.
- [8] Qi, W. et al (2013). [Hydraulic analysis of an upflow sand filter: Tracer experiments, mathematical model and CFD computation](#). Chemical Engineering Science 104, pp. 460-470.
- [9] Alvarado, A. et al. (2012). [A compartmental model to describe hydraulics in a full-scale waste stabilization pond](#). Water Research 46(2), pp. 521-530.
- [10] Laurent, J., et al. (2015). [Systemic models of full-scale Surface Flow Treatment Wetlands: Determination by application of fluorescent tracers](#). Chemical Engineering Journal 264, pp. 389-398.
- [11] Alvarado, A. et al. (2013). [CFD study to determine the optimal configuration of aerators in a full-scale waste stabilization pond](#). Water Research 47(13), pp. 4528-4537.
- [12] Bodin, H., et al. (2012). [Tracer behaviour and analysis of hydraulics in experimental free water surface wetlands](#). Ecological Engineering 49, pp. 201-211.
- [13] Janex, M. et al. (1998). [Impact of water quality and reactor hydrodynamics on wastewater disinfection by UV, use of CFD modeling for performance optimization](#). Water Science and Tech. 38(6), pp. 71-77.
- [14] Stamou, A. (2008). [Improving the hydraulic efficiency of water process tanks using CFD models](#). Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 47(8), pp. 1179-1189
- [15] Makinia, J. & Wells, S. (2005). [Evaluation of empirical formulae for estimation of the longitudinal dispersion in activated sludge reactors](#). Water Research 39(8), pp.1533-1542.

7. Integración Universidad-Territorio: Propuesta de un modelo de universidad involucrada basado en diseño participativo para una Facultad de Ingeniería

José L. Giraldo¹

José Aguilar Z.²

Alba L. Betancur³

¹Universidad Autónoma Latinoamericana. Medellín, Colombia

²Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

³Asociación IngeniaSER. Medellín, Colombia

1. Introducción

El papel de la universidad en la sociedad ha sido objeto de reflexión constante y, sin duda, las universidades son una de las principales fuentes de conocimiento con que cuenta la humanidad. Además, la formación impartida en ellas permite transmitir el conocimiento a las nuevas generaciones de profesionales, que, a su vez, al ingresar a la actividad laboral lo transmiten a los sectores de la sociedad donde ejercen su profesión. En un ejercicio reflexivo, la investigación que nace de las universidades también se ha ocupado de analizar su rol en la economía, la ciencia, la inclusión social, el avance tecnológico, la evolución de sus propias actividades y los aportes que estas le hacen a la sociedad.

Este capítulo se centra sobre una parte fundamental de la universidad: las facultades de ingeniería como importantes promotoras del desarrollo tecnológico. Por lo tanto, es de anotar que, en el contenido, las referencias a universidad tienen su foco en las facultades de ingeniería y en su proyección o integración con el resto de la sociedad.

Hay importantes desarrollos teóricos, como el modelo de la triple hélice propuesto por Etzkowitz y Leydesdorff [1], acerca de la integración de la universidad con la industria y el estado. Entre los mecanismos para implementar esta integración se identifican los comités Universidad-Empresa-Estado, donde grandes empresas y grupos económicos en colaboración con las universidades más importantes de las regiones y el sector gobierno, definen lineamientos para las universidades que involucran la investigación. Así, la investigación se orienta hacia las áreas definidas como prioritarias para el desarrollo de las regiones, sin embargo, dichas prioridades pueden no ser del todo ajenas a los intereses de los participantes. Por lo tanto, las pequeñas unidades productivas y comerciales pueden quedar excluidas de los beneficios del desarrollo tecnológico en la región, y las universidades de tamaño mediano se pueden ver obligadas a trabajar en líneas de interés para las regiones, pero no necesariamente importantes para sus territorios adyacentes.

Otra reciente aproximación teórica se plantea desde los procesos de apalancamiento de proyectos cooperativos, bajo la denominación de Institución Ancla [2, 3]. Este término se utiliza para hacer referencia a las instituciones que, por su tamaño e importancia, pueden, mediante los servicios y productos que ofrecen o los suministros que adquieren, generar o facilitar procesos de inclusión, desarrollo y apalancamiento para emprendimientos y empresas ubicadas en las regiones donde actúan [2, 3]. Las instituciones Ancla le aportan al desarrollo social y económico de las regiones, a la vez que se benefician de nuevas fuentes de suministro y de los ingresos provenientes de los nuevos productos y servicios demandados en el territorio. Entre las instituciones Ancla se incluye a Universidades, empresas de servicios públicos y hospitales. Así, desde esta aproximación teórica, la universidad también juega un rol protagónico en el desarrollo local.

Entre los diferentes modelos que se presentan en este capítulo, el modelo de la *universidad involucrada* cobra especial interés, pero, también plantea importantes retos. Este modelo genera la necesidad de establecer un diálogo de doble vía entre la universidad y los actores presentes en el territorio adyacente. A partir de ahí se pueden identificar las posibilidades y necesidades de adaptación de las universidades medianas, para que se involucren y contribuyan en la solución de las problemáticas identificadas. Sin embargo, en la literatura revisada para este trabajo no se encontró suficiente evidencia empírica sobre este modelo. Por un lado, esto limita las posibilidades de comprensión de los mecanismos de integración [4, 5] y, por otro lado, abre posibilidades para procesos de investigación, que aporten más evidencia y contribuyan a avanzar en el desarrollo de las estructuras conceptuales y metodológicas de esta área de conocimiento.

Teniendo en cuenta que aún se requiere explorar las posibilidades de integración de la universidad con su territorio adyacente; que el territorio adyacente a la Universidad Autónoma Latinoamericana presenta alto dinamismo económico, caracterizado por la presencia de pequeñas y medianas unidades productivas y comerciales; y que investigadores de esta universidad han hecho una caracterización económica de este territorio [6], se concluye que todo esto genera una situación que sirve de punto de partida para continuar explorando posibilidades de integración universidad-territorio, además de la identificación del tipo de metodologías que se pueden emplear para este fin. En el contexto de este trabajo se plantea una aproximación para investigar sobre las posibilidades de adaptación de una facultad de ingeniería a las necesidades de su territorio adyacente, de tal forma que pueda integrarse y contribuir a generar desarrollo y apalancar la competitividad de las pequeñas y medianas unidades productivas y comerciales ubicadas allí.

Para el desarrollo de la investigación se propone el uso de técnicas de diseño participativo, debido a que permiten la integración de diferentes grupos de interés en actividades de diseño de soluciones para sus propias problemáticas y necesidades. En el diseño participativo se escogen, de un conjunto amplio de técnicas disponibles, las más adecuadas para las actividades a realizar. Cada selección específica de técnicas de diseño genera nuevos procesos y métodos, además, su modificación y aplicación de acuerdo a situaciones específicas da lugar a nuevas técnicas, situación que es objeto de continua investigación y generación de conocimiento. Se plantea examinar las posibilidades de emplear el diseño participativo para explorar las capacidades y necesidades del territorio adyacente a la universidad. Luego se podrá avanzar en la identificación de problemas, conceptualizar, prototipar y proponer soluciones para las pequeñas y medianas unidades productivas y comerciales, además de identificar oportunidades y aportes a la solución de las problemáticas desde otras instituciones Ancla que tienen presencia en el territorio.

A continuación, se presentan algunas perspectivas y modelos teóricos sobre los roles de la universidad en las sociedades; se identifican vacíos y oportunidades para abordar desde la perspectiva de investigación, desarrollo e innovación; se muestran opciones específicas de abordaje de la problemática desde la óptica del diseño participativo; se plantea una propuesta metodológica para abordar el desarrollo de un modelo de universidad involucrada y, finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo.

2. Perspectivas y modelos identificados en la literatura

Desde la perspectiva de la economía del conocimiento, Cooke y Leydesdorff [7] presentan una exploración del conocimiento como factor de producción, de las regiones como proveedoras o no de sistemas relevantes para el desarrollo económico basado en

conocimiento, y sobre el concepto de la ventaja construida. Indican que, en la economía basada en conocimiento, se reconoce que éste constituye una parte muy importante del capital, además, se visualiza como la herramienta más poderosa en los procesos de producción. También muestran que se ha identificado una relación directa entre el crecimiento del conocimiento al interior de las organizaciones y su crecimiento total, observando que el crecimiento de las organizaciones se ve limitado por el crecimiento en conocimiento.

Cuando estos autores se refieren a una economía basada en conocimiento adicionan dos aspectos estructurales, planteados desde una perspectiva de sistemas: 1) el de las trayectorias tecnológicas y 2) el de la gobernabilidad o naturaleza política. La perspectiva sistémica se genera al incorporar diversas re combinaciones dinámicas: 1) las económicas del mercado, 2) las de la innovación basada en conocimiento, y 3) las de gobierno. Estas dinámicas se representan en el modelo de la triple hélice de las relaciones Universidad-Industria-Gobierno [7].

Sobre las regiones como proveedoras o no proveedoras de sistemas de referencia relevantes para un desarrollo económico basado en conocimiento, Cooke y Leydesdorff identifican que, bajo las condiciones de una economía basada en conocimiento, las hipótesis espaciales giran en torno a distintas visiones sobre la relación entre el desarrollo centralizado de una ciudad importante, con respecto a ciudades ubicadas en las cercanías. Muestran diferentes planteamientos sobre cuáles y en qué condiciones se generan beneficios o detrimentos, crecimiento o decrecimiento económico, entre estos centros urbanos como resultado de la explotación, distribución o concentración del conocimiento. Identifican en la literatura aspectos contradictorios tales como el hecho, al parecer claro, que en la economía del conocimiento la inclusión y exclusión social ya no están tan firmemente acoplados a la posición social, como pasaba en la economía industrial, y, sin embargo, se ha visto como la brecha entre naciones ricas y pobres se acelera por el *capitalismo del conocimiento*, es decir, que la intensidad del conocimiento también está llevando a una creciente brecha entre las sociedades [7, 8].

Con respecto a las ventajas que el conocimiento permite construir, se indica en [7] que, el concepto de la ventaja comparativa, explica el bienestar económico en términos de la disponibilidad inicial de recursos en la región y de su comercialización entre regiones y naciones. Mientras que la ventaja competitiva se basa en el comercio entre industrias, además de condiciones de demanda muy localizadas que generan la competitividad del respectivo mercado. Finalmente, plantean la ventaja construida como resultado de procesos de metamorfosis de la organización industrial, generados a partir de transformaciones en las relaciones entre la industria, la universidad y el estado; y de una perspectiva estratégica de la regulación de uso práctico para los diferentes interesados, que generan crecimiento de la actividad económica. En el modelo de la triple hélice [1], la ventaja construida se conceptualiza como el valor adicional de un conjunto de relaciones entre los tres componentes de la economía basada en conocimiento: el sector de producción de conocimiento (ciencia), el mercado y los gobiernos [7].

El proceso que lleva a las universidades a convertirse en actores fundamentales del desarrollo económico pasa por varias etapas. Por ejemplo, Youtie y Shapira [9] muestran la evolución de tres modelos de universidad: 1) modelo tradicional propio de la universidad medieval, donde actúa como una bodega o acumulador de conocimiento ubicada en una posición de élite alejada del resto de la sociedad; 2) modelo de fábrica de conocimiento, donde la universidad se convierte en un desarrollador de tecnologías para la industria, con lo que apalanca y contribuye al desarrollo de la revolución industrial; y

3) un modelo en desarrollo, conocido como modelo de distribución de conocimiento, en el que la universidad está integrada a regiones inteligentes donde promueve la creación de nuevas capacidades, innovaciones y desarrollos, especialmente en el ámbito local dentro de un contexto post industrial [9].

Además, Youtie y Shapira identifican que la conversión de las universidades en distribuidores de conocimiento implica el surgimiento de un nuevo liderazgo organizacional, nuevos programas y nuevas formas organizacionales, además de la ampliación de las fronteras de roles que median entre lo educacional, el emprendimiento, el capital de riesgo y las esferas públicas e industriales. En el modelo de distribución de conocimiento, las universidades están integradas en los sistemas de innovación, buscan promover activamente interacciones para enlazar la investigación con la aplicación y la comercialización y asumen el rol de acelerador del desarrollo económico y social. En el modelo, los procesos de adquisición, difusión e implementación del conocimiento forman parte integral del núcleo de las nuevas actividades de la universidad [9].

Además, los autores identifican que las universidades pueden tener múltiples impactos en sus economías regionales a través de la investigación, la creación de conocimiento, la educación y la formación de capital humano, la transferencia de *know how* para mejorar la industria existente, el desarrollo de innovación tecnológica para comercializar, el impulso de emprendimientos, el desarrollo de infraestructura, la mejora en los flujos de conocimiento y el liderazgo para enfrentar los problemas regionales. Así crean un ambiente regional favorable para el desarrollo económico y el bienestar social [9].

Por su parte, Etzkowitz y Leydesdorff [1] hacen también un recuento de la evolución de las universidades con respecto a sus modelos de innovación. Plantean que los modelos lineales de innovación existentes se deben cambiar por modelos que permitan obtener, del proceso de creación de conocimiento, ganancias y aportes en el corto plazo, mientras se construye en el largo plazo. Para esto, plantean un modelo de innovación en espiral que permite recoger ambos tipos de contribuciones. Opinan que se requiere, además, capacidades de regulación de la ciencia y tecnología por parte del estado, las universidades y la industria, para crear interdependencias dinámicas efectivas y para promover y subsidiar las alianzas estratégicas entre universidades y empresas.

Una aproximación que construye, desde lo que se considera el tercer rol de la universidad, la presentan Tripp, Sinozic y Smith [5]. Estos autores indican que el tercer rol de la universidad es la contribución al desarrollo regional, mediante la activa comercialización del conocimiento en emprendimientos, patentes y licenciamientos. Afirman que estas actividades son estimuladas por la creación de nuevos incentivos y estructuras de reconocimiento a la comercialización para los científicos, además de la creación de una cultura de negocios y mecanismos de transferencia, tal como las oficinas de transferencia tecnológica.

En [10] se plantea que no solamente las universidades ejercen influencia en el desarrollo de las regiones donde están ubicadas, también las características de las regiones ejercen influencia sobre las características, actividades y desempeño de las universidades. Así, en el modelo de la universidad involucrada, se contempla su adaptación a las necesidades regionales para generar un desarrollo localizado, más allá del rol de generador de conocimiento [5, 11]. Para los autores, en este modelo la universidad enfoca sus actividades hacia la industria y la sociedad, ofrece programas focalizados en la región, vincula estudiantes de la localidad, retiene a sus graduados, integra las necesidades regionales en sus prioridades, coordina redes regionales, asesora política, se involucra con las empresas y brinda asistencia y soporte en investigación.

La evidencia empírica del modelo de la universidad involucrada es escasa, lo que ha limitado la comprensión efectiva de los mecanismos de integración y de coordinación de las diferentes funciones y misiones [4, 5]. Por lo tanto, los elementos que definen el involucramiento de las universidades con sus regiones continúa siendo objeto de investigación. Por ejemplo, Rytkönen [12] busca identificar modelos de negocios y capas de facilitación de los proyectos de desarrollo espacial, entre ellas las capas social, física y virtual. Encuentra que el impacto de la facilitación social es capaz de generar nuevas oportunidades de negocios para las universidades y concluye que cada caso es altamente dependiente del contexto, con modelos de negocios en constante evolución, lo que implica la necesidad de estudios en detalle de cada situación [12].

De acuerdo con el diccionario de la RAE, *integrar* hace referencia a *hacer que alguien o algo pase a formar parte de un todo* [13], mientras que *involucrar* es *complicar a alguien en un asunto, comprometiéndolo en él* [14]. A partir de estas definiciones y lo que se expresa en [5] y [11], *integrarse*, en este trabajo, implicará entrar a formar parte de un todo, manteniendo interacciones con todas o algunas de sus partes. Mientras que involucrarse implicará estar comprometido con el desempeño de todas o algunas partes del todo, con las que mantiene interacciones bidireccionales que pueden llevar a su propia transformación para mejorar dicho desempeño. Los términos se ilustran en la Figura 1.

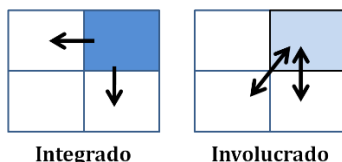


Figura 1. Integrado vs Involucrado

Otros planteamientos consideran a las universidades como instituciones Ancla, es decir, entidades asentadas en un lugar, firmemente enraizadas en el territorio, que pueden incluir universidades, empresas de servicios públicos, hospitales, instituciones culturales, fundaciones comunitarias y gobiernos municipales [2, 3]. Normalmente, son instituciones sin ánimo de lucro, debido a que el ánimo de lucro se puede relocalizar fácilmente en busca de costos laborales más bajos, mayores subsidios o regulaciones ambientales más laxas, por lo tanto, las instituciones Ancla pueden tener más interés en contribuir al desarrollo de sus comunidades [2]. Además, pueden tener un rol integral en la cultura local, proveer empleo, generar poder de compra y estabilidad en el mercado de bienes raíces. Por otro lado, están en buena posición para integrarse con grupos de interés locales con el objetivo de promover actividades de valor mutuo [15].

Cantor, Englot y Higgins [16] proponen que un punto de partida para que el trabajo de las instituciones Ancla sea sustentable, implica crear coaliciones desde el interior y el exterior de la academia para superar el flujo, en una sola vía, de capital intelectual y transferencia de tecnología generados de forma independiente dentro de sus instalaciones. Cuando estas instituciones construyen coaliciones, movilizan talento multidisciplinar, multisectorial, empoderan las voces locales y proveen la plataforma para desarrollar elementos claves de la prosperidad, tales como mejores logros académicos, un medio ambiente sostenible y oportunidades económicas [16].

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los modelos descritos, donde se puede apreciar que la universidad ha evolucionado de una posición alejada de la sociedad, en el modelo de universidad tradicional y acumuladora de conocimiento, pasando por el apalancamiento de la revolución industrial y actuando como fábrica de conocimiento, hasta llegar a una activa participación en la generación de dinámicas en conjunto con

gobiernos y empresas, para crear valor en una economía del conocimiento. La universidad pasa de acumular a comercializar conocimiento en sus diversas formas: emprendimientos, patentes y licencias. Más allá de esta comercialización, la universidad se está integrando con los territorios para generar desarrollo localizado, incorporando las necesidades de ellos en sus prioridades y apoyando a las empresas desde sus actividades de investigación. La universidad se vuelve un actor fundamental de la cultura local, una institución Ancla que se puede integrar con actores clave para movilizar talento, empoderar voces locales, apoyar la creación de un medio ambiente sostenible y contribuir a la generación de oportunidades económicas para los habitantes del territorio.

Tabla 1. Modelos y roles de la universidad

Modelos	Rol de la universidad
Tradicional [9]	Bodega o acumulador de conocimiento, ubicada en una posición de élite alejada del resto de la sociedad.
Fábrica de conocimiento [9]	Desarrolla tecnologías para la industria, apalanca y contribuye al desarrollo de la revolución industrial.
Distribuidor de conocimiento [9]	Se integra a regiones inteligentes donde promueve la creación de nuevas capacidades, innovaciones y desarrollos, especialmente, en el ámbito local dentro de un contexto post industrial.
Triple Hélice [1, 7]	Contribuye a la generación de dinámicas de la innovación basada en conocimiento, establece relaciones con el estado y las empresas generando ventaja construida o valor adicional.
Tercer rol [5]	Contribuye al desarrollo regional mediante la comercialización activa del conocimiento en emprendimiento, patentes y licenciamientos.
Universidad Involucrada [5, 11]	Se adapta a las necesidades regionales para generar desarrollo localizado, enfoca sus actividades hacia la industria y la sociedad, ofrece programas focalizados en la región, vincula estudiantes de la localidad, retiene a graduados, integra necesidades regionales y prioridades de la universidad, coordina redes regionales, asesora política, se involucra con las empresas y brinda asistencia y soporte en investigación.
Institución Ancla [15, 16]	Rol integral en la cultura local, proveedor de empleo, generador de poder de compra y de estabilidad en el mercado de bienes raíces; en posición privilegiada para integrarse con grupos de interés locales para promover actividades de valor mutuo. Puede construir coaliciones con el objetivo de movilizar talento multidisciplinar, multisectorial y empoderar voces locales, generando una plataforma para desarrollar elementos claves para la prosperidad.

3. Aspectos pendientes en el área de conocimiento

En cuatro de los modelos se puede apreciar una mayor cercanía de la universidad con las empresas del territorio: distribuidor de conocimiento, tercer rol, universidad involucrada e institución Ancla. Pero, el modelo de la universidad involucrada va más allá de la generación, entrega o comercialización de conocimiento, al plantear la necesidad de adaptación de la universidad a las necesidades regionales con el objetivo de generar desarrollo localizado [5, 11]. Sin embargo, la evidencia empírica del modelo es escasa, lo que limita la comprensión efectiva de los mecanismos de integración y de coordinación de las diferentes funciones y misiones [4, 5]. De otro lado, se observa que el impacto de la facilitación social de la universidad, es capaz de generar nuevas oportunidades de negocios para las mismas universidades, sin embargo, cada caso es altamente dependiente del contexto y con modelos de negocios en constante evolución, lo que implica la necesidad de estudiar en detalle de cada situación [12].

La universidad como una institución Ancla está en una buena posición para integrarse con grupos de interés locales para promover actividades de valor mutuo [15], además,

puede tener mayor interés que otros actores en contribuir al desarrollo de sus comunidades [2]. Esto requiere que la universidad se mueva más allá del flujo en una sola vía del capital intelectual y transferencia de tecnología, generada de forma independiente dentro de sus instalaciones [16]. Como punto de partida se requiere crear coaliciones desde el interior y el exterior de la academia, movilizar talento multidisciplinar-multisectorial y empoderar las voces locales para crear plataformas que puedan desarrollar elementos claves para la prosperidad [16]. De acuerdo con [3], la pregunta para las instituciones Ancla es: ¿qué pueden hacer para avanzar sus comunidades?

Por lo tanto, en esta exploración de la literatura se encontró que es necesario avanzar en la comprensión de los mecanismos de integración y de coordinación de las diferentes funciones y misiones de la universidad involucrada. Además, se requiere obtener evidencia empírica, con estudios en detalle de cada situación, debido a que los casos son altamente dependientes del contexto. Es fundamental identificar cómo puede la universidad moverse más allá del flujo en una sola vía de capital intelectual y de transferencia de tecnología, a la generación de conocimiento de forma independiente dentro de sus instalaciones, y de esta manera encontrar una respuesta a la pregunta planteada.

Además, desde esa pregunta podrían surgir otras, por ejemplo: ¿cómo evitar los flujos en una sola vía de capital intelectual? ¿Cómo interactuar con los grupos de interés para construir respuestas? ¿Qué opciones hay para desarrollar las iniciativas que dan respuesta a la pregunta? Particularmente y dentro del enfoque que se ha planteado en este trabajo, se pueden resumir en: ¿cómo puede una facultad de ingeniería adaptarse, dentro de un modelo de universidad involucrada, a las necesidades de las pequeñas y medianas unidades productivas y comerciales ubicadas en el territorio adyacente, para generar opciones de desarrollo? A continuación, se presenta una manera de abordar los retos planteados por estas preguntas desde la perspectiva de una institución Ancla.

4. Abordaje de la problemática desde el diseño participativo

Bedoya, Quintero y Giraldo [17] presentan el desarrollo de un modelo de innovación colaborativa entre una empresa de servicios y una comunidad (Figura 2).



Figura 2. Modelo de Innovación Colaborativa con Comunidad [17]

Las fases del modelo incluyen un acercamiento inicial con la comunidad, que permite sentar las bases para el trabajo conjunto entre ella y la empresa. Luego, mediante un proceso de exploración participativa, se identifican problemáticas de la comunidad a partir de sus necesidades, deseos y expectativas, dentro de su contexto y vivencias.

Continúa con una fase de generación y priorización, en la cual se generan ideas, propuestas e iniciativas para priorizar. Finalmente, se avanza en el desarrollo de las propuestas llegando hasta el diseño de modelos de negocios [18, 19], que permitan involucrar a las mismas comunidades en los servicios que dan solución a los problemas identificados.

Es de anotar que la propuesta no involucra a la universidad en su aplicación. Una situación similar se da en [20], donde presenta un método para el desarrollo de productos y servicios entre la empresa y los usuarios, basado en la experiencia del usuario, pero, de nuevo, sin la participación de la universidad. Este método (Figura 3) plantea cuatro etapas: 1) conocer, que se basa en un proceso participativo entre la empresa y el usuario; 2) diseñar, que se basa en un proceso de diseño centrado en el ser humano; 3) prototipar; y 4) experimentar, donde se generan y prueban las nuevas ofertas. Este método se basa en un diálogo permanente entre la empresa y el cliente para generar nuevas versiones del producto. Una parte fundamental e interesante del método es el proceso de dialogo de doble vía que se da entre la empresa y el usuario, que se identifica como *participación*. Este proceso se basa en prácticas interactivas o técnicas de diseño participativo, también empleadas en [17] para el trabajo con las comunidades.

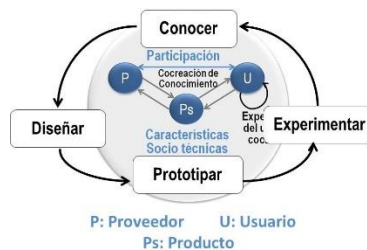


Figura 3. Método de co-creación de experiencias [20]

Por otro lado, las prácticas interactivas para la investigación cualitativa se emplean en el área del trabajo social, las cuales se entienden como *dispositivos que activan la expresión de las personas, facilitando el hacer ver, hacer hablar, hacer recuperar, hacer recrear y hacer análisis* [21]. Estas prácticas se orientan a la construcción colectiva de conocimiento y se emplean para ubicar, orientar, interpretar, emancipar, liberar, deconstruir y resignificar. Además, se basan en las perspectivas metodológicas de la teoría fundada para la codificación y análisis, y en la etnografía y en la investigación acción participativa [21] para las actividades de trabajo de campo y el diseño de la investigación.

Técnicas similares se emplean en el diseño participativo, el cual hace referencia a un conjunto de prácticas para que usuarios finales y otros grupos interesados actúen como parte de un proceso de diseño, que asegure el conocimiento de sus necesidades y usos [22]. El diseño participativo tiene origen en el trabajo de Kristen Nygaard [23] sobre colaboración interdisciplinaria en el diseño de sistemas de información. En estos proyectos se intentaba mejorar el nivel de conocimiento sobre cómo se construyen los sistemas de información, cómo ajustar las expectativas de los diversos grupos de interesados, especialmente los usuarios, cómo disminuir la resistencia al cambio en el uso de los sistemas y cómo aumentar la democracia en el trabajo con el objetivo de incrementar la participación de los empleados en las decisiones de la organización.

Los beneficios obtenidos de la posibilidad de participar en las decisiones de diseño de los proyectos, abre el campo del diseño participativo a otras áreas del conocimiento [24] y a empresas de diverso tamaño, incluidas las pequeñas y medianas unidades productivas. Por ejemplo, en [25] se muestra un proyecto desarrollado en los Países Bajos, donde

equipos de diseño participativo empiezan a trabajar con pequeñas y medianas organizaciones para mejorar su oferta y transferir conocimiento. En el proceso de construcción de conocimiento sobre el diseño participativo, Muller, Wildman y White [26] categorizan las técnicas de diseño participativo; Sanders, Brandt y Binder [27] aportan a la organización sobre el uso de las técnicas y, en el contexto local, en [17] y [20] se presentan aplicaciones de las técnicas en procesos de innovación colaborativa y el desarrollo de productos entre las empresas y los usuarios.

Lo siguiente en esta área de investigación es aplicar los desarrollos en la integración de la universidad con las pequeñas unidades productivas y comerciales ubicadas en el territorio adyacente. En la Figura 4 se muestra una versión simplificada del modelo de Giraldo [20], en la que las interacciones de doble vía con el proveedor, con el producto y con los usuarios se generan al incluir el concepto de la universidad involucrada. Es de anotar que, según lo indicado en la literatura explorada, estas interacciones se dan hoy en una sola vía, porque es la universidad la que genera el conocimiento y lo comercializa o entrega al mercado [5, 9, 11].



Figura 4. Interacciones Universidad, Proveedor, Producto y usuario

El establecimiento de nuevas interacciones, incluida la comunicación de doble vía como se ha planteado, es necesaria en el modelo de la universidad involucrada, para que pueda integrarse al desarrollo del territorio con el objetivo de mejorar las condiciones de competitividad de las organizaciones. También se ha mostrado en [17] y [20], que el diseño participativo aporta herramientas para desarrollar estos diálogos, para identificar problemáticas, necesidades y expectativas, y permite desarrollar ofertas y servicios que den solución a las problemáticas y necesidades identificadas.

En conclusión, el diseño participativo también puede ser aplicado, inicialmente, para establecer la comunicación de doble vía necesaria en el modelo de la universidad involucrada, con el objetivo de identificar las problemáticas, capacidades, necesidades y expectativas. Luego, se puede emplear en el desarrollo de ofertas y servicios que den solución a las problemáticas y necesidades identificadas. De esta forma, se contribuye con el objetivo de mejorar las condiciones de competitividad de las organizaciones ubicadas en el territorio adyacente a la universidad. Otro paso en esta área de investigación es avanzar en el desarrollo de los modelos conceptuales, para identificar interacciones, técnicas y métodos para la integración de otras instituciones Ancla con las pequeñas unidades productivas y comerciales ubicadas en el territorio.

5. Propuesta metodológica para desarrollar un modelo de universidad involucrada

Proponer un modelo de universidad involucrada con el territorio adyacente, que permita su adaptación a las necesidades de pequeñas y medianas unidades productivas, empleando técnicas de diseño participativo, implica:

1. Identificar los componentes teóricos del modelo de universidad involucrada mediante la revisión del estado del arte e investigaciones anteriores.
2. Identificar en las pequeñas y medianas unidades productivas y comerciales del territorio adyacente las problemáticas, necesidades, capacidades y expectativas con respecto a la universidad y otras instituciones Ancla.
3. Desarrollar estudios de caso de intervenciones desde el diseño participativo para aportar soluciones a problemáticas, así como desde otro tipo de actividades de extensión de la universidad, incluidas las consultorías.
4. Realimentar el modelo a partir de los resultados de los estudios de caso.

Este proceso se puede llevar a cabo empleando una metodología en espiral, de acuerdo con lo propuesto en [1], donde se aportan resultados en el corto plazo en varias iteraciones, mientras se perfecciona el modelo en el mediano y largo plazo. De esta manera, cada iteración aporta a la construcción de una estructura de conocimiento, denominada modelo de universidad involucrada. A este modelo aportan los resultados de los estudios de caso [29] de intervenciones desde el diseño participativo con pequeñas y medianas unidades productivas del territorio. Cada iteración arroja productos de conocimiento, soluciones a problemáticas y mejoras al modelo.

Las características de la investigación propuesta implican trabajar con diferentes fuentes de evidencia, para la recolección de datos de los diversos tipos de interacción identificados en el modelo. El fenómeno estudiado es complejo por la cantidad de variables involucradas, además, se requiere identificar: ¿cómo debe ser el modelo de universidad involucrada? ¿Quién participa? y ¿Dónde se aplica? No se controlan los eventos que ocurren durante la recolección de datos, es decir, cambios en situaciones o variables. También se requiere incluir las variables del contexto dentro de los elementos a observar, dada la alta dependencia del contexto identificada en la literatura. Estas características llevan a la elección del estudio de caso como metodología de investigación, porque permite contemplar en su diseño este tipo de situaciones [29].

Con base en la guía paso a paso para la realización de estudios de caso, propuesta por Yin [29], se diseñan los estudios y se elaboran los protocolos para su ejecución. Aquí se propone un diseño con múltiples casos, múltiples réplicas literales y múltiples réplicas teóricas. También se abordan múltiples fuentes de evidencia en el estudio, desde la observación participativa de las actividades normales de las empresas participantes, la entrevista y la observación participativa de diferentes intervenciones desde el diseño participativo. Como estrategia general para realizar el enlace entre los datos y las proposiciones teóricas (componentes del modelo de universidad involucrada), se prevé el uso de la técnica de análisis de modelos lógicos [29]. Los hallazgos serán interpretados según su correspondencia con los componentes del modelo de universidad involucrada, las teorías en las que se basa el modelo o con las teorías rivales que expliquen los hallazgos.

Por otro lado, la validez del diseño experimental propuesto se garantiza por el uso de múltiples fuentes de evidencia y por establecer una cadena de evidencia que identifique cada paso en el proceso de diseño y ejecución del estudio; además, los borradores de reportes del estudio se revisan con los informantes clave. La validez interna, que evita establecer relaciones ficticias, se busca mediante las tácticas de correspondencia de patrones, apoyada en el uso de modelos lógicos y teniendo en cuenta otras posibles explicaciones generadas por sesgos en la práctica de la investigación y por teorías rivales representadas por las réplicas teóricas y modelos alternativos de intervención. La validez

externa, es decir, el dominio sobre el que se pueden generalizar los resultados, se obtiene mediante la propuesta de la lógica de replicación, basada en réplicas teóricas y literales [30]. Por último, la confiabilidad para que las actividades del estudio puedan ser repetidas para su verificación, se logrará mediante el uso del protocolo de estudio de caso y la implementación de una base de datos del estudio.

En cada iteración de la investigación se deben formular o reformular algunos de los elementos del estudio de caso, a partir de los hallazgos de la iteración anterior o del estado del arte. Sin embargo, se prevé que los elementos: fuentes de evidencia, lógica de enlace entre los datos y las proposiciones, criterios para interpretar los hallazgos y criterios para la evaluación de la calidad del diseño de la fase experimental, así como algunas de las variables, permanezcan iguales para facilitar la comparación de resultados mientras se profundiza en el conocimiento de los componentes del modelo. En la Tabla 2 se resume una propuesta de elementos a tener en cuenta para el diseño de estudios de caso, en un proyecto de investigación desarrollado en varias iteraciones para el desarrollo de un modelo conceptual.

Tabla 2. Elementos para el diseño de la fase experimental en un proyecto con varias iteraciones para el desarrollo de un modelo conceptual. A partir de [20, 29, 30]

Preguntas específicas del estudio de caso					
Pregunta 1: () Se formulan a partir de los hallazgos de la iteración anterior o el estado del arte					
Pregunta 2: ()					
Pregunta n: ()					
Proposiciones del estudio de caso					
Proposición 1: () Se formulan a partir de la evolución de los componentes del modelo o desarrollo					
Proposición 2: ()					
Proposición n: ()					
Tipo de diseño: Múltiples casos, múltiples réplicas teóricas y múltiples réplicas literales					
Réplicas teóricas	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5
Réplicas literales	2 Casos	2 Casos	2 Casos	2 Casos	2 Casos
Selección de casos					
Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio n	
Rango o Valor	Rango o Valor	Rango o Valor	Rango o Valor	Rango o Valor	
Variables de interés					
Unidad de Análisis: (Nivel de Involucramiento de la Universidad)					
Variables: Variable 1, Variable 2, Variable 3, Variable n					
Fuentes de evidencia					
Observación Participativa					
Entrevista					
Observación Participativa 2: Talleres					
Lógica de enlace entre los datos y las proposiciones: Modelo Lógico					
Datos →		Modelo Conceptual →		Proposiciones	
Criterios para interpretar los hallazgos					
Hallazgos → Modelo conceptual, Hallazgos → Teoría					
Criterios para la evaluación de la Calidad del diseño de la fase experimental					
Pruebas	Táctica del estudio de caso				
Validez del diseño	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Usa múltiples fuentes de evidencia ▪ Establece una cadena de evidencia ▪ Los informantes clave revisan el borrador del reporte 				
Validez interna	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hacer correspondencia de patrones ▪ Se tienen en cuenta explicaciones rivales ▪ Usa modelos lógicos 				
Validez externa	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Uso de lógica de replicación en estudios con múltiples casos 				
Confiabilidad	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Usa protocolo de estudio de caso ▪ Desarrollo de una base de datos del estudio 				

6. Conclusiones

En la economía basada en el conocimiento se presentan aspectos contradictorios debido a la forma en que el conocimiento impacta las sociedades. De un lado, modifica la inclusión y exclusión social al desacoplarlas de su dependencia de la posición social en la economía industrial. Pero, de otro lado, las diferencias entre países ricos y pobres se aceleran por el *capitalismo del conocimiento*, lo que genera un crecimiento en la brecha entre sociedades.

La universidad ha evolucionado desde una posición alejada de la sociedad, en el modelo de universidad tradicional, como acumuladora de conocimiento, pasando por el apalancamiento de la revolución industrial y actuando como fábrica de conocimiento, hasta llegar a una activa participación en la generación de dinámicas en conjunto con gobiernos y empresas para crear valor en la economía del conocimiento.

La universidad pasó de acumular conocimiento a comercializarlo en diversas formas, tales como emprendimientos, patentes y licencias. Más allá de esta comercialización, la universidad se está involucrando con los territorios para generar desarrollo localizado e incorpora las necesidades de los territorios dentro de sus prioridades, además, apoya a las empresas desde sus actividades de investigación. Desde la perspectiva teórica de las instituciones Ancla, la universidad se puede convertir en un actor fundamental de la cultura local, debido a que puede integrarse con actores clave para movilizar talento, empoderar voces locales, apoyar la creación de un medio ambiente sostenible y generar oportunidades económicas para todos los habitantes del territorio.

Es claro que las universidades tienen un impacto importante en el desarrollo de las regiones donde actúan y que, dependiendo del modelo, también pueden generar impacto sobre ellas. Sin embargo, el estudio de los impactos sobre los territorios adyacentes es escaso debido a que cada uno tiene condiciones diferentes, por lo que se requiere desarrollar investigación en situaciones específicas de universidades con sus respectivos territorios. En esta área de conocimiento se requiere avanzar en la comprensión de los mecanismos de integración y coordinación de las diferentes funciones y misiones de la universidad involucrada. Se requiere generar evidencia empírica con estudios en detalle de cada situación, debido a que los casos son altamente dependientes del contexto.

Es fundamental identificar cómo puede la universidad moverse más allá del flujo en una sola vía de capital intelectual y transferencia de tecnología, y de generación de conocimiento de forma independiente dentro de sus instalaciones. Como institución Ancla, la universidad debe buscar respuesta a la pregunta: ¿qué puede hacer para avanzar sus comunidades? El modelo de la universidad involucrada contempla la adaptación de ella a las necesidades regionales, para generar desarrollo local más allá del rol de generación de conocimiento. El modelo enfoca sus actividades hacia la industria y la sociedad, se involucra directamente con las empresas y brinda asistencia y soporte en investigación. Pero, la investigación sobre la relación de la universidad con las regiones se ha orientado a estudios en regiones específicas, donde actúan determinadas universidades. La investigación desarrollada en este trabajo se orienta a la revisión o desarrollo de modelos conceptuales para esas situaciones específicas.

Por lo tanto, es importante identificar mecanismos de adaptación de la universidad con su territorio adyacente, para maximizar el valor aportado a la sociedad y para contribuir al avance del conocimiento en esta área de investigación. En el caso específico de las facultades de ingeniería, el aporte es fundamental por su capacidad para generar

desarrollos tecnológicos que, unido a prácticas de diseño, permite entregar un producto desarrollado que se puede implementar en las pequeñas unidades productivas y comerciales del territorio adyacente.

Se plantea que el diseño participativo se puede emplear para establecer la comunicación de doble vía necesaria en el modelo de la universidad involucrada. De esta forma se pueden identificar problemáticas, necesidades, capacidades y expectativas. Luego, se pueden desarrollar ofertas y servicios que den solución a las problemáticas y necesidades identificadas, con el objetivo de mejorar las condiciones de competitividad de las organizaciones ubicadas en el territorio adyacente a la universidad.

Se propone una metodología iterativa que parte de la identificación de los componentes de un modelo conceptual de la universidad involucrada, para la situación específica de una facultad de ingeniería. Se identifican problemáticas, necesidades, capacidades y expectativas de pequeñas y medianas unidades productivas y comerciales del territorio adyacente a la universidad. Se realizan estudios de caso de intervenciones desde el diseño participativo y otros tipos de intervención, tales como la consultoría, para comparar los resultados de cada tipo de intervención y realimentar el modelo con los resultados del análisis. Cada iteración arroja productos de conocimiento, soluciones a problemáticas y mejoras al modelo de universidad involucrada.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma Latinoamericana, por su apoyo para la realización de las actividades de exploración de la literatura y formulación de investigación, en los que se basa este trabajo.

Referencias

- [1] Etzkowitz, H. & Leydesdorff, L. (1995). [The Triple Helix--University-industry-government relations: A laboratory for knowledge based economic development](#). *EASST Review* 14 (1), pp. 14–19.
- [2] Dubb, S. & Howard, T. (2012). [Leveraging anchor institutions for local job creation and wealth building](#). Berkeley: Big Ideas for Job Creation.
- [3] Goddard, J. et al. (2013). [Universities as anchor institutions in cities in a turbulent funding environment: vulnerable institutions and vulnerable places in England](#). *Journal of Higher Education Outreach and Engagement* 7(2), pp. 307-335.
- [4] Uyarra, E. (2010). [Conceptualizing the Regional Roles of Universities, Implications and Contradictions](#). *European Planning Studies* 18 (8), pp. 1227–1246.
- [5] Trippl, M., Sinozic, T. & Smith, H. (2015). [The Role of Universities in Regional Development: Conceptual Models and Policy Institutions in the UK, Sweden and Austria](#). *European Planning Studies* 23(9), pp. 1722–1740.
- [6] Aguiar, H., Herrera, L. & Uribe, E. (2011). [Guayaquil. Caracterización socioeconómica](#). Medellín: Universidad Autónoma Latinoamericana.
- [7] Cooke, P. & Leydesdorff, L. (2005). [Regional Development in the Knowledge-Based Economy: The Construction of Advantage](#). *The Journal of Technology Transfer* 31(1), pp. 5-15.
- [8] Burton, A. (1999). [Knowledge Capitalism](#). Oxford: Oxford University Press.
- [9] Youtie, J. & Shapira, P. (2008). [Building an innovation hub: A case study of the transformation of university roles in regional technological and economic development](#). *Research Policy* 37(8), pp. 1188–1204.
- [10] Sánchez, M. (2014). [Turning the tables: Regions shaping university performance](#). *Regional Studies, Regional Science* 1(1), pp. 276–285.
- [11] Gunasekara, C. (2006). [Reframing the Role of Universities in the Development of Regional Innovation Systems](#). *The Journal of Technology Transfer* 31(1), pp. 101–113.
- [12] Rytönen, E. (2015). [University campuses in spatial transformation: A business model typology of case Aalto University](#). *Facilities* 33(13-14), pp. 794–818.
- [13] Asale, R. (2014). Integrar. [Diccionario de La Lengua Española](#).
- [14] Asale, R. (2014). Involucrar. [Diccionario de La Lengua Española](#).

- [15] Harris, M. & Holley, K. (2016). [Universities as Anchor Institutions: Economic and Social Potential for Urban Development](#). In Paulsen, M. (Ed.), *Higher Education: Handbook of Theory and Research* (pp. 393–439). London: Springer
- [16] Cantor, N., Englot, P. & Higgins, M. (2013). [Making the Work of Anchor Institutions Stick: Building Coalitions and Collective Expertise](#). *Journal of Higher Education Outreach and Engagement* 17(3), pp. 17–46.
- [17] Bedoya, N., Quintero, I. & Giraldo, J. (2013). [Desarrollo de un proceso de innovación colaborativa con comunidad. De la vivencia al negocio](#). In *Memorias III Congreso Internacional de Gestión Tecnológica e Innovación* (pp. 1583–1594). Medellín, Colombia.
- [18] Giraldo, J. (2006). [Caracterización de los modelos de negocio en el sector de las telecomunicaciones y su nivel de convergencia tecnológica frente a los usuarios](#). In *Caracterización de los modelos de negocio en el sector de las telecomunicaciones y su nivel de convergencia tecnológica frente a los usuarios*, 78. EAFIT-EPM: Medellín, Colombia.
- [19] Osterwalder, A. (2004). [The Business Model Ontology a Proposition in a Design Science Approach](#). Ph.D dissertation, Université de Lausanne.
- [20] Giraldo, J. (2013). [Método de creación conjunta para facilitar la participación de agentes heterogéneos en actividades enmarcadas en el ciclo de innovación de una empresa de telecomunicaciones](#). Ph.D Tesis, Universidad de Antioquia.
- [21] García, B. et al. (2002). [Técnicas interactivas para la investigación social cualitativa](#). Trabajo de Grado, Universidad de Antioquia.
- [22] Muller, M. (2002). [Participatory design: The third space in HCI](#). In Sears, A. & Jacko, J. (Eds.), *The Human-Computer Interaction* (pp. 1051-1068). USA: CRC Press.
- [23] Nygaard, K. (1996). [Those were the days? Or Heroic times are here again?](#) *Scandinavian Journal of Information Systems* 8(2), pp. 91–108.
- [24] Sanders, E. & Stappers, P. (2008). [Co-creation and the new landscapes of design](#). *CoDesign: International Journal of CoCreation in Design and the Arts* 4(1), pp. 5–18.
- [25] Van der Lugt, R., Bakkeren, M. & De Lille, C. (2009). [Co-design in a Pressure Cooker](#). The Netherlands: Kenniscentrum Natuur & Techniek.
- [26] Muller, M., Wildman, D. & White, E. (1993). [Taxonomy Of PD Practices: A Brief Practitioner's Guide](#). *Communications of the ACM* 36(4), pp. 24–28.
- [27] Sanders, E., Brandt, E. & Binder, T. (2010). [A framework for organizing the tools and techniques of participatory design](#). In *Proceedings of the 11th Biennial Participatory Design Conference* (pp. 195–198). Sydney, Australia.
- [28] Ueda, K., Kito, T. & Takenaka, T. (2008). [Modelling of value creation based on Emergent Synthesis](#). *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57(1), pp. 473–476.
- [29] Yin, R. (2003). [Case study research: Design and methods](#). USA: SAGE.
- [30] Eisenhardt, K. (1989). [Building Theories from Case Study Research](#). *The Academy of Management Review* 14(4), pp. 532–550.

8. Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) como apoyo a la implementación de buenas prácticas de gestión financiera, basadas en conocimiento, en las Instituciones de Educación Superior

Laura Pinto P.¹

Leidy Guarín M.²

Luis Gómez F.³

¹ Institución Universitaria Agustiniana. Bogotá, Colombia

^{2,3} Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia

1. Introducción

Las Instituciones de Educación Superior (IES) son la representación del conocimiento dentro de la sociedad y la gestión de este bien intangible conlleva a la generación de un panorama más claro para sus administradores, sobre el planteamiento de estrategias que permitan la obtención de ventajas competitivas. Sin embargo, existe la problemática de sostenibilidad financiera que, generalmente, experimentan las IES, sobre todo las de naturaleza pública, donde los fondos financieros los otorga el estado en cierto porcentaje y el resto lo deben alcanzar mediante la prestación de servicios académicos y de investigación, entre otros.

Esta situación genera la necesidad de buscar posibilidades de solución orientadas a incorporar ideas que innoven y apoyen la gestión de los procesos en las IES. Una alternativa se identifica en el aporte que desde el campo de las TIC se concibe a la hora de proponer estrategias de tipo tecnológico, enfocadas a apoyar esa sostenibilidad financiera y tomando como base la identificación de Buenas Prácticas de Gestión Financiera (BPGF) basadas en conocimiento, viendo éste último como un bien intangible que respalda la generación de valor en las organizaciones.

El objetivo de esta investigación está enfocado a presentar la aplicabilidad de la gestión de conocimiento soportada en TIC, como soporte a la implementación de BPGF en IES y como una base para la propuesta de modelos y marcos de trabajos donde se promuevan, tomando como referente a la gestión de conocimiento y su implementación a través de las TIC. Por consiguiente, se presentará un acercamiento a los conceptos de gestión de conocimiento, BPGF basadas en conocimiento en las IES y TIC que apoyan éstos temas. Esto es el resultado de la búsqueda de información en las bases de datos ISI Web of Knowledge y Scopus, así como en diferentes sitios de internet y otras publicaciones, asociados a mejores prácticas en la gestión financiera en las IES.

2. Gestión de Conocimiento

Generalmente, el conocimiento se relaciona con las personas a las que se considera un elemento clave [1] a la hora de generar resultados para la organización, en función de las actividades laborales y el aporte que realizan de acuerdo con las experiencias, habilidades y conceptos que poseen. Ese conocimiento proveniente de las personas, aplicado a las labores organizacionales, se conocen como competencias nucleares, pero, solamente será generador de ventajas competitivas, el que contribuya a la obtención de valor económico [2]. No obstante, la forma en que se gestiona el conocimiento deberá estar alineada con la estrategia y las actividades organizacionales, donde se tome en cuenta el *stock* estático de conocimientos y sus flujos [3]. Además, se ha encontrado en la literatura algunos conceptos sobre gestión de conocimiento asociado a competencias, habilidades y experiencias, que una persona posee y utiliza en la búsqueda de soluciones para

determinadas situaciones o problemas en su entorno laboral. En la Tabla 1 se describen algunos ejemplos.

Tabla 1. Conceptualización de gestión de conocimiento

Concepto	Fuente
Es el proceso sistemático de buscar, organizar, filtrar y presentar la información con el objetivo de mejorar la comprensión de las personas en una específica área de interés [4].	
Es la habilidad de desarrollar, mantener, influenciar y renovar los activos intangibles llamados capital de conocimiento o capital intelectual [6].	
Es el arte de crear valor con los activos intangibles de una organización [7].	[5]
Es el proceso sistemático de detectar, seleccionar, organizar, filtrar, presentar y usar la información por parte de los participantes de la empresa, con el objeto de explotar cooperativamente el recurso de conocimiento basado en el capital intelectual propio de las organizaciones, orientados a potenciar las competencias organizacionales y la generación de valor [8].	
Es la habilidad de las personas para entender y manejar la información utilizando la tecnología y la compartición de conocimiento [9].	
Con respecto a la gestión de conocimiento, la mayoría de los autores especialistas en el tema acuerdan definirlo apoyándose en las diferentes etapas de las que se compone: identificación, selección, almacenamiento estructurado (o mapa de localización), transferencia y uso.	[10]
La gestión del conocimiento se orienta a la captura, análisis, aplicación y reutilización del conocimiento en la organización, con el objetivo de mejorar la calidad en los procesos de negocio, con un coste menor y generando ventajas competitivas [11].	[12]
La gestión de conocimiento se incorpora cada vez más a las organizaciones para mejorar su rendimiento, pero existe carencias que dificultan su completa implementación de acuerdo con los objetivos y estrategias de la organización, y se queda sólo en gestión de la información. Esto se debe a un enfoque centrado únicamente en los aspectos técnicos, dejando a un lado factores necesarios para la gestión de conocimiento como la cultura organizativa, las políticas y objetivos de la organización y sobre todo el capital humano; en otras palabras, dejando de lado el verdadero sistema.	[13]

Cuando se analiza detenidamente cada una de estas definiciones, se identifica que los autores apoyan su opinión en otros atributos, tales como: ventajas competitivas [10, 13, 14] y cultura de la organización, competencias y tecnologías [13], aspectos considerados importantes para la sostenibilidad organizacional, que puede verse influenciada por barreras o dificultades para la gestión de conocimiento en un contexto determinado.

2.1 Barreras de la gestión de conocimiento

Pérez y Dressler [15] identifican algunos de los obstáculos, que se deben superar cuando se pretende implantar un proyecto de gestión de conocimiento en las organizaciones.

1. *Espacial*: relacionado con la ubicación del conocimiento dentro y fuera de la organización y, por consiguiente, con la dificultad de identificarlo y gestionarlo dentro de los procesos organizacionales.
2. *Temporal*: hace referencia a la necesidad de conservar el conocimiento a través del tiempo.
3. *Jerárquico Social*: manifiesta la imposibilidad de superar los niveles de la estructura organizacional (organigrama), donde las relaciones sociales entre los miembros pueden dinamizar o bloquear el desarrollo, transmisión, generación y aplicación de conocimiento.

La barrera jerárquica es la que presenta mayores inconvenientes, debido a que se encuentra relacionada con la estructura y la cultura de la organización. La estructura organizativa condiciona el funcionamiento de la empresa o institución, tomando como

elemento principal a las personas y sus grupos de interés, así como sus interacciones [16], y la cultura de la organización se puede definir como la agrupación de características propias de la organización, que generan una forma única de convivencia, comportamiento y ambiente laboral, logrando diferenciarse de las demás organizaciones; es el carácter o personalidad de una organización [17]. Adicionalmente, existen otras dificultades con respecto a la gestión de conocimiento, las cuales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Dificultades para la implementación de estrategias de gestión de conocimiento

Autor	Dificultad
[18] citando a [19], [20] y [21]	Ausencia de objetivos Falta de planificación Responsabilidad difusa Contextualización Confusión conceptual Falta de una cultura adecuada
[22]	Carencia de una estructura de gestión de conocimiento en las organizaciones, que facilite su implementación efectiva. Los conocimientos que se generan y apropian a través de procesos de innovación, mediante la adquisición de tecnología, el trabajo con proveedores y clientes, las interacciones con los competidores y el entorno empresarial, presentan dificultades para integrarlos a las acciones y actividades cotidianas de la organización.
[23]	No se reconocen lineamientos claros sobre la forma de hacer uso eficiente del conocimiento, ni como reconocerlo e integrarlo como un elemento clave que interviene en los procesos convencionales. La existencia de organizaciones heterogéneas, disímiles, en ambientes que cambian con mucha rapidez debido a las condiciones del mercado, los clientes, sus necesidades y la competencia, son características que hacen que no exista una forma universal de gestionar conocimiento.

No obstante, cada organización deberá establecer estrategias orientadas a mitigar los obstáculos que se presentan al implementar un proyecto de gestión de conocimiento, a la vez que debe tener en cuenta que al considerar al conocimiento como un activo intangible generador de valor y ventajas competitivas, que no es gestionable mediante los actuales métodos contables [24], tendrá que identificar la necesidad de adoptarlo mediante formas innovadoras [25], asociadas al componente humano que interactúa de manera sinérgica para lograr los objetivos de la organización, al tiempo que se abre paso a un proceso dinámico de aprendizaje, tanto a nivel individual como grupal, organizativo e interorganizativo [3]. En estos procesos de aprendizaje e intercambio, el conocimiento se ve influenciado por factores internos y externos al contexto de la organización [26, 27].

Los factores externos impulsan a la organización a integrar dentro de sus estrategias la capacidad de absorción de conocimientos asociados a su operación, con respecto a sus competidores [27]. Por otro lado, a nivel interno se encuentra el modelo SECI: Socialización, Exteriorización, Combinación e Interiorización, que está orientado a la conversión de conocimientos tácitos y explícitos [28]. Este modelo lo aplican normalmente las organizaciones para gestionar el conocimiento de su capital humano (representado en el propio individuo y grupos de interés).

- *Socialización*: el conocimiento tácito se transmite por medio de experiencias compartidas. Es difícil de formalizar y se puede socializar mejor en el contexto donde se generan las relaciones laborales.
- *Exteriorización*: el conocimiento tácito se convierte en explícito.
- *Combinación*: se toma el conocimiento explícito existente y se mejora, incluyendo aspectos no solamente internos de la organización sino también externos a ella.

- **Interiorización:** se incorpora el conocimiento explícito al conocimiento tácito de los individuos y está estrechamente relacionado con el aprendizaje práctico. Se actualiza mediante la acción y la práctica. El conocimiento explícito se puede también incorporar a través de simulaciones o experimentos que desencadenan el aprender haciendo (competencias). Cuando el conocimiento se interioriza y forma parte de las bases de conocimiento tácito de los individuos, en forma de modelos mentales compartidos o conocimientos técnicos, se convierte en un activo valioso.

Actualmente, estos procesos de conversión se pueden complementar o apoyar con el uso de TIC, que, aunque no son el objetivo de un proyecto de gestión de conocimiento, representan una herramienta factible para su ejecución.

3. TIC que apoyan la incorporación de la gestión de conocimiento en las IES

Esto hace referencia a herramientas que facilitan el desarrollo de actividades al interior de las empresas, casas de familia, instituciones académicas y sociedad en general. También son mediadoras en el mejoramiento de la gestión de lo público y la relación estado-ciudadano [29], debido a la prestación de servicios que proporcionan y al hecho de convertirse cada vez más en imprescindibles, actuando como articuladoras y facilitadoras [30] en las labores que realizan las personas. Generalmente, los servicios que brindan las TIC se enfocan al tratamiento de la información [31] pero, últimamente, se han convertido en facilitadoras de la gestión de conocimiento en las organizaciones [1], teniendo que superar las posibles restricciones que la cultura de la misma manifiesta [17] y dando paso a nuevas formas de innovación, transformación y renovación [32].

Las organizaciones basan sus procesos en las TIC, pretendiendo alcanzar niveles de innovación y calidad, sin embargo, desconocen si están obteniendo las ventajas competitivas que proporciona una eficiente utilización, es decir, si están generando valor económico [33]. A este respecto, Cobo [30] manifiesta: *puede plantearse que un uso apropiado de las TIC puede generar valor agregado en diversos escenarios, siempre y cuando este uso venga acompañado y enriquecido por un conjunto de habilidades y saberes.* En esta misma línea, [34, 35] opinan que las TIC les permiten a las organizaciones alcanzar un nivel de competitividad que les facilita mantenerse en su escenario económico; mientras que [34] realiza una clasificación de ellas con respecto a su utilidad en función de las actividades desarrolladas dentro del entorno de gestión empresarial (Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación de las TIC [34]

Tipo de Herramienta	Clasificación
De búsqueda y recuperación de la información, así como de almacenamiento de la información	<i>Datawarehouse</i> , Bases de datos
De filtrado y personalización de la información	Correo electrónico, escritorio del sistema, intranet o portal corporativo
De análisis de información	La minería de datos (<i>datamining</i>), minería de textos (<i>textmining</i>) o simulación, entre otras
Sistemas de comunicación	Mapas del conocimiento o portales corporativos
Sistemas <i>e-learning</i> y comercio electrónico	Tecnologías Web, <i>E- Learning</i> , E-Commerce
Sistemas de gestión empresarial	ERP – Planificación de Recursos Empresariales CRM – Gestión de Relaciones con los Clientes

También se ha encontrado que las TIC contribuyen en la superación de los obstáculos o barreras que surgen al intentar implementar proyectos de gestión de conocimiento en las organizaciones. En estos casos se ha identificado que la estructura y la cultura organizacionales encuentran alternativas de solución a través de la TIC, porque permiten

compensar tanto la deficiencia en la comunicación de la información entre las distintas dependencias, como la creación de un ambiente innovador y de cooperación entre quienes intervienen en los procesos productivos [32]. En otras palabras, las TIC, dentro de un proyecto de gestión de conocimiento, están orientadas a apoyar los procesos de conversión del conocimiento, de tal manera que se genere un ambiente colaborativo entre las personas que participan en la consecución de los objetivos organizacionales [36]. De esta manera se asume la tarea de colaboración como una capacidad de la organización, orientada a la identificación y utilización de las competencias nucleares de sus empleados.

Sin embargo, no se debe dejar el peso de los resultados de procesos a las TIC, porque solamente son herramientas que facilitan los procesos de gestión de conocimiento, que, de acuerdo con [37], representan la actividad principal en la educación superior y, tanto su uso como apropiación, deberán estar respaldados por políticas que apoyen su integración con las actividades de la institución. Entre estas actividades se encuentran las de tipo financiero orientadas a la sostenibilidad de la IES en el tiempo y que se puede conseguir mediante el aporte a la generación de buenas prácticas de gestión financiera. Por su parte, Pinto, Becerra y Gómez [38] proponen una clasificación de las TIC que se pueden utilizar en la implementación de la gestión de conocimiento asociado a una gestión financiera sostenible de una IES (Tabla 4).

Tabla 4. TIC asociadas a gestión de conocimiento [38]

Tipo de sistema	Tecnologías utilizadas
Sistemas de gestión de conocimiento a nivel empresarial	Sistemas basados en inteligencia de negocios y minería de datos
	Reportes técnicos
	Sistemas de gestión documental
	<i>Workflow</i>
	Directorio de expertos
	Intranets
Social Knowledge Management	Portales de conocimiento
	Web 2.0
	Gestores de contenido
	Comunidades de práctica
	<i>Groupware</i>
Sistemas Basados en el Conocimiento	Web semántica
	Repositorios o depósitos de conocimiento
	Redes neuronales
	Razonamiento basado en casos
	Lógica difusa
	Algoritmos genéticos
Agentes inteligentes	
	Método de resolución de problemas

Teniendo en cuenta la influencia de las TIC en los procesos de gestión financiera dentro de las organizaciones, es importante, como primer paso, identificar las buenas prácticas en el alcance de los objetivos financieros.

4. Buenas prácticas de gestión financiera basadas en conocimiento en las IES

La Comunidad de Prácticas en APS considera que una actividad es una buena práctica, si cumple con características tales como:

1. Presenta un resultado valioso para el usuario.
2. Es sencilla y simple.
3. Emerge como respuesta a una situación que es necesario modificar o mejorar.

4. Es pertinente y adecuada al contexto local en donde se implementa.
5. Es sostenible en el tiempo (puede mantenerse y producir efectos duraderos).
6. Fomenta la replicación de la experiencia en una situación distinta, pero con condiciones similares.
7. Es innovadora (entendiendo que la innovación no sólo implica una nueva acción, sino que puede ser un modo diferente y creativo de realizar prácticas tradicionales o de reorganizarlas).
8. Considera elementos de evaluación de resultados, retroalimentación de las acciones y reorganización de ellas a partir de lo aprendido.

Por consiguiente, si se asocian estas características al espacio financiero de las organizaciones, puede hablarse de estrategias orientadas a generar propuestas basadas en aspectos innovadores, con la capacidad de brindar soluciones pertinentes a situaciones problema, donde se construye un ámbito operacional que genera confianza de mantenerse en el futuro gracias a la sostenibilidad financiera alcanzada. Entendiendo que sostenibilidad se concibe como un elemento que causa un ambiente de tranquilidad en el desarrollo de una organización, no solamente en el tiempo presente sino también a futuro, en [39] se afirma que sostenibilidad, en términos generales, se entiende como la característica de un proceso o estado que puede mantenerse indefinidamente, la clave para la sostenibilidad de cualquier proceso o estado es balance, proporción o equilibrio.

Asociando el término sostenibilidad al área financiera, se puede definir como aquella característica dentro de la organización que proporciona una visión factible de auto dependencia financiera, que logra el alcance de las metas propuestas dentro de un plan establecido al inicio de un periodo de tiempo, orientando de manera eficiente procesos y actividades desarrollados dentro del sistema organizacional. Con respecto a las BPGF asociadas a aspectos de la gestión de conocimiento en IES, a continuación, se presenta un listado de ellas, que, además, están asociadas al concepto de gestión de conocimiento. Esto es posible porque en cada una de ellas se puede encontrar aspectos de la IES relacionados con las personas, la cultura, la obtención de ventajas competitivas, innovación, TIC, la creación de valor y la posibilidad tanto de adquirir, como de compartir y almacenar conocimiento.

1. Consultorías a organizaciones en general [40, 41].
2. Financiación mediante el centro de Innovación y emprendimiento para conseguir apoyo para desarrollar servicios de fomento de la actividad emprendedora [42, 43].
3. Servicios Universidad-Empresa [44-46].
4. Propuesta de Foros, ejemplo: Foro Mundial de Negocios (*speakers* internacionales, temas innovadores, patrocinadores e infraestructura propia) [47].
5. Incorporación de una cultura de autogestión en la IES [48].
6. Asistencia a la formación de consorcios y servicios de apoyo a la ejecución de proyectos.
7. Presupuesto Participativo como una herramienta democrática de proximidad, que permite involucrar toda la comunidad universitaria en los procesos de toma de decisiones, en relación con los gastos e inversiones a realizar en la IES, con una parte del presupuesto destinada a tal efecto.

8. El modelo de gestión desconcentrada que promueve radicar en las facultades atribuciones y competencias de la gestión financiera, bajo la responsabilidad de sus autoridades [41].
9. Programa de Becas [41]
10. Optimización de los procesos (reducción de costes [41]) en el contexto de la implantación de un nuevo sistema de información para la gestión del campus.
11. Desarrollo de software para la gestión financiera.
12. Software para analizar y prevenir la deserción.
13. Formación a docentes y administrativos para promover posgrados, tales como maestrías y doctorados, entre otros [49].
14. Alianzas internacionales en educación virtual o a distancia [50, 51].
15. Movilidad internacional de investigadores y estudiantes [52, 53].
16. Creación de redes de conocimiento entre universidad, gobierno y empresas (triple hélice) [54].
17. Doble titulación [51, 53].
18. Obtención de recursos públicos o privados vía cooperación nacional o internacional [55].
19. Vínculos interinstitucionales [56].
20. Liberalizar y dinamizar la docencia y la investigación, promoviendo la cooperación entre el sector académico, especialmente la investigación, y el empresarial, y aplicando reformas estructurales a la organización universitaria [41].
21. Convenios, franquicias o alianzas con otras instituciones [57].
22. Realizar un estudio a nivel social sobre las necesidades que presenta la región y promover trabajos de investigación y servicios en general (incluyendo necesidades científicas y tecnológicas) [58].

4.1 TIC como soporte para la implementación de BPGF en las IES

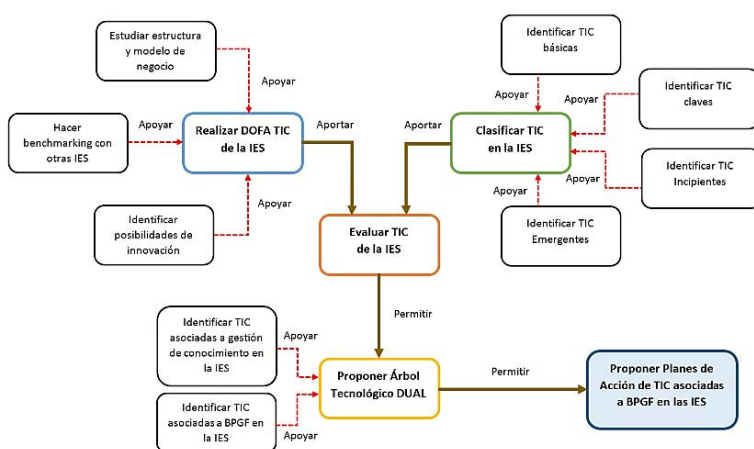


Figura 1. Proceso TIC orientado a soportar la implementación de BPGF en las IES

La Figura 1, realizada de acuerdo con los conceptos de estrategia tecnológica expuestos por [59] y [60], representa subjetivamente y desde la percepción de los autores del presente trabajo, la forma de establecer una estrategia basada en TIC, cuando se tiene por objeto implementar un modelo de gestión de conocimiento que apoya la ejecución de

BPGF en las IES. Todo se centra en la evaluación de TIC en la IES donde se pretende implementar el modelo de gestión de conocimiento propuesto, sin embargo, esta evaluación tiene como principales insumos actividades previas tales como la realización de una matriz DOFA, que toma en cuenta el estudio de la estructura y modelo de negocio de la IES, así como de un *benchmarking* con respecto a las TIC que han incorporado en sus procesos de gestión de información; de igual manera se deben analizar las posibilidades de innovación a través de la Investigación y Desarrollo (I+D).

Para clasificar las TIC identificadas a nivel interno y externo en la IES, se toma en cuenta la propuesta de [60] con respecto a la relación de tecnologías al momento de hacer un inventario de ellas. En este trabajo se asume la propuesta de la consultora Arthur D. Little:

- *Tecnologías Básicas*: No ofrecen ventajas competitivas al ser conocidas e implementadas por los competidores que tiene la organización.
- *Tecnologías Clave*: Permiten generar diferenciación frente a los demás competidores, por consiguiente, aportan a la obtención de ventajas competitivas.
- *Tecnologías Incipientes*: Son tecnologías que están en proceso de desarrollo pero que tienen el potencial de convertirse en tecnologías claves.
- *Tecnologías Emergentes*: Son tecnologías que están en su etapa inicial, pero, al igual que las tecnologías incipientes, la diferencia radica en que se desconoce su posible impacto en la organización.

Una vez se implementan estas tareas, se podrá generar un resultado de la evaluación de las TIC que influyen en la generación de valor para la IES, de tal manera que se pueda obtener un panorama claro al momento de utilizar una de las herramientas propuestas cuando se pretende proponer una estrategia tecnológica. Un ejemplo de esto es el árbol tecnológico dual, que sirve para que la empresa tenga una visión de conjunto de las diversas opciones tecnológicas. Se llaman duales porque en ellas figuran las tecnologías de producto y las de proceso.

Teniendo en cuenta que estas tecnologías afectan en cierta medida los productos y procesos, se incorpora en su análisis el resultado obtenido del acercamiento al área de estudio con respecto a los temas de gestión de competencias, gestión de conocimientos y BPGF, logrando así resultados que revelen información de valor para la propuesta de planes de acción orientados a un verdadero cambio desde la gestión de conocimiento en las IES. En este aspecto, [33] manifiesta que descubrir cómo usar las Tecnologías de Información y Telecomunicaciones... para generar un verdadero valor económico en las regiones de países en desarrollo, implica mucho más que seleccionar un buen equipo de cómputo, eficientes sistemas operativos o de información o una conectividad de alta velocidad, quedando reflejada a través del aporte del autor en mención, la necesidad no solamente de proponer un listado de las TIC que pueden ser útiles en diversos escenarios o situaciones problema que ameriten una solución basada en innovación, sino también el establecimiento de planes de acción orientados a facilitar la implementación de las TIC, de tal manera que se identifique su cooperación a la hora de tomar decisiones que respalden la gestión de los procesos dentro de las organizaciones.

Siguiendo con la descripción de la Figura 1, algunos interrogantes que guiarán el plan de acción asociado a las TIC que facilitarán la implementación de BPGF en las IES, son:

- ¿Cómo se aporta a la obtención de ventajas competitivas?
- ¿De qué manera se contribuye a la innovación con el uso de TIC que apoyan la implementación de BPGF en la IES?

- ¿Qué nuevas ideas innovadoras se pueden incorporar en los procesos de las IES?
- ¿Qué TIC básicas, claves, incipientes y emergentes se manejan en la IES?
- ¿Qué TIC son usadas por otras IES y cómo impactan sus procesos?
- ¿De acuerdo con la clasificación anterior y al *benchmarking* realizado, cuáles de esas TIC aportan a la implementación de BPGF en la IES?
- Tomando en cuenta las BPGF identificadas en la IES (en cada uno de sus procesos y a nivel corporativo) ¿Cómo se pueden implementar mediante el uso de las TIC identificadas?
- ¿Cuál es el tiempo estimado para poner en marcha la incorporación de las TIC en los procesos donde se identificaron BPGF?
- ¿Cuál es la inversión que deberá realizarse?
- Otros interrogantes que se generan de las respuestas a los interrogantes anteriores.

Con respecto a las IES, es importante señalar que existen unas de naturaleza privada y otras pública, que tienen como característica particular el apoyo financiero que el estado les otorga para su funcionamiento, razón por la cual los resultados que se obtienen de sus procesos deberán reflejar transparencia ante la sociedad, y esto se puede lograr a través del uso de TIC, que permitan identificarlas como herramientas facilitadoras en la gestión de información en las organizaciones. Por su parte, [29] menciona que cada vez más las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones se han convertido en una herramienta para mejorar la gestión de lo público y la relación Estado-ciudadano.

Esta opción de rendir cuentas ante el público se puede denotar como una BPGF en las IES públicas, porque la transparencia y la sostenibilidad financiera alcanzadas con méritos propios, pueden llegar a atraer organizaciones u otras IES, donde se promuevan BPGF como las mencionadas. Por su parte, [61] señala que La rendición de cuentas, sin ser el único lineamiento que se puede plantear para enfrentar el problema de la corrupción, debe ser de aplicación en todas las instituciones que conforman el Estado, así como en aquellas por medio de las cuales presta servicios y gozan de una autonomía.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian la importancia de las TIC para la gestión del conocimiento en las organizaciones, no obstante, se deben ver como un facilitador para la implementación de la gestión y no como su principal componente, porque el éxito de la misma depende los conocimientos relevantes a ser gestionados, de la pertinencia y viabilidad de la implementación de buenas prácticas en el contexto de la situación de interés abordada y de la cultura organizativa que debe proveer un ambiente idóneo para la transferencia de conocimiento e innovación, entre otros.

Por otra parte, se presenta la gestión del conocimiento como una fuente de ventajas competitivas para las organizaciones y una estrategia de soporte a la implementación BPGF que, gestionadas adecuadamente y atacando las barreras, principalmente lo relacionado con la estructura y cultura organizativa, pueden contribuir a la sostenibilidad financiera de las IES.

Finalmente, el proceso propuesto para incorporar las TIC en la implementación de BPGF en las IES, permitirá superar algunas de las barreras para la gestión de conocimiento en las organizaciones, desde una visión holística de la situación problema u oportunidades a abordar, con aportes teóricos y prácticos, siendo un punto de partida para futuras

investigaciones centradas en el desarrollo de modelos para gestionar el conocimiento en el proceso financiero de las IES.

Referencias

- [1] Canals, A. (2002). [¿Quo vadis, KM? La complejidad como nuevo paradigma para la gestión del conocimiento](#). Documento de trabajo. Universidad Abierta de Cataluña.
- [2] Viedma, J. (2000). [La gestión del conocimiento y del capital intelectual](#). Fundación Iberoamericana del Conocimiento.
- [3] Ordóñez, P. & Parreño, J. (2005). [Aprendizaje organizativo y gestión del conocimiento: un análisis dinámico del conocimiento de la empresa](#). Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa 11(1), pp. 165-177.
- [4] Davenport, T. & Klahr, P. (1998). [Managing customer support knowledge](#). California Management Review 40(3), pp. 195-208.
- [5] Pereira, H. (2011). [Implementación de la Gestión del Conocimiento en la empresa](#). Éxito Empresarial 135, pp. 1-6.
- [6] Saint, H. (1996). [Tacit knowledge the key to the strategic alignment of intellectual capital](#). Planning Review 24(2), pp. 10-16.
- [7] Sarvary, M. (1999). [Knowledge management and competition in the consulting industry](#). California Management Review 41(2), pp. 95-107.
- [8] Drucker, P., Argyris, C. & Brown, J. (2003). [Harvard business review: Gestión del Conocimiento](#). Bilbao: Ediciones Deusto.
- [9] Dutta, S. & De Meyer, A. (2001). [Knowledge management at Arthur Andersen \(Denmark\): Building assets in real time and virtual space](#). Knowledge management and business model innovation. Idea Group Publishing, pp. 284-401.
- [10] Salazar, J. (2003). [Gestión del conocimiento: Origen e implicaciones organizativas](#). Foro ESINE Centro de Estudios Técnicos Empresariales (17), pp. 25-27.
- [11] Echavarren, A. (2009). [Creación de un Marco de Competencias para la Evaluación del Rendimiento de los Gestores de Sistemas de Información en las Grandes Organizaciones](#). Tesis Doctoral. Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Alcalá.
- [12] Sánchez, M. (2012). [El capital intelectual y su relación con diferentes gestiones: estudio teórico-conceptual](#). Ciencias de la Información 43(3), pp. 3-13.
- [13] Pinto, L., Becerra, L. & Gómez, L. (2012). [Carencias en los sistemas de gestión del conocimiento: Una revisión bibliográfica](#). El Profesional de la Información 21(3), pp. 268-276.
- [14] Alberto, C. & Romero, R. (2012). [Una interpretación del concepto de gestión del conocimiento de Nonaka y Takeuchi usando la ficción literaria](#). Apuntes del CENES 31(54), pp. 227-260.
- [15] Pérez, D. & Dressler, M. (2007). [Tecnologías de la información para la gestión del conocimiento](#). Intangible Capital 3(15), pp. 31-59.
- [16] Mintzberg, H. (1984). [Power and Organization Life Cycles](#). Academy of Management Review 9(2), pp. 207-224.
- [17] Park, H., Ribiere, V & Schulte Jr, W. (2004). ["Critical attributes of organizational culture that promote knowledge management technology implementation success](#). J. of Knowledge Mana. 8(3), pp. 106-117.
- [18] Rodríguez, D. (2006). [Modelos para la creación y gestión del conocimiento: Una aproximación teórica](#). Educar (37), pp. 25-39.
- [19] Suresh, R. (2002). [Knowledge management – An Overview](#). Online [Nov 2015].
- [20] Davenport, T. & Prusak, L. (1998). [Working knowledge: How organizations manage what they know](#). USA: Harvard Business Press.
- [21] Perez, S., Montes, J. & Vazquez, C. (2004). [Managing knowledge: the link between culture and organizational learning](#). Journal of Knowledge Management 8(6), pp. 93-104.
- [22] Nagles, N. (2007). [La gestión del conocimiento como fuente de innovación](#). Revista EAN 61, pp. 77-88.
- [23] González, A., Joaquín, C. & Collazos, C. (2009). [Karagabi Kmmodel: Modelo de referencia para la introducción de iniciativas de gestión del conocimiento en organizaciones basadas en conocimiento](#). Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería 17(2), pp. 223-235.
- [24] Pinto, J. (2007). [Sistemas de gestión de competencias basados en capacidades y recursos y su relación con el sistema SECI de gestión del conocimiento, realizadas por las pequeñas empresas del Urola Medio \(España\)](#). Estudios Gerenciales 23(105), pp. 13-38.
- [25] Peluffo, M. (2010). [Gestión del conocimiento tácito: buenas prácticas y lecciones aprendidas en la internacionalización universitaria](#). Innovación Educativa 10(51), pp. 43-55.
- [26] Gil, A. & Carrillo, F. (2013). [La creación de conocimiento en las organizaciones a partir del aprendizaje](#). Intangible Capital 9(3), pp. 730-753.

- [27] Forés, B. & Camison, C. (2008). *La capacidad de absorción de conocimiento : factores determinantes internos y externos*. Dirección y Organización 36, pp. 35–50.
- [28] Nonaka, I., Toyama, R. & Konno, N. (2000). *SECI, Ba and Leadership: a Unified Model of Dynamic Knowledge Creation*. Long Range Planning 33, pp. 5–34.
- [29] MinTIC. (2015). *Manual para la implementación de la Estrategia de Gobierno en línea en las entidades del orden nacional de la República de Colombia*. Ministerio de las TIC, pp. 1–94.
- [30] Cobo, J. (2009). *El concepto de tecnologías de la información. Benchmarking sobre las definiciones de las TIC en la sociedad del conocimiento*. Revista Zer 14(27), pp. 295–318.
- [31] Cobo, A. (2006). *Modelo de capital intelectual de la Consejería de Educación de la Junta de Andalucía. Indicadores de capital humano y gestión del conocimiento*. Tesis Doctoral. Departamento de Economía y Administración de Empresas, Universidad de Málaga.
- [32] Plaz, R. & González, N. (2004). *La gestión del conocimiento organizativo. Dinámicas de agregación de valor en la organización*. Economía industrial 357, pp. 41-54.
- [33] Scheel, C. (2004). *Tecnologías de Información. El impacto económico de las tecnologías de información y telecomunicaciones*. Rev. Digital de Posgrado, Investigación y extensión del campus Moterrey 17(65).
- [34] García, M. (2013). *El rol de las tecnologías de la información y comunicación en la gestión del conocimiento : un desafío estratégico en el nuevo contexto empresarial*. Revista de Ciencias Sociales 19(2), pp. 322–333.
- [35] Mejía, J. & Muñoz, M. (2015). *Tendencias en Tecnologías de Información y Comunicación*. RISTI E3(03), pp. vii-xi.
- [36] Riascos, S. & Aguilera, R. (2011). *Herramientas TIC como apoyo a la gestión del talento humano*. Cuadernos de Admistración 27(46), pp. 141-154.
- [37] Torres, S. et al. (2012). *Morelos, ¿hacia una Sociedad del Conocimiento? consideraciones a partir del desarrollo de la ciencia, la educación superior y las TIC*. Rev. Elect. de Invest. Educativa 14(2), pp. 34–51.
- [38] Pinto, L., Becerra, L. & Gómez, L. (2013). *Marco de trabajo para la gestión de conocimiento en la gestión financiera sostenible de Instituciones de Educación Superior Públicas*. Tesis de Maestría. Escuela de Ingeniería Industrial. Universidad Industrial de Santander,.
- [39] Mentefactura (2015). *Estrategia de Sostenibilidad Financiera del Sistema Nacional de Áreas Protegidas*. Ministerio del ambiente, Ecuador.
- [40] *Consultoría Empresarial*. Unab. Online [Jan 2016].
- [41] Aguilà, S. (2016). *En busca de la suficiencia financiera en la universidad pública española: De la financiación al control y la gestión de costes*. Intangible Capital 12(1), pp. 17–50.
- [42] Angelelli, P. & Prats, J. (2005). *Fomento de la actividad emprendedora en América Latina y el Caribe: Sugerencias para la formulación de proyectos*. Banco Interamericano de Desarrollo, Washington.
- [43] Lagunes, L. et al. (2014). *Innovación y emprendimiento a la luz del contexto Latinoamericano. Guía de mejores prácticas para el impulso de la actividad emprendedora basada en la innovación*. Lima: CLADEA.
- [44] ULEOnline. *Servicios a Empresas e Instituciones*. Universidad de León. Online [Nov 2015].
- [45] *Servicios para las empresas*. Universitat de Barcelona. Online [Jan 2016].
- [46] *Servicios para empresas*. Universidad EAFIT. Online [Dec 2015].
- [47] *Foro Mundial de Negocios*. Tecnológico de Monterrey. Online [Dec 2015].
- [48] Rojas, A. & Solorzano, K. (2009). *Análisis y síntesis de los cursos especiales de grado*. Trabajo de Grado. Universidad del Oriente, Venezuela.
- [49] Rico, A. (2016). *La gestión educativa: Hacia la optimización de la formación docente en la educación superior en Colombia*. Sophia Revista de Investigacioness 12(1), pp. 55-70.
- [50] Rama, C. & Cevallos, M. (2015). *La metamorfosis de la educación a distancia en América Latina. Una nueva fase marcada por el ingreso de proveedores internacionales*. Revista Española de Educación Comparada 26, pp. 41–60.
- [51] Pichardo, A. (2016). *Internacionalización de la educación superior en Costa Rica. La experiencia de una maestría de doble titulación de la Universidad Nacional*. Revista de la Facultad de Ciencias Sociales - ABRA 36(52), pp. 1–13.
- [52] Corti, A., Oliva, D. & De la Cruz, S. (2015). *La internacionalización y el mercado universitario*. Revista de la Educación Superior 44(174), pp. 47–60.
- [53] Prieto, L., Valderrama, C. & Allain-Muñoz, S. (2015). *Internacionalización en casa en la educación superior: Los retos de Colombia*. Revista Internacional de Cooperación y Desarrollo 2(2), pp. 105–135.
- [54] Chang, H. (2010). *El modelo de la triple hélice como un medio para la vinculación entre la universidad y empresa*. Revista Nacional de Administración 1(1), pp. 85–94.
- [55] López, F. (2016). *Educación Superior Comparada: Tendencias Mundiales y de América Latina y Caribe*. Avaliação, Campinas; Sorocaba, SP 21(1), pp. 13–32.
- [56] Didriksson, A. (2004). *La universidad desde su futuro*. Pró-Posições 15(3), pp. 63–73.
- [57] De Sousa, B. (2010). *La universidad en el siglo XXI. Para una reforma democrática y emancipadora de la*

- unviuersidad. En Ramírez, R. (Ed.), Transformar la Universidad para Transformar la Sociedad (pp. 139–194). Quito: Senplades.
- [58] Gaete, R. (2015). [El concepto de responsabilidad social universitaria desde la perspectiva de la alta dirección](#). Cuadernos de Administración 31(53), pp. 97–107.
- [59] Porter, M. (2013). [Ventaja Competitiva. Creación y sostenimiento de un desempeño superior](#). México: Grupo Editorial Patria.
- [60] Escorsa, P. & Valls, J. (2001). [Tecnología e innovación en la empresa. Dirección y gestión](#). Madrid: Alfaomega.
- [61] Católico, D. (2012). [Revelación y Divulgación de la Información Financiera y No Financiera de las Universidades Públicas en Colombia](#). Revista de la Facultad de Ciencias Económicas - Universidad de la Salle 20(1), pp. 57–76.

9. Aplicación para evaluar requerimientos financieros en el Grupo TCC usando cartas de residuales: Caso flota vehicular

Jorge Pérez R.¹

Leandro Muñoz G.²

Pedro Urrego S.³

^{1,2} IDINNOV Unidad de Ciencia de Datos Empresariales. Colombia

³ Grupo Logístico TCC. Colombia

1. Introducción

La gestión efectiva de los procesos financieros de una organización es importante para un óptimo desempeño, porque posibilita asignar de mejor manera los recursos y evitar pérdidas por decisiones incorrectas, entre otras bondades [1]. Un aspecto principal para mejorar la gestión de dichos procesos subyace en la necesidad de efectuar monitoreo y control oportuno de las variables financieras [2-5]. Esto posibilita advertir sobre comportamientos anormales en los procesos, generar alertas tempranas que permitan reaccionar a tiempo ante los cambios, brindar información de apoyo a la toma de decisiones y, en general, planear y programar de mejor manera los recursos.

El Grupo Logístico TCC es una organización colombiana que provee soluciones logísticas en la cadena de abastecimiento, a nivel nacional e internacional. En su portafolio se encuentra la prestación de servicios de paquetería, mensajería y carga masiva, entre otros. Dentro de su estructura, el área de Planeación Financiera es la encargada de la administración del presupuesto global de la operación de toda la organización. Conscientes de la importancia de sostener y superar los actuales niveles de gestión de los procesos financieros, la organización se ha orientado, entre otros frentes, al diseño y desarrollo de herramientas que le permitan lograr este propósito. Este llamado obedece a las siguientes oportunidades de mejora: 1) contar con una herramienta que aporte evidencia cuantitativa de mayor rigor para evaluar las solicitudes de presupuesto que se hacen desde las demás áreas; 2) facilitar labores de planeación y control de la ejecución presupuestal, dado que suelen consumir tiempo y recursos significativos; y 3) ante eventuales recortes de presupuesto, se desea contar con una herramienta que apoye el proceso racional de toma de decisiones y que oriente sobre formas efectivas de redistribuir los recursos entre las áreas de la empresa.

En vista de estas necesidades, justamente en el marco del monitoreo y control de los procesos, las cartas de control constituyen una herramienta de utilidad [6], aunque, tradicionalmente su uso ha tenido lugar en el contexto de la manufactura. No obstante, recientes estudios han aportado evidencia de que también pueden ser útiles para variables de naturaleza financiera, tales como ganancias, costos, ventas, ...) [7-9]. De hecho, han declarado la pertinencia de considerar la variación (común y especial) en los procesos financieros para ejercer un mejor control sobre ellos. Si bien el uso de las cartas de control en procesos financieros ha venido incrementándose, el tema aún se considera en infancia [1, 9, 10]. Por esto, la invitación que se hace desde la literatura es a realizar nuevos estudios desde diversos contextos de aplicación (diferentes variables financieras, entornos culturales, sectores económicos, ...) para seguir contribuyendo al tema [2, 8, 9].

Además de estos llamados, al analizar las expectativas de la organización contexto de estudio se han establecido dos requerimientos pragmáticos: 1) procedimientos simples de utilizar por parte de personal experto y no-experto en la empresa, lo que amerita un diseño en el que el usuario no tenga contacto con códigos o procedimientos de análisis

complejos; y 2) formas de actualización simples y rápidas, de modo que se asegure su uso y sostenimiento en el tiempo (evitar excesivo número de campos por actualizar). Ante estas oportunidades, se propuso desarrollar alternativas para evaluar solicitudes de presupuesto financiero, incorporando cartas de control entre otras herramientas. A través de ellas, se prevé la posibilidad de diferenciar eficientemente entre solicitudes comunes y especiales. Justamente, este trabajo se deriva de uno de los objetivos específicos de dicho proyecto y consiste en el desarrollo de una aplicación que facilite la puesta en práctica de dichas alternativas.

El alcance se delimita a variables de presupuesto de mantenimiento y funcionamiento de vehículos. Se trata de un componente del presupuesto global de la operación que comprende los recursos monetarios requeridos para que la flota de la organización (tracto-mulas, camiones y vehículos menores) realice su labor misional. Por otra parte, esta publicación tiene carácter aplicado, dirigida a la socialización de conocimiento tecnológico con participación del sector empresarial.

2. Materiales y métodos

En la Figura 1 se plasman las etapas metodológicas, en las que el tratamiento estadístico se llevó a cabo por medio de R (i386 3.2.1) [11] y RStudio (0.99.489) [12]. Para las cartas de control se usó el paquete *qcc* [13].

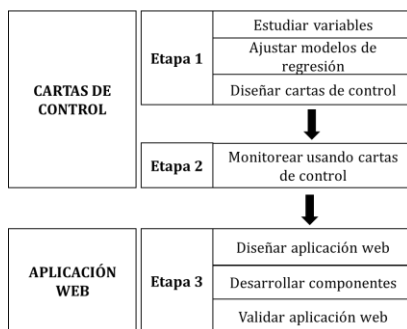


Figura 1. Etapas metodológicas para desarrollar la aplicación

2.1 Cartas de control de residuales

- *Etapa 1.* Esta etapa comprendió el estudio descriptivo de las 11 principales variables financieras que componen el presupuesto de mantenimiento y funcionamiento de vehículos de la empresa: llantas nuevas, llantas reencauchadas y combustible de vehículos de ruta nacional, por mencionar algunas. Las 11 cuentas elegidas representan cerca del 80 % del presupuesto en cuestión. Los estadísticos descriptivos incorporaron medidas de tendencia central, de variación y de localización. El estudio de las variables tuvo dos propósitos: 1) conocer las principales características y 2) validar supuestos teóricos para el diseño de cartas de control: normalidad e independencia de las observaciones.

En el contexto de las variables financieras es común que el segundo supuesto se incumpla (independencia), porque el comportamiento actual puede verse influenciado por reajustes derivados de situaciones previas. Por consiguiente, es de esperar que las variables financieras presenten auto-correlación [14]. Para superar esta limitación existen varias alternativas, tales como estrategias propias del análisis de series de tiempo; no obstante, en esta oportunidad se consideró viable explorar la *caja negra* que subyace en la variable *tiempo*, identificando posibles regresoras de la operación

logística, entre otras. Así, en caso de llegarse a modelos de regresión válidos y fiables, los residuales se asumirían independientes con distribución normal de media cero y varianza constante. En términos generales, cuando las cartas de control se orientan hacia los residuales de modelos de regresión, se conocen como cartas de control de residuales. Este tipo de cartas resulta pertinente ante violaciones de normalidad o independencia y, a pesar de declararse también en infancia en comparación con las cartas tradicionales de Shewhart, han mostrado utilidad en diversos campos, prevaleciendo los contextos de manufactura [15-17].

En el presente caso de estudio se generaron modelos de regresión para nueve de las 11 variables financieras consideradas, las cuales presentaron auto-correlación. Así, se ajustaron modelos de regresión lineal múltiple para cada una de ellas, en función de variables internas (operación logística; Ej. Unidades movidas, número de viajes realizados...) y externas (Ej. Precios, ...). Adicionalmente, tomando en cuenta uno de los requerimientos pragmáticos de la empresa de que la aplicación fuera de uso simple y rápida actualización en el tiempo, cada modelo (para las nueve cuentas) se procuró ajustar considerando, como mucho, dos variables regresoras. Más variables implicarían más tiempo y recursos para la actualización futura de la herramienta en la empresa, lo cual, sumado a las ocupaciones actuales, dificultaría su uso y sostenimiento. Otra razón para delimitar a máximo dos regresoras fue el limitado número de observaciones disponible.

Cada modelo de regresión se depuró (eliminación justificada de datos atípicos) y refinó (con base en la significancia global y de los términos individuales, y el coeficiente de determinación). Además, se validaron los supuestos estadísticos por medio del diagnóstico de residuales: normalidad, homocedasticidad e independencia. A fin de facilitar en la empresa la posterior interpretación de las cartas de control, en lugar de monitorear los residuales originales se generó una nueva variable, denominada *residuales escalados*. Dicha variable consistió en un cambio a escala porcentual de los residuales con respecto a los valores predichos por el modelo de regresión, según se indica en la Ecuación (1).

$$e_{ei} = \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{\hat{Y}_i} \times 100 \quad (1)$$

Como puede apreciarse en la ecuación (1), estos residuales escalados representan la proporción de desfase del valor solicitado de presupuesto, con respecto al valor ajustado por el modelo. De esta manera, los límites de control establecidos para los residuales escalados son específicos para cada variable e indican el porcentaje máximo, por encima o por debajo (dependiendo del signo), que se puede tolerar para calificar una solicitud de presupuesto en la categoría *común*. Cuando un residual escalado cae por fuera de los límites de control, indica que la diferencia entre el valor solicitado y el valor predicho por el modelo es lo suficientemente grande como para alertar de una posible situación *especial*, que amerita ser analizada y justificada.

La última parte de la Etapa 1 consistió en el diseño de las cartas de control para el monitoreo de las variables financieras, a través de los residuales escalados y de las observaciones originales para las dos variables que no presentaron auto-correlación. Para ello, se sometieron a prueba tres tipos de cartas que permitieran trabajar con observaciones individuales (Shewhart, CUSUM y EWMA), dado que las solicitudes de presupuesto se generan mensualmente (proceso no-masivo) [6]. La fijación de los límites de control *preliminares* se hizo considerando una región temporal lo más estable posible de la operación de la empresa (enero 2013-abril 2015), tanto desde lo

que reflejaron los datos disponibles como desde la experiencia de personal estratégico de Planeación Financiera.

Tras procedimientos de simulación de Montecarlo se evaluó la capacidad de detección de corrimientos de 1σ ; 1.5σ ; 2σ ; 2.5σ ; 2.7σ y 3σ . Además, se consideró el hecho de que para la organización es menos perjudicial tener falsas alarmas, a que ocurran situaciones fuera de control estadístico y no detectarlas. Al final, se concluyó que las cartas de control más adecuadas para este contexto particular era la carta de Shewhart de individuales de 2.7σ y la CUSUM (H = 4: desviaciones estándar para la fijación los límites de control; y L = 1: magnitud del corrimiento). El uso simultáneo de ambas cartas posibilita detectar pequeños corrimientos en la media y corrimientos superiores a 2.7σ , lo que le brinda a la empresa un panorama más amplio a la hora de comprender la variación del proceso financiero.

- *Etapa 2.* Una vez calibradas las cartas de control, se dio paso a la etapa de monitoreo de prueba. Para tal fin, la nueva región constó de seis observaciones adicionales (mayo – octubre de 2015). Esta etapa tuvo como propósito validar la capacidad de las cartas de control para diferenciar situaciones comunes y especiales justificadas en la empresa, considerando nuevos datos que no formaron parte de la región de calibración. Para las observaciones, que llegaron a reflejar comportamientos fuera de control, se dio paso a las indagaciones sobre posibles causas especiales.

2.2 Aplicación (Etapa 3)

La tercera etapa comprendió el diseño, el desarrollo y la validación de la aplicación. El proceso de diseño se llevó a cabo teniendo como premisa básica potenciar la usabilidad (facilidad, flexibilidad...) de la aplicación para el usuario. Tras realizar sesiones grupales con los usuarios, generar propuestas y recibir retroalimentaciones, el diseño elegido para la interfaz llevó a diferenciar el panel de control y el de resultados. En el panel de control, el usuario podrá seleccionar la variable financiera de estudio y las regresoras, por medio de listas desplegables; además, seleccionar la región temporal que desea abordar por medio de barras de desplazamiento. En el panel de resultados, el usuario podrá elegir, por medio de pestañas, los resultados que desea revisar (estadísticos descriptivos, normalidad, posibles datos atípicos, resultados del modelo de regresión, entre otros). Luego se procedió con el desarrollo de los componentes de la aplicación, que fue realizado en el paquete Shiny (0.13.2) [18]. Las aplicaciones desarrolladas bajo Shiny permiten automatizar las funciones creadas en R, en un entorno, de manera que respondan en tiempo real a cambios introducidos por el usuario a través de objetos tales como listas desplegables, cuadros de selección, botones, entre otros.

Culminada la etapa de desarrollo, la validación de la aplicación se llevó a cabo desde dos perspectivas: funcionamiento técnico y satisfacción del usuario. Con respecto al primero, se realizaron pruebas con cada una de las variables financieras y con diversas regiones temporales, a fin de verificar que la aplicación no se bloqueara y que arrojara los mismos resultados obtenidos desde códigos independientes en R. Con relación a la satisfacción del usuario, se consideró la retroalimentación constante del equipo de Planeación Financiera, con respecto a la usabilidad de la aplicación.

3. Resultados

Con el propósito de ilustrar los principales resultados obtenidos en las etapas metodológicas, a continuación, se describen para el caso concreto de la variable *consumo de presupuesto monetario de llantas nuevas*. A través de esta cuenta la organización

administra el valor, en dinero, que se consume en las llantas nuevas que se instalan en los vehículos, tanto de ruta nacional como de acarreo local. Por criterios de confidencialidad, los datos fueron estandarizados (restando su media y dividiendo entre su desviación).

3.1 Cartas de control

En la Figura 2 se muestra el gráfico de serie para el consumo estandarizado de presupuesto monetario de llantas nuevas, para toda la región disponible (enero 2012-abril 2015) al momento de la realización del estudio.

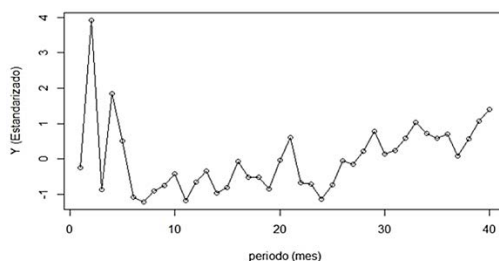


Figura 2. Consumo estandarizado de presupuesto monetario de llantas nuevas

Nótese la amplia variabilidad en los primeros meses de la serie (año 2012), en comparación con los demás. Ello se debe a que, en ese año, la organización realizó cambios estructurales relevantes e inversiones para la renovación de la flota vehicular. Adicionalmente, hubo una migración hacia nuevos sistemas informáticos. Se observa también que después de los primeros seis meses de 2012 el consumo de presupuesto monetario de llantas nuevas fue más homogéneo y con tendencia creciente. A modo de información complementaria, en la Tabla 1 se muestran las principales estadísticas descriptivas para el consumo estandarizado de presupuesto monetario de llantas nuevas. Estos resultados se estimaron considerando toda la región disponible (enero 2012 - abril 2015: 12-15) y tres subconjuntos de ella: enero 2013 - abril 2015 (13-15), enero 2014 - abril 2015 (14-15) y enero 2013 - diciembre 2014 (13-14).

Tabla 1. Estadística descriptiva para el consumo estandarizado de presupuesto

Estadística	Intervalo de tiempo			
	12-15	13-15	14-15	13-14
Media	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
IC.95. Inf.	-0.3198	-0.3878	-0.5329	-0.4223
IC.95. Sup.	0.3198	0.3878	0.5329	0.4223
Cuartil 1	-0.7435	-0.9141	-0.6419	-0.9502
Mediana	-0.1105	-0.0275	0.2270	0.0267
Cuartil 3	0.5830	0.8053	0.5593	1.0389
Mínimo	-1.2195	-1.6967	-2.2135	-1.6441
Máximo	3.9222	1.9487	1.7761	1.7324
Desviación	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
n	40	28	16	24

Con relación a la validación de los supuestos estadísticos que se precisan para diseñar las cartas de control, la Tabla 2 contiene los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilk (normalidad) y Durbin-Watson (auto-correlación) para las diferentes regiones. Respecto a la prueba de normalidad, los resultados muestran que cuando se consideraron las observaciones del año 2012 (región 12-15), el valor-p arrojado en la evaluación en la prueba de Shapiro-Wilk es inferior al umbral de significancia de 0,05. Ello es consistente con lo mencionado sobre las inversiones especiales realizadas en la organización y los cambios estructurales. La prueba de Durbin-Watson tiene como propósito explorar si hay o no evidencia de auto-correlación en la muestra de datos [14]. En términos generales, *d*

= 2 infiere que en la muestra no la hay. Cuando d es cercano a cero (0) refleja la existencia de auto-correlación positiva en las observaciones. Como regla general, un valor d inferior a 1 da cuenta de auto-correlación positiva significativa.

Tabla 2. Resultados de las pruebas de normalidad y auto-correlación

Periodo	n	Shapiro-Wilk		Durbin-Watson (orden 1)	
		Estad.	Val-p	Estad.	Result.
12-15	40	0.8713	0.0003	0.5166	Autoc pos. ($d < 1$)
13-15	28	0.9644	0.4399	0.1004	Autoc pos. ($d < 1$)
14-15	16	0.9784	0.9496	0.0476	Autoc pos. ($d < 1$)
13-14	24	0.9472	0.2353	0.1198	Autoc pos. ($d < 1$)

Los resultados de la Tabla 2 muestran que, para todas las regiones, en la muestra hay auto-correlación positiva. Nótese que en todos los casos el valor del estadístico de Durbin-Watson es inferior a 1 y, de hecho, relativamente cercano a cero (0). Siendo más precisos, con una significancia de 0.05, dos regresoras y un tamaño de muestra de 15 observaciones, el valor crítico es 0.95 (dL). Asimismo, bajo estos mismos criterios, pero con un tamaño de muestra de 40 datos, el valor crítico es 1.39 (dL). Observar que en todos los casos de la Tabla 2, el estadístico calculado sigue siendo menor que los valores críticos. Concretamente, hay evidencia de una auto-correlación significativa de orden 1, es decir, una correlación significativa entre la serie de tiempo y una versión desplazada de la misma, un periodo atrás ($l = 1$) [11]. Esto es consistente con el análisis de la Figura 1.

En términos de la validación de los supuestos estadísticos, los resultados de las pruebas de normalidad y auto-correlación permiten concluir que: 1) no conviene considerar toda la región de datos disponibles para diseñar las cartas de control, dado que 2012 presentó situaciones no comunes justificadas que ya no hacen presencia en la operación (tanto desde los datos como desde la voz de personal estratégico de Planeación Financiera). 2) No es viable monitorear tal cual la variable del presupuesto tomada como ejemplo, porque en todas las regiones se dedujeron presencia de auto-correlación positiva significativa.

Teniendo esto en consideración, se procedió a ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para explicar el consumo de presupuesto monetario de llantas nuevas en función de una variable de la operación y un indicador externo. Para ello, se usó como región de calibración enero de 2013 - abril de 2015 (13-15). Las observaciones de 2012 se descartaron debido a que las condiciones de funcionamiento fueron diferentes a las actuales. El refinamiento del modelo implicó la eliminación justificada de dos observaciones atípicas (abril y septiembre de 2013: eventos especiales de mantenimiento, periodos 16 y 21 en la Figura 2). Al final, el modelo probó ser significativo en estructura y en cada uno de sus coeficientes (valores-p menores a 0.05), logrando explicar el 84.66% de la variación (R^2). Los supuestos estadísticos del modelo, para los residuales, también se aceptaron. La Tabla 3 consolida los resultados de las pruebas de normalidad y de auto-correlación para los residuales escalados. Al eliminar los dos datos atípicos de la muestra, el tamaño final de la región de calibración fue de 26 observaciones.

Tabla 3. Pruebas de normalidad y auto-correlación para los residuales escalados

Periodo	n	Shapiro-Wilk		Durbin-Watson (orden 1)	
		Estad.	Val-p	Estad.	Result.
Región de calibración (13-15)	26	0.9750	0.7599	2.0634	No autoc ($d \cong 2$)

En el caso de los residuales escalados, las pruebas de normalidad y auto-correlación permitieron trabajar bajo los supuestos para el diseño de las cartas de control. A modo de complemento, la Figura 3 ilustra el histograma para los residuales escalados.

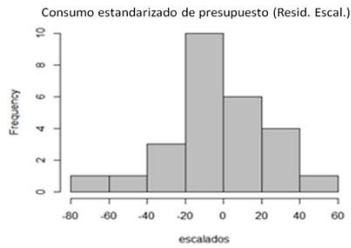


Figura 3. Histograma para los residuales escalados

Asegurados los supuestos de base para diseñar las cartas, se procedió a calcular los límites de control estadístico con base en esta región de calibración. La Figura 4 ilustra la carta de individuales (de 2.7σ) para los residuales escalados, generada en R. La línea punteada vertical, en la carta, separa la región de calibración (izquierda) de la región de monitoreo (derecha). Para poner a prueba el desempeño de las cartas de control se monitorearon las nuevas observaciones del 2015 (mayo – octubre).

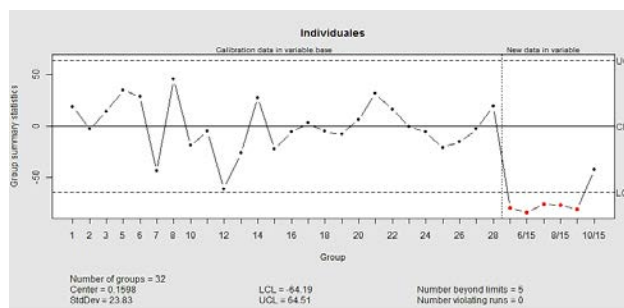


Figura 4. Carta de individuales para residuales escalados

Los límites de control para la carta de individuales se estimaron en $\pm 64\%$ (líneas horizontales punteadas, Figura 4). Ello quiere decir que, según la variación histórica, lo común es que el desfase (%) entre el consumo real de presupuesto y el predicho por el modelo, con respecto a este último, no exceda $|\pm 64\%|$. Por tanto, cuando un residual escalado cae por fuera de la región delimitada por estas bandas, hay razones para sospechar de una posible causa especial de variación (proceso fuera de control estadístico).

Evaluando el desempeño de la carta de individuales para los residuales, se aprecia que las observaciones recientes, monitoreadas, cayeron por fuera del límite inferior de control, alertando sobre posibles causas especiales de variación. Para comprender esto, vale mencionar que, en el modelo ajustado, el número de llantas desechadas fue una de las dos variables regresoras del consumo de presupuesto monetario de llantas nuevas. Tras indagar con el personal del taller mecánico de la empresa, se encontró que cerca de estos meses en 2015, ocurrió un inconveniente en las instalaciones del proveedor encargado de retirar las llantas desechadas. Esto obligó a acumular llantas de desecho en las instalaciones propias durante los meses siguientes. Una de las hipótesis que sobresale es que las llantas de desecho de meses previos también fueron contabilizadas en meses posteriores, porque no se les da de baja hasta que el proveedor las retire. Tal situación es propia del método de registro, más no tendría que generar consumo adicional de presupuesto de llantas nuevas. Otra de las hipótesis tiene que ver con posibles cambios en las políticas de negociación con proveedores (Descuentos por volumen, etc.), motivadas por el aumento justificado de llantas por renovar. Esto, a su vez, originado porque vehículos nuevos ingresaron a la flota de la organización periodos atrás y, en 2015, comenzaron a demandar renovación de llantas.

No obstante, estas hipótesis, entre otras que han surgido, aún continúan en estudio y se está a la espera de nuevos datos e indagaciones con otros colaboradores, para someterlas a prueba y verificar si el proceso regresa al comportamiento reflejado hasta abril de 2015. De no ser así, tendría que estudiarse un posible cambio de nivel del proceso y actualizar los límites de control. Gracias al objeto de este trabajo (el desarrollo de la aplicación), es posible detectar de forma rápida y simple posibles situaciones especiales, así como motivar la indagación, la generación de hipótesis y realizar las actualizaciones necesarias cuando la situación lo amerite. De manera complementaria, la Figura 5 ilustra la carta CUSUM ($H = 4$, $L = 1$), considerando la misma región de monitoreo explorada en la carta de individuales. La CUSUM detectó el residual escalado de junio de 2015 como un punto por fuera de control, por una situación especial que probablemente inició un mes antes. De ahí en adelante, resalta la aparente continuidad de tal suceso.

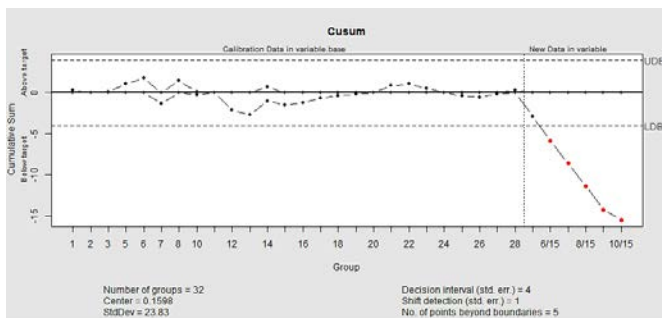


Figura 5. CUSUM para residuales escalados

3.2 Aplicación

La Figura 6 muestra un extracto de la aplicación desarrollada para la evaluación de solicitudes de presupuesto de mantenimiento y funcionamiento de vehículos del Grupo Logístico TCC. A través de esta aplicación se automatizan y se articulan todos los componentes de análisis, conformando una herramienta tecnológica que sirve como apoyo a la gestión de los procesos financieros en la organización y a la toma de decisiones en general.

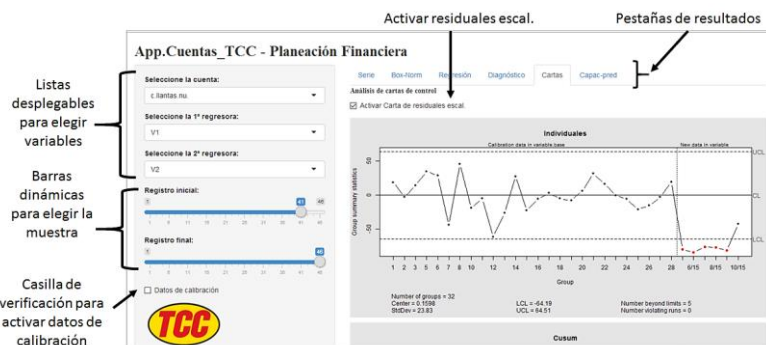


Figura 6. Panel de control principal y extracto de la interfaz de resultados de la aplicación

- Panel de control principal.** En la parte izquierda de la interfaz se encuentra el panel de control. Este posee una lista desplegable a través de la cual el usuario tiene la posibilidad de elegir la variable financiera (cuenta) que desea evaluar. También tiene a disposición dos listas desplegables, mediante las cuales puede elegir las variables regresoras que desea considerar, para explorar posibles modelos de regresión. No obstante, la aplicación carga por defecto, para cada variable financiera, las regresoras originalmente identificadas en la modelación.

En la parte central del panel de control se cuenta con dos barras dinámicas de desplazamiento, que sirven para elegir la región temporal (muestra) que se desea estudiar. El *registro inicial* (barra dinámica superior) demarca el punto de partida (mes). Por defecto, el registro inicial 1 corresponde a enero de 2012. El *registro final* señala la última posición (mes) de la ventana de tiempo, por ejemplo, el punto 12 corresponde a diciembre de 2012, y así sucesivamente. En la parte inferior del panel de control, la aplicación cuenta con una casilla de verificación denominada *Datos de calibración* que, cuando se activa, las cartas de control y demás resultados se generan usando únicamente los datos que conformaron la región de calibración (región estable). De hecho, cuando se activa, las barras de desplazamiento se inhabilitan.

- *Panel de resultados.* A la derecha del panel de control se encuentra el panel de resultados. Los componentes que lo integran son: 1) *Pestaña Cartas*, donde la aplicación arroja las cartas de control de individuales y CUSUM, considerando los datos (región temporal) y la variable financiera, elegidos. En la parte superior del panel, arriba de la carta de individuales, se dispone de otra casilla de verificación (*Activar Carta de residuales escal*), en la que el usuario elige si desea que las cartas de control se generen considerando las observaciones originales, o haciendo uso de los residuales escalados. Recuérdese que los residuales escalados arrojados por los modelos de regresión son útiles para monitorear variables cuyas observaciones originales presentan auto-correlación, etc. Para visualizar la carta CUSUM basta con que el usuario se desplace hacia abajo (*scroll*) en la interfaz.

2) *Otras pestañas.* A modo de complemento, la aplicación cuenta con otras pestañas que brindan información sobre la naturaleza estadística de las variables bajo estudio, haciendo posible profundizar en la muestra elegida para la elaboración de las cartas. La primera de ellas es la pestaña *Serie*. En primera instancia, arroja los gráficos de serie correspondientes, bajo los cuales el usuario puede examinar el comportamiento de los datos en el tiempo. También presenta el resumen estadístico, en forma de tabla, de las principales medidas de tendencia central, variabilidad y localización para las cuentas y para las regresoras.

La segunda pestaña se denominó *Box-Norm* y genera los diagramas Box-Plot y los gráficos de normalidad (Q-Q plot), tanto para la variable financiera como para las regresoras. Por medio de estos gráficos el usuario puede examinar la distribución de los datos e identificar la presencia de posibles valores *extraños* en la muestra. Particularmente, los gráficos de normalidad fueron programados de manera que también muestren el resultado de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (valor- p).

La tercera pestaña incorporada en la aplicación se denominó *Regresión*, la cual genera los resultados, en forma de tabla, del modelo de regresión ajustado para la variable financiera elegida (Y) y las variables regresoras (X). Dicha tabla contiene los valores de los coeficientes individuales estimados, los valores p (para los coeficientes y para el modelo), el error estándar asociado, el coeficiente de determinación y el tamaño de muestra (según la región que haya elegido el usuario). Adicionalmente, en la parte inferior se genera el diagrama de dispersión (con correlaciones), a través del cual el usuario puede explorar la posible asociación entre pares de variables.

La cuarta pestaña es *Diagnóstico* y le brinda al usuario la posibilidad de efectuar la validación de los supuestos teóricos, que se deben cumplir para que el modelo de regresión ajustado se considere válido. En esa vía, esta pestaña presenta el diagnóstico de los residuales (gráficos de: normalidad Q-Q, ajuste, residuales vs valores predichos, y residuales vs regresoras).

La pestaña *Capac-Pred* le posibilita al usuario efectuar un análisis de la capacidad de cumplimiento del presupuesto a nivel mensual y por periodo (varios meses). Dicho análisis se basa en lo siguiente: a través de un cuadro de texto, el usuario ingresa el incremento (%) máximo en el valor medio estimado del consumo de presupuesto, según el modelo de regresión ajustado con los datos de calibración. Ante este escenario de incremento, la aplicación estima el valor total consumido en el periodo, la diferencia con respecto al valor real y la probabilidad de cumplimiento del presupuesto, tanto a nivel mensual como del periodo proyectado. Para ilustrar una de las pestañas complementarias, en la Figura 7 se muestran los resultados de la pestaña *Box-Norm* para el caso del consumo de presupuesto monetario de llantas nuevas (la aplicación arroja resultados en unidades originales, por tanto, se omiten las escalas de valores).

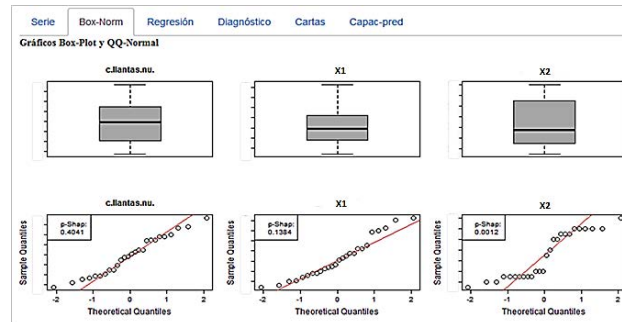


Figura 7. Ejemplo de resultados de la pestaña *Box-Norm*

3.3 Actualización y flexibilidad de la aplicación

La aplicación cuenta internamente con un archivo de datos (en hoja electrónica para facilidad de la empresa), que se puede actualizar permanentemente para incorporar las nuevas observaciones de las variables financieras que se generan en el tiempo. Para tal efecto, basta con ingresar los nuevos datos y actualizar el archivo de hoja electrónica. Una vez hecho esto, basta ejecutar la aplicación y automáticamente se leerá la nueva información disponible, usando XLConnect [19]. Es decir, adapta el panel de control de manera que se abarque, tanto en las listas desplegadas (selección de variables) como en las barras de desplazamiento (región temporal), la nueva información incorporada, para luego actualizar los resultados. Esta flexibilidad aplica no solamente para ingresar nuevas observaciones para las variables existentes, sino también para incorporar nuevas variables, por lo que la aplicación es una herramienta fácil de administrar y actualizar.

3.4 Validación de la aplicación

Para validar la consistencia técnica de la aplicación, los resultados en cada una de las pestañas fueron replicados usando código independiente en el entorno R, para luego compararlos entre sí. En la Tabla 4 se plasman los criterios que se usaron para validar el funcionamiento técnico de la aplicación. En términos generales, los resultados de esta validación sacaron a flote algunas irregularidades en el funcionamiento de la aplicación. Por ejemplo, para el consumo de presupuesto monetario de lubricante de vehículos de ruta nacional y para el de combustible de vehículos de acarreo local, los signos de los coeficientes de correlación (diagrama dispersión-correlación) no fueron acordes con lo obtenido mediante código independiente. Para estas inconsistencias se identificaron las causas y se hicieron los ajustes. En general, todo el procedimiento de validación técnica sirvió para identificar oportunidades de mejora y de realizar los ajustes del caso, hasta llegar a la versión final: una aplicación fiable (consistente) y simple de usar/actualizar desde el punto de vista del usuario.

Tabla 4. Criterios de validación de la consistencia técnica de la aplicación

Elemento	Criterios de validación
Panel de control principal	Las listas de selección funcionan correctamente
	Cargan por defecto los predictores elegidos en la modelación
	Las barras dinámicas funcionan correctamente
	La casilla de verificación funciona correctamente
Panel de resultados	Los resultados de la pestaña "Serie" son reproducibles en R
	Los resultados de la pestaña "Box-Norm" son reproducibles en R
	Los resultados de la pestaña "Regresión" son reproducibles en R
	Los resultados de la pestaña "Diagnóstico" son reproducibles en R
	Los resultados corresponden al tipo de datos (residuales u originales) elegido en la casilla de verificación
	Los resultados de la pestaña "Cartas" son reproducibles en R
	Los resultados de la pestaña "Capac-pred" son reproducibles en R

4. Conclusiones

Se desarrolló una aplicación que facilita la evaluación de solicitudes de presupuesto de mantenimiento y funcionamiento de vehículos del Grupo logístico TCC, incorporando cartas de control entre otras herramientas. Se construyó considerando lineamientos teóricos y requisitos pragmáticos de la organización, a fin de potenciar su uso y sostenimiento en el tiempo. Todo esto, tendiente a contribuir con la necesidad que tiene la empresa de desarrollar herramientas que le permitan evaluar, bajo criterios más robustos, las solicitudes de presupuesto realizadas por las áreas. La aplicación demostró ser útil y flexible para monitorear las variables de presupuesto objeto de estudio y para generar alertas oportunas de posibles eventos especiales, mediante el uso simultáneo de cartas de individuales y CUSUM. En el marco de una corriente emergente, este trabajo aporta evidencia a la literatura sobre la pertinencia y utilidad de usar cartas de control para monitorear variables financieras.

A nivel metodológico, se evidenció la utilidad de usar cartas de residuales sobre variables de presupuesto financiero. El uso de los residuales en cartas de control, en vez de los valores originales, constituye una alternativa válida y razonable ante la presencia de auto-correlación. Asimismo, la alternativa de los residuales escalados (porcentaje de desfase de los valores originales con respecto a los predichos) facilitó la interpretación práctica de los resultados en la organización.

En general, este trabajo es un llamado a la necesidad de diferenciar la variación (común y especial) en variables de presupuesto financiero, en favor de mejores procesos de toma de decisiones en las empresas. Desconocer la variación histórica de los datos y tomar decisiones solamente con base en medidas de tendencia central o modelos mentales, puede resultar perjudicial. En ese sentido, por ejemplo, una disminución transitoria de los costos medios no necesariamente es evidencia de que los procesos financieros están mejorando, porque dicho comportamiento podría deberse a la variabilidad natural del proceso. Por ello, resulta útil considerar de forma conjunta la variabilidad histórica del proceso y el monitoreo actual, mediante cartas de control, a fin de diferenciar eficientemente entre eventos especiales (nuevos métodos, mejores prácticas, políticas especiales, anomalías, ...) y comunes (inherentes a la naturaleza del proceso).

El uso de la aplicación puede ser útil en procesos de toma de decisiones relacionados con la ejecución y el control presupuestal en la organización, al tiempo que podría ayudar a simplificar las labores requeridas para la planeación del presupuesto. También, se evidencia el valor de los procesos de investigación aplicada y desarrollo tecnológico al

interior de las organizaciones, para generar alternativas efectivas ante diversos retos u oportunidades de mejora en el medio empresarial.

5. Trabajos futuros

Se está trabajando en tres frentes: 1) Validación confirmatoria de los límites de control, con datos de todo un año (posterior al diseño), estando alertas no solamente a posibles eventos fortuitos sino también a eventuales cambios de nivel por acciones previamente planeadas en la organización. 2) Explorar el impacto del uso de la aplicación en los procesos de toma de decisiones en la organización, tanto desde la reacción temprana ante eventos especiales, como desde su connotación predictiva. Esto último, en procesos de proyección presupuestal para años siguientes, considerando duración, uso de recursos, satisfacción y cumplimiento del presupuesto. 3) Se está preparando otra publicación, de carácter teórico-cuantitativo, que complementa esta divulgación de carácter aplicado desde el sector productivo.

Agradecimientos

Al Grupo Logístico TCC, especialmente a todo el equipo de Planeación Financiera. Este documento es uno de los varios productos derivados de un proyecto de investigación aplicada, orientado al diseño, desarrollo y puesta a punto de un modelo de evaluación de solicitudes de presupuesto, que incorpora diversas herramientas. Dicho proyecto fue aprobado para beneficio tributario en la convocatoria 691/14 de Colciencias. Se agradece al Consejo Nacional de Beneficios Tributarios y, en general, al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación – Colciencias.

Referencias

- [1] Kovářík, M., Sarga, L., & Klímek, P. (2015). [Usage of control charts for time series analysis in financial management](#). *Journal of Business Economics and Management* 16 (1), pp. 138-158.
- [2] Marrero, M. et al. (2014). [Schedule and Cost Control in Dwelling Construction using Control Charts](#). *Open Construction and Building Technology Journal* 8, pp. 63-79.
- [3] Mohamed, B. (2010). [Cost estimation of construction projects during design stage in Iraq using control charts](#). In *Proceedings Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering* (pp. 238-247). Winnipeg, Canada.
- [4] Nassar, K., Nassar, W., & Hegab, M. (2005). [Evaluating cost overruns of asphalt paving project using statistical process control methods](#). *Journal of Construction Engineering and Management*, 131 (11), pp. 1173-1178.
- [5] Smolko, J. & Greisler, D. (2001). [Understanding medical group financial and operational performance: The synergistic effect of linking statistical process control and profit and loss](#). *Journal of Health Care Finance* 27 (3), pp. 64-75.
- [6] Gutiérrez, H. & De La Vara, R. (2009). *Control estadístico de la calidad y seis sigma*. México: McGraw-Hill.
- [7] El Ghourabi, M., Dridi, A. & Limam, M. (2015). [A New financial stress index model based on support vector regression and control chart](#). *Journal of Applied Statistics* 42 (4), pp. 775-788.
- [8] Aliverdi, R., Naeni, L. & Salehipour, A. (2013). [Monitoring project duration and cost in a construction project by applying statistical quality control charts](#). *International Journal of Project Management* 31 (3), pp. 411-423.
- [9] Kovarik, M. & Sarga, L. (2014). [Implementing control charts to corporate financial management](#). *WSEAS Transactions on Mathematics* 13, pp. 246-255.
- [10] Dimaki, K. et al. (2011). [Measuring the effect of financial incentives on a region's development: A statistical process control approach](#). *Intern. Journal of Applied Systemic Studies* 4 (1-2), pp. 37-64.
- [11] R Project (2008). [R: A language and environment for statistical computing](#). R Foundation for Statistical Computing, Austria.
- [12] R Studio Team (2015). [RStudio: Integrated Development for R](#). RStudio, Inc., Boston, USA.
- [13] Scrucca, L. (2004). [qcc: An R package for quality control charting and statistical process control](#). *R News* 4(1), pp. 11-17.

- [14] Montgomery, D., Jennings, C. & Kulahci, M. (2008). [Introduction to time series analysis and forecasting](#). New Jersey: Wiley.
- [15] Tsai, T. & Chen, L. (2009). [Monitoring of the stencil printing process using a modified regression residual control chart: an empirical study](#). International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice 16(4), pp. 248-259.
- [16] Desa, N., Jemain, A. & Kasim, M. (2015). [Residual Control Chart for Monitoring Pediatrics Hospital Admission Performances](#). Contemporary Engineering Sciences 8 (32), pp. 1509 – 1515.
- [17] Yu, J. et al. (2015). [Self-related Process Residual Control Chart Based on Neural Network](#). In International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling. London, UK.
- [18] [Web Application Framework for R](#). Online [Feb. 2016].
- [19] [XLConnect: Excel Connector for R](#). Online [Jan 2016].

10. Propuesta metodológica para la evaluación de la amenaza de corredores viales de montaña de la red vial nacional

Edison Garzón M.

Universidad La Gran Colombia. Colombia

1. Introducción

La infraestructura vial permite la comunicación de personas, bienes y servicios entre las diferentes regiones, debido a que es el principal modo de transporte en el país. Con base en la identificación y mapeo de amenazas y posterior evaluación de niveles de riesgos de un determinado corredor vial, la prevención técnica permite establecer medidas de control, monitoreo o de planificación en un momento dado. Lo anterior permite que profesionales no-especializados dispongan de herramientas para la toma de decisiones para proteger la vida y los bienes de los ciudadanos.

Por su ubicación en la Zona Andina y en el Cinturón de Fuego del Pacífico, Colombia está expuesta a continuos riesgos sísmicos y volcánicos. Su relieve, unido a las condiciones especiales del clima, provoca inundaciones periódicas que suelen afectar las actividades humanas y económicas de la Nación. Además, sus características geológicas y topográficas provocan frecuentes deslizamientos y derrumbes. Las amenazas que imponen los fenómenos naturales consideradas de mayor incidencia en Colombia son: sismos, volcanes, eventos hidro-meteorológicos, avalanchas, erosión y deslizamientos.

Sin duda, el estudio de amenazas por fenómenos naturales, sus procesos, identificación y valoración, permiten que la ingeniería geotécnica ejerza una importante labor en la reducción de desastres, es decir, participar en el proceso de mitigar los efectos de estos eventos sobre el entorno social y la infraestructura vial. Las pérdidas económicas y los graves perjuicios sociales ocasionados por deslizamientos y por la erosión en el mundo, particularmente en Colombia, implican que la investigación en esta área se debe orientar a crear conciencia institucional, sobre la necesidad de implementar programas preventivos en los proyectos lineales carreteros existentes y por construir, además de servir de guía para diseños ingenieriles integrales.

Este documento hace parte de un trabajo investigativo que actualmente está en proceso de desarrollo, que tiene como propósito fundamental establecer una metodología que permita realizar la evaluación de la amenaza por procesos de remoción en masa, de erosión, avalanchas y otros procesos geodinámicos relevantes en los corredores viales de la geografía nacional.

2. Infraestructura vial en Colombia

El país se caracteriza por tener un importante número de centros urbanos productivos en la parte central del territorio, aunque tiene la ventaja de contar con un doble acceso marítimo (Mar caribe y Océano Atlántico). No obstante, la infraestructura de transporte (en especial la vial) no permite garantizar una rápida y eficiente movilización de los importantes volúmenes de carga, que generan los centros urbanos, hacia los centros de consumo. Esto afecta la competitividad del país a nivel regional, local e internacional. La infraestructura vial es vital y trascendental en el crecimiento económico y desarrollo de un país, más aún en Colombia, donde aproximadamente el 75% de la carga se moviliza por carretera y un 92% del transporte de pasajeros por vía terrestre [13].

Ahora bien, según Yepes et al. [22] el rezago en infraestructura vial, comparado con otros países, se resume de la siguiente manera: 26% menos de kilómetros de carreteras (aproximadamente 45.000 Kilómetros) y 30% menos con respecto al total de carreteras pavimentadas; teniendo en cuenta el nivel de ingresos y las características demográficas, los resultados negativos persisten aún en el caso que se modifiquen los indicadores. El atraso en infraestructura vial en Colombia es innegable, pero cabe resaltar que esta tendencia comienza a cambiar, debido a que, en 2010 y 2011, la inversión en infraestructura de transporte vial fue del orden de 1.25 % del PIB. En tanto que entre los años 2001 a 2009, fue del orden del 0.8% de PIB [22].

Si la inversión en el sector de carreteras, vías y puertos se mantiene a un ritmo constante, de aproximadamente del 3,1% del PIB, durante por lo menos 10 años, la brecha existente y la respuesta a la demanda en el sector sería satisfactoria. Para el autor del presente documento es preciso que la inversión en carreteras no solamente se ejecute sobre la red vial principal, sino que, para el desarrollo integral de la nación, también se requiere planeación e inversión de la red secundaria y terciaria.

3. Marco teórico

Para delimitar el término *proceso geodinámico*, se hará mención en este documento a los eventos naturales detonados por los principales agentes modeladores del paisaje: agua (precipitación), gravedad (procesos de remoción en masa) y movimientos telúricos. Los movimientos de falla de laderas (pendientes naturales) y taludes (pendientes artificiales en excavaciones y rellenos), están determinados por diversos agentes y factores detonantes que, en resumen, se pueden clasificar en intrínsecos y extrínsecos. Los primeros están relacionados con su origen y formación (geología y geomorfología), sus propiedades geotécnicas y sus características hidrogeológicas, mientras que los segundos están relacionados con el clima, los sismos y la acción antrópica.

Entre los atributos usados como criterios para identificación y clasificación están: tipo de movimiento, clase de material, tasa de movimiento, geometría del área de falla y el depósito resultante, edad, causas, grado de alteración de la masa desplazada, existencia o no de una relación entre la geometría del deslizamiento y la estructura geológica, grado de desarrollo, localización geográfica del caso típico y estado de actividad. Según la Clasificación de Cruden y Varnes [5], los tipos de movimientos básicos se pueden dividir en cinco grupos: caídas, volcamientos, deslizamientos, propagación y flujos. Se incluyen en un sexto grupo los movimientos complejos, que son la combinación de dos o más de los anteriores. Los materiales se dividen en dos clases: roca y suelo. Este último se subdivide en detritos y tierra. Otro criterio que se considera indispensable para la clasificación de un movimiento, es la identificación del tipo de material involucrado: suelo o roca.

3.1 Definiciones conceptuales

La terminología empleada en la investigación ha sido la propuesta por el Comité técnico de Evaluación y manejo del riesgo de la Sociedad Internacional de Mecánica de suelos e Ingeniería Geotécnica [8]. Adicionalmente, algunos términos han sido tomados de la Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del Servicio Geológico Nacional [18].

- *Amenaza*. Es una situación física con el potencial de causar una consecuencia no deseada [9]. Se puede determinar con: (Detonante) * (Susceptibilidad) * (Potencial), y puede ser entendida como la probabilidad de ocurrencia de un evento con una intensidad i , durante un periodo de exposición T .

- *Corredor vial.* Es una franja de terreno adyacente que se extiende a ambos lados de los bordes de la calzada de una vía, que se delimita de acuerdo con condiciones topográficas y de cambios de pendiente. Su ancho mínimo, con respecto al eje de la carretera, debe ser entre 60 m y 80 m.
- *Movimiento en masa.* Equivale a definiciones tales como procesos de remoción en masa, fenómenos de remoción en masa, deslizamientos o fallas de taludes y laderas. Para este documento, la terminología y clasificación de movimientos en masa se determina conforme a la Guía para la evaluación de amenazas por movimientos en masa, propuesta por el Proyecto Multinacional Andino (PMA) y adoptada en Colombia [14]. En esta guía, movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras, por efectos de la gravedad.
- *Peligro.* Evento natural que puede conducir al daño, descrito en términos de vulnerabilidad, y que puede ser existente o potencial. Se debe tener presente que se puede analizar eventos activos o potenciales. Normalmente, lo activo se relaciona con tratar de predecir el futuro.
- *Susceptibilidad.* Mayor o menor posibilidad de que un talud se deslice, sin tener en cuenta el factor tiempo.
- *Vulnerabilidad.* Grado de pérdida de elementos en riesgo en área de amenaza. Se expresa como probabilidad de daño: 0 (no daño) hasta 1 (pérdida total). En el área afectada se deben identificar todos los elementos en riesgo, es decir, además de determinar la posibilidad o probabilidad del daño, se debe estimar hasta dónde puede llegar la afectación.
- *Riesgo.* Medida de la probabilidad y severidad de un evento adverso a la vida, salud, propiedad o medio ambiente. Es la amenaza por las pérdidas potenciales y sus análisis pueden ser cualitativos y/o cuantitativos. Sus resultados son en probabilidad de pérdidas económicas o humanas por año. La ecuación es una simplificación del problema, porque no tiene en cuenta la interacción entre la vulnerabilidad y la amenaza. La vulnerabilidad es función de la magnitud de la amenaza (volumen, velocidad, área, afectada) y no de la intensidad de la misma (definición probabilística: entre 0 y 1).
- *Riesgo tolerable.* Nivel de riesgo con el que la sociedad pueda convivir y entregar un beneficio neto. No es insignificante, por tanto, se debe vigilar y, en lo posible, reducir.
- *Probabilidad de ocurrencia.* Medida numérica del grado de certeza de ocurrencia. Va desde 0, como improbable, hasta 1, como completamente cierto.
 - *Probabilidad temporal o espacial.* Probabilidad de exposición de un elemento en el área de amenaza o en el momento en que se materialice la amenaza.
 - *Frecuencia (recurrencia).* Medida de la posibilidad de ocurrencia de un evento en un tiempo dado. En el cálculo de probabilidad de falla, en la base de datos, se trabaja más frecuencia que con probabilidad. En un modelo estadístico discreto (datos puntuales en tiempo y espacio), la frecuencia es directamente la probabilidad, pero en funciones continuas, como las lluvias, no se genera directamente.
 - *Probabilidad anual de ocurrencia.* Probabilidad estimada de que un evento de magnitud específica se exceda en un año. La magnitud específica debe estar relacionada con una longitud de afectación a lo largo del tramo vial.

Términos relacionados con la amenaza: es importante agregar que encontrar amenaza es encontrar focos y términos:

- *Probabilidad de ocurrencia.* Distribución temporal de la amenaza asociada con la distribución temporal del evento detonante, capaz de producir deslizamiento o avalancha.
- *Evento.* Es el peligro que se manifiesta de diversas formas y que, al definirlo, se debe decir de qué tipo es. Así, el evento define el tipo de amenaza, lo que significa que al evaluar amenaza se debe inclinar por un sistema de clasificación.
- *Magnitud de la amenaza.* La capacidad de producir daño es función de la magnitud, volumen, dimensiones, velocidad y energía potencial del deslizamiento.
- *Espacio.* La amenaza es diferente en cada punto, entonces debe haber una distribución espacial de la misma, la cual está dada por la susceptibilidad.
- *Tiempo.* Asignación de una distribución temporal, debido a que las condiciones del lugar cambian con el tiempo.

Otras definiciones relacionadas con el marco conceptual son tomadas de la Ley 1523 de 2012 (no se incluyen todas), las cuales fueron complementadas de acuerdo con su aceptación y uso frecuente en la gestión del riesgo por movimientos en masa a nivel internacional [1, 14, 15].

4. Propuesta metodológica preliminar

El procedimiento general esquemático de la metodología se presenta en la Figura 1.

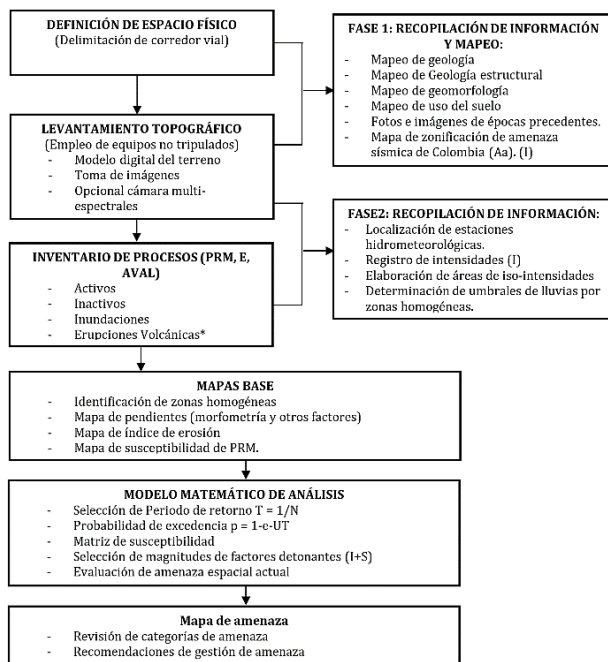


Figura 1. Proceso general para la zonificación de amenaza por procesos geodinámicos

4.1 Objeto de estudio y alcance

El objeto de estudio es la amenaza asociada a procesos de remoción en masa, erosión y avalanchas en un contexto de tiempo-espacio, correspondiente a un sistema territorial definido en un corredor vial proyectado o existente. El alcance preliminar de la propuesta metodológica de carácter sistémica, se restringe a procesos geodinámicos externos detonados por lluvia y sismo. Para estudio de caso y aplicación de la presente metodología

se debe precisar el área de estudio, escala geográfica del espacio involucrado, período de estudio y recursos disponibles (presupuesto, plazo, recursos humanos, herramientas de trabajo, fuentes de información, destinatarios, etc.). Lo anterior permitirá ajustar los procedimientos con los objetivos específicos del trabajo.

4.2 Definición del espacio físico

En primer lugar, es necesario establecer el espacio geográfico en donde se realizará el análisis de amenaza, para lo cual se debe delimitar la franja de terreno que conexas con el desarrollo vial, que abarcará posibles eventos de inestabilidad o de cierre de la infraestructura carretera. Los principales criterios para definirlos son: extensión y altura de talud interno y externo de la banca de la carretera, proximidad de afluentes paralelos al eje de la vía, identificación de procesos de remoción en masa activos o antiguos, ancho del derecho de vía, entre otros factores.

4.3 Topografía digital

La modelación de las formas del terreno se propone realizar a través de equipos no-tripulados (drones) y las especificaciones mínimas a considerar son las siguientes:

- Resolución de 5cm/píxel
- Puntos de control topográfico, materializados en el terreno
- Densidad de puntos: 100 puntos/m²

La información resultante de la ruta de vuelo y el posproceso debe ser ortofoto, modelo digital de terreno (MDT), modelo digital de elevación (MDE) y restitución.

4.4 Recopilación de información y mapeo

En esta etapa se hace hincapié en la recopilación de información secundaria existente, se evalúa su consecuencia y consistencia con la interpretación de las imágenes captadas con los drones y se delimitan y plasman los mapas de geología, geomorfología, red de drenaje, uso del suelo, inventario de procesos, mapa de pendientes y zonificación sísmica. Posteriormente, se analiza la información de precipitación y se evalúa su distribución espacial a lo largo del corredor vial; en paralelo y por zonas se determinan los umbrales de lluvia crítica y su interrelación con las condiciones locales de la ladera.

En este documento se desarrollará una investigación sobre un procedimiento práctico, para establecer eventos de lluvia antecedente que pueden disparar deslizamientos. Preliminarmente se ha determinado que el contenido de humedad del terreno y la lluvia antecedente (eventos que exceden las 48 horas a 72 horas), son factores que inciden en la generación de deslizamientos. La principal fuente de información para la comprensión de los movimientos del terreno disparados por lluvias es el trabajo de Castellanos y González [3] y otros derivados de los mismos autores.

4.5 Matriz de susceptibilidad

El término susceptibilidad se refiere a la predisposición de un terreno a presentar deslizamientos y, por lo tanto, se utiliza para evaluar qué zona es más propensa a los procesos de remoción en masa, detonados por precipitación o eventos sísmicos. La matriz de susceptibilidad que se plantea en este documento considera las siguientes variables intrínsecas del terreno o área de influencia del tramo vial de interés:

- Litología (G)
- Geoforma (M)
- Erosión (E)

- Actividad sísmica (S)
- Uso del suelo (C)
- Densidad de drenaje (D)

Observar, mapear y cuantificar cada una de estas variables permite generar zonas homogéneas o de características similares y de similitud de respuesta geotécnica. A continuación, se definen las variables intrínsecas y su respectiva categorización, para facilitar la comprensión de la metodología propuesta y la estructura de la matriz de susceptibilidad.

- *Tipo de material.* El comportamiento geomecánico de los materiales depende sin duda de su génesis litológica y, por tanto, las categorías que se considera son: aluvial, coluvial, de ladera, lacustre, suelo residual, saprolito, depósito glacial y roca. Una sub-categoría considerada en la clasificación de suelos está relacionada con su origen: suelos transportados, residuales o antrópicos. Para el material rocoso se considera práctico utilizar el sistema de clasificación rocoso denominado Geological Strength Index [7].
- *Geoforma.* Los aspectos de morfología de los taludes interno y externo de la vía se han categorizado por dos criterios:
 - Geoforma en planta. Para Van Den Eeckhaut [21], existen 3 tipos de curvatura en planta para las cuencas: convergente, divergente y paralela o plana.
 - Geoforma en perfil. Con relación al tipo de perfil transversal predominante se tienen 3 tipos: convexo, cóncavo y rectilíneo [2].
- *Inclinación de talud.* Con base en la experiencia del autor y de indagaciones con otros profesionales del ámbito geotécnico nacional y de amplia experiencia, para el presente estudio se ha establecido los rangos de pendiente de la Tabla 1.

Tabla1. Rangos de pendiente y ponderación

Rango de Pendiente promedio	Ponderación
45	4%
36-45	20%
26-35	25%
15-25	45%
<15	12%

- *Evidencias de inestabilidad.* Los procesos de remoción en masa antiguos y sus evidencias se pueden identificar a través de fotografías (oblicua, ortofoto y la fotografía aérea), y la observación directa sirven para determinar a través del principio de similitud geomorfológica el grado de estabilidad de la zona de interés. Las evidencias son diversas y podrían agruparse en:
 1. Geoforma. Presencia de escarpes de deslizamientos, fisuras y grietas, superficies lobuladas con forma de lengüetas, escalones, arrugas y abombamientos.
 2. Antrópicas. Inclinación de postes, grietas en el pavimento u obras de hidráulicas menores, ondulaciones en planta o transversales, hundimientos en la banca, agrietamientos en viviendas o infraestructura aledaña.
 3. Drenaje. Depresiones mal drenadas y cursos de corrientes interrumpidas.
 4. Vegetación. Árboles inclinados, desprendimiento de la cobertura vegetal y diferencias apreciables entre tipo de vegetación.

- **Erosión.** La perspectiva que en este documento se ha establecido para los diferentes tipos de erosión, que pueden afectar los taludes interno y externo de una carretera, se definen de la siguiente manera:

1. Erosión Superficial
2. Erosión de pie de talud por corrientes hídricas

El porcentaje de área afectada por erosión se cuantifica por cada unidad litológica definida a lo largo del corredor vial y dentro de una unidad morfológica predefinida.

- **Actividad Sísmica.** La presencia de fallas geológicas y su cercanía al tramo vial se evalúa a partir de dos criterios: proximidad de la falla [19] y nivel de amenaza sísmica, determinados a partir del Reglamento de Construcciones Sismo-resistentes y los respectivos mapas de zonificación sísmica de Colombia. En la Tabla 2 se presentan los rangos de distancia establecidos y la ponderación respectiva.

Tabla 2. Proximidad de falla geológica al eje vial

Distancia radial a una falla geológica	Ponderación
0 a 0.2	1
0.2 a 0.5	0.9
0.5 a 1	0.7
1 - 2	0.6
2 -5	0.4

- **Tipo de suelo y cobertura.** El tipo y uso de suelo permite determinar susceptibilidad. Los tipos de vegetación que se consideran son:

- Pastizal
- Rastrojo
- Urbano
- Vegetación nativa-Bosque
- Tierras en agricultura
- Terreno árido

- **Matriz y rangos de susceptibilidad.** La ordenación de los diferentes factores y ponderar su incidencia en el potencial de susceptibilidad de falla de un tramo vial, dan como resultado la matriz que se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Matriz de susceptibilidad

MATRIZ DE SUSCEPTIBILIDAD											
ITEM	%	SIMBOLO	VARIABLE		CATEGORIA		PONDERACIÓN ABSOLUTA				
			DESCRIPCIÓN	PONDERACIÓN	PRIMARIA	SECUNDARIA					
1	30%	G	Litología	0.12	Transportados	Coluvión	1.00				
						Aluvial	0.65				
						De laedera	1.00				
						Graciar	0.80				
						Antropicos	1.00				
						Residual	0.90				
						Sigmoide	0.05				
						0 - 15	1.0				
						15 - 35	0.8				
						35 - 55	0.8				
2	45%	M	Geoforma	0.068	Morfología en planta	Uniforme	0.25				
						Divergente	0.65				
						Convergente	1.0				
						0.068	Morfología en perfil	Concavo	1.0		
						0.068		Convexo	0.7		
						0.180		Rectilíneo	0.25		
						Erosión		0.1	Roca (GS)	<15	0.2
										16-25	0.55
										26-35	0.7
										36-45	0.4
>45	0.10										
0.045	Procesos antiguos	1.0									
0.060	Evidencias recientes de inestabilidad	1.0									
3	10%	E	Erosión	0.05	Cercanía a fallas geológicas		Superficial			0.4	
					Nivel de amenaza sísmica (NSR-2010)		De pie de talud			0.8	
4	10%	S	Actividad sísmica	0.05	Erga		0.1				
					Alta	1.0					
5	5%	C	Uso del Suelo	0.05	Tipo y uso del suelo	Pastizal	1.0				
					Sim cobertura	1.0					
					Rastrojo	0.7					
					Urbano	0.2					
					Vegetación	0.8					
6	100%			1.0	Agropecuaria	0.1					

5. Factores detonantes

Una de las causas más frecuentes de deslizamientos es la pluviosidad y en nuestro medio geográfico se deben enfrentar condiciones desde altas a muy altas que, a través del ciclo hidrológico, llevan a incrementos apreciables en la escorrentía superficial y la infiltración. El aumento de infiltración genera elevaciones del nivel freático, respecto de superficies o zonas de falla potencial o activa, lo cual producirá un incremento en las presiones de poros en dicha superficie, con la consiguiente reducción de los esfuerzos efectivos y, por lo tanto, de la resistencia al corte. En la Figura 2 se ilustra la variación y disminución del factor de seguridad por cuenta de eventos de lluvia que, conjuntamente con algún otro factor detonante, pueden desencadenar una actividad inestable [16].

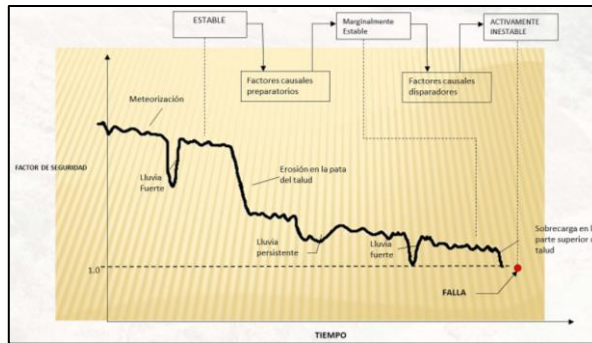


Figura 1. Variación del factor de seguridad en función del tiempo (Modificado de [16])

Mayorga [12] estableció relaciones entre la precipitación acumulada y los deslizamientos ocurridos históricamente en Colombia. En este documento se establecen umbrales de lluvia detonante en función de la lluvia acumulada y la lluvia del día del evento, que describen el comportamiento de los deslizamientos en nuestro país. Este estudio dispone de una base de datos de deslizamientos ocurridos en Colombia (413 eventos entre 1921 y 2000), por lo que es un estudio que se sugiere emplear para evaluar el factor detonante.

Teniendo en cuenta que la lluvia es el evento que dispara con mayor frecuencia los movimientos en masa [11], es importante estudiar la relación de la lluvia con la ocurrencia de los deslizamientos, mediante la determinación de umbrales de lluvia detonante, considerando los componentes de intensidad, duración y frecuencia. El método se basa en el análisis de la precipitación acumulada o antecedente de días previos a la ocurrencia del evento. Puesto que el factor causante del deslizamiento es la lluvia, la cantidad e intensidad necesarias para disparar el movimiento, dependerán de las condiciones iniciales de humedad y nivel freático del terreno del corredor vial y su relación con las lluvias precedentes.

La lluvia precedente se categoriza en dos componentes [20]: 1) antecedente de largo plazo (entre 1 a 180 días antes del movimiento del terreno), y 2) antecedente de corto plazo (de 1 a 48 horas). El análisis del primer componente consiste en establecer relaciones estadísticas de la lluvia con el deslizamiento, cuantificando los componentes de intensidad, duración y frecuencia, con el fin de sintetizar un modelo de comportamiento de la zona por estudiar y así contribuir al pronóstico de los mismos. Para ello se seleccionan los sitios con eventos de deslizamientos causados por lluvia, que cuenten con buena información pluviométrica. Se sugiere emplear la base de datos del Servicio geológico Nacional, denominada SIMMA. Para el antecedente de corto plazo se toma la precipitación acumulada de 24 a 48 horas.

Si determinada si la zona homogénea del corredor vial dispone de información pluviométrica y si es insuficiente se recomienda aplicar las relaciones obtenidas con las ecuaciones (1) y (2) [4].

$$Ll_{crit} = 51.42 + 0.4035 * Llan \text{ (mm)} \quad (1)$$

Donde Llan: Lluvia anual.

$$D \text{ (días)} = 3.3 * (Ll_{crit} \text{ (mm)})^{0.157} \quad (2)$$

Donde D: duración de precipitación en días.

5.1 Amenaza Sísmica

Entre las amenazas más catastróficas, no solamente por las pérdidas materiales sino por los resultados trágicos, se encuentran los sismos o terremotos. La intensidad de un sismo en un punto dado de la corteza terrestre en función de varios factores [6]:

- Magnitud del sismo
- Distancia al epicentro
- Aceleración, duración y amplitud de las ondas
- Tipo y geometría de la conformación geológica superficial
- Nivel freático
- Tipo y calidad de la construcción
- Período natural de las estructuras y de las fundaciones

Las fallas activas están marcadas por movimiento o rotura histórica o reciente (en el sentido geológico), asociada con temblores perjudiciales, por un reptamiento o creep tectónico, o por indicación geodésica de movimiento. En relación con el contexto de amenaza sísmica para Colombia, Lobo Guerrero [10] comenta que la actividad tectónica de los Andes aún no ha cesado. Testigo de ella son los terremotos que periódicamente sacuden el territorio, el hundimiento de algunas regiones y el levantamiento de otras.

El sismo del 31 de marzo de 1983, que destruyó la ciudad de Popayán, fue producido por un desplazamiento a 20 km de profundidad en la falla de Julumito, un ramal del sistema Romeral. Aún se recuerdan los daños en Tumaco y la Costa Pacífica por el terremoto del 12 de diciembre de 1979 originado en la Fosa Ecuador-Colombia, los del terremoto de Manizales del 23 de noviembre de 1979 originado en la falla de Romeral, y se recuerdan muchos otros de años anteriores, como el que afectó principalmente al valle alto del Magdalena el 7 de febrero de 1967 sobre la falla de Uribe y el que destruyó a Cúcuta el 18 de mayo de 1875, originado por la falla Tasajero. El territorio colombiano sufre los efectos de la colisión y movimiento relativo de tres grandes placas de la corteza terrestre: la de Nazca al occidente, la Suramericana al oriente y la Caribe al norte. Entre las dos primeras hay un par compresivo donde se encuentra la cadena montañosa de los Andes y la tercera se mueve lateralmente al oriente con respecto a la Placa Suramericana.

Las ondas sísmicas pueden ser amplificadas o atenuadas por las condiciones geológicas locales y pueden originar caídas y deslizamientos del terreno, o inducir licuación en capas de arena suelta. Algunos de los procesos naturales que pueden inducir los choques sísmicos son la roca fracturada en taludes escarpados, los materiales superficiales sueltos en taludes empinados y la licuación de depósitos de materiales granulares. Un trabajo profundo sobre el tema de evaluación de amenaza de deslizamientos inducidos por sismos lo reporta Rodríguez [17]. Para las consideraciones de análisis de la presente propuesta procedimental, las variables a considerar son: aceleración máxima horizontal y proximidad de fallas.

6. Recomendaciones y consideraciones

1. Las condiciones geotécnicas naturales, que predominan en las regiones montañosas de nuestro país, favorecen el deterioro de suelos y rocas en el futuro próximo a la terminación de un proyecto carretero, debido a que la exposición de los materiales a los agentes atmosféricos y su perturbación por el desarrollo de las obras mismas intensifican los siguientes procesos de falla:
 - Proceso de ablandamiento: disminución de la cohesión por aumento de la saturación y cambio de humedad en la masa de suelo. A la par aumento del peso unitario de la masa de suelo y lubricación de superficies preexistentes.
 - Degradación de rocas blandas: por acción de ciclos de humedecimiento y secado, ocasionados por los cambios climáticos diarios. Estas rocas tienen un elemento que se llama sulfuro de hierro o pirita que, al entrar en contacto con el aire, se oxida, se degrada y se altera con facilidad.
2. En general, el costo de prevenir geo-amenazas es menor que el de corregirlas o remediarlas y, por tanto, establecer de antemano la susceptibilidad a deslizamiento, erosión o avalancha a lo largo de proyectos viales es una manera de minimizar sobrecostos o gastos no contemplados en el desarrollo de infraestructura vial.
3. La identificación sistemática (cartografiada y georreferenciada) de las diversas geo-amenazas de un proyecto vial proyectado o existente, es el fundamento de la prevención y permite establecer los niveles de riesgo y amenaza en un tramo dado. Lo anterior facilitará la toma de decisiones estructuradas que protegerán las obras de infraestructura y la vida y los bienes comunitarios.
4. Las pérdidas en infraestructura causada por el invierno de finales de 2010, permitieron repensar la eficacia de la planeación y la gestión del riesgo de las instituciones privadas y públicas, y aceptar que prevenir y gestionar en prospectiva genera beneficios a largo plazo y reducción de costos por desastres naturales.
5. El grado de precisión de la topografía o cartografía empleada para la generación del modelo digital de elevación es fundamental, pues de ello depende la calidad y detalle de los resultados de evaluación de amenaza. Por lo anterior, en este documento se propone el empleo de aeronaves no-tripuladas para la generación de topografía. Esto conlleva un menor costo de adquisición y reducción amplia de tiempos con respecto a metodologías tradicionales. Adicionalmente, se dispondría de imágenes de excelente calidad y, de acuerdo con los recursos del proyecto, se podrían emplear cámaras multi-espectrales para incorporar otras variables en la evaluación del método.
6. El gobierno nacional ha expedido varias normas jurídicas encaminadas a incorporar la gestión del riesgo en el ordenamiento territorial:
 - Decreto Ley 19 de 2012, que obliga a delimitar y zonificar previamente las áreas de amenaza y riesgo a la par de establecer medidas específicas para su mitigación.
 - Ley 1523 de 2012, como parte de la política nacional de gestión del riesgo de desastres, obliga a incorporar la zonificación de amenaza y riesgo en la planificación del desarrollo y ordenamiento territorial, así como toda intervención o proyecto de ingeniería. No obstante, su aplicación es aún incipiente.
 - Decreto No. 1807 de 2014, mediante el cual el Gobierno Nacional expidió el Decreto 1807 de 2014, en el que se establecen los contenidos técnicos básicos que se deben desarrollar por parte de los municipios para garantizar que en todos los Planes de

Ordenamiento Territorial POT del país se incorporen los asuntos relacionados con la gestión del riesgo.

7. Se recomienda que las entidades gubernamentales encargadas de la gestión vial y de transporte exijan, dentro de los estudios de impacto ambiental de un proyecto vial, la evaluación de la amenaza y riesgo.
8. Las principales ventajas de realizar un estudio de evaluación de amenaza y posterior análisis de riesgo de un corredor vial es facilitar la implementación de medidas o estrategias, que permitan reducir costos, beneficiar al administrador vial y, por tanto, generar gestión en:

1. Soluciones de control

- Elusión del problema: incluye el realineamiento o reubicación del proyecto lineal, remoción total o parcial de materiales inestables y la instalación de puentes o construcción de túneles.
- Reducción de fuerzas motoras: cambios de pendiente, drenaje superficial, drenaje sub-superficial, reducción de pesos, entre otras.
- Incrementos de fuerzas resistentes: contrapesos, estructuras de contención, pilotajes, drenaje sub-superficial, etc.
- De protección y sostenibles: como la construcción de obras biomecánicas y sistemas de re-vegetalización y control del drenaje superficial.
- No intervención: aplicando el método observacional e instrumentación.

2. Medidas estructurales. Acciones de mitigación, también llamadas no-convencionales, que pueden ser:

- Activas: Involucrar a los agentes humanos, capacitación técnica, sistemas de alerta y de atención de emergencias de proyectos lineales, participación comunitaria de obras menores y de manejo de aguas.
- Pasivas: Aplicación de las leyes existentes, modificación de manuales o códigos de construcción, reglamentación de usos del suelo, estímulos fiscales y financieros por desarrollar y planear dentro de un marco sostenible y en aras de aumentar la resiliencia del entorno del proyecto vial.

3. Medidas estructurales. Soluciones de control, protección y contención, tales como obras y soluciones ingenieriles convencionales, que se pueden clasificar en:

- Elusión del problema: incluye el realineamiento o reubicación del proyecto lineal, remoción total o parcial de materiales inestables y la instalación de puentes o construcción de túneles.
- Reducción de fuerzas motoras: cambios de pendiente, drenaje superficial, drenaje sub-superficial, reducción de pesos, entre otras.
- Incrementos de fuerzas resistentes: contrapesos, estructuras de contención, pilotajes, drenaje sub-superficial, etc.
- De protección y sostenibles, como la construcción de obras biomecánicas y sistemas de re-vegetalización y control del drenaje superficial.
- No intervención, aplicando el método observacional e instrumentación.

4. Medidas no-estructurales: Acciones de mitigación, también llamadas no-convencionales, y que pueden ser:

- Activas: Involucrar a los agentes humanos, capacitación técnica, sistemas de alerta y de atención de emergencias de proyectos lineales, participación comunitaria de obras menores y de manejo de aguas.
- Pasivas: Aplicación de las leyes existentes, modificación de manuales o códigos de construcción, reglamentación de usos del suelo, estímulos fiscales y financieros por desarrollar y planear dentro de un marco sostenible, en aras de aumentar la resiliencia del entorno del proyecto vial.

7. Conclusiones

La principal dificultad para evaluar la estabilidad de una ladera y su predisposición a fallar y afectar una obra lineal, es que algunos factores no son fácilmente cuantificables; sin embargo, la tecnología con equipos no-tripulados se encuentra aún en etapa de adquirir reconocimiento y difusión de sus bondades, tanto económicas como técnicas.

Otro factor de índole externo es la falta de voluntad técnica y política para acometer estudios de evaluación de amenaza y riesgo, que permitan planificar, implementar estrategias y tomar soluciones más eficaces en el desarrollo o durante la ejecución de proyectos lineales.

Referencias

- [1] Australian Geomechanics Society. (2007). [Guideline for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning](#). Aust Geomech 42 (1), pp. 13-36.
- [2] Carvajal, H. et al. (2004). [Propuesta metodológica para el desarrollo de la cartografía Geomorfológica para la Zonificación Geomecánica](#). En: Propuesta metodológica para el desarrollo de la cartografía Geomorfológica (pp. 9-24). Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- [3] Castellanos, J. & Gonzalez, A. (1997). [Relaciones entre la lluvia anual y la lluvia crítica que dispara movimientos en masa](#). IX Jornadas Geotecnicas de la Ingenieria Colombiana. Bogotá, Colombia.
- [4] Castellanos, J. (1996). Lluvias Críticas en la Evaluación de Amenazas de Eventos de Remoción de Masa. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- [5] Cruden, D. & Varnes, D. (1996). [Landslides types and processes in Landslides-Investigation and Mitigation](#). Washington: National Academy Press.
- [6] Hermelín, M. (1984). [Riesgo geológico en el Valle de Aburrá](#). En: Primera Conferencia sobre Riesgos Geológicos del Valle de Aburrá. Medellín, Colombia.
- [7] Hoek, E., Carter, T. & Diederichs, M. (2013). [Quantification of the Geological Strength Index Chart](#). Proceedings 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium held in San Francisco (pp. 1-9). San Francisco, USA.
- [8] http://www.engmath.dal.ca/tc32/2004glossary_draft.pdf. Online [Jan 2016].
- [9] IUGS (1997). [Quantitative risk assessment for slopes and landslides-The state of the art](#). Proceedings Landslide Risk Workshop. Honolulu, USA.
- [10] Lobo, A. (1984). [La infraestructura de Colombia](#). Bogotá: Lobo-Guerrero U. Geólogos Consultores.
- [11] Mayorga, R. (2003). [Desarrollo de una metodología para la determinación de lluvias detonantes de deslizamientos. Estudio de Caso](#). Meteorología Colombiana 7, pp. 73-80.
- [12] Mayorga, M. (2003). Determinación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia.
- [13] Pérez, V. (2005). [La infraestructura del transporte vial y la movilización de carga en Colombia](#). Documentos de trabajo sobre Economía Regional 64.
- [14] GEMMA (2007). [Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. Movimientos en masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas](#). Publicación Geológica Multinacional No. 4. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- [15] Coburn, A., Spence, R. & Pomonis, A. (1991). [Vulnerabilidad y evaluación de riesgo. Programa de entrenamiento para el manejo de desastres](#). Cambridge: PENUD.
- [16] Popescu, M. (2002). [Landslide causal factors and landslide remedial options](#). Proceedings 3rd international conference on landslides, slope stability and safety of infrastructures (pp. 61-81). Singapore.

- [17] Rodríguez, C. (2001). [Hazard assessment of earthquake-induced landslides on natural slopes](#). Thesis (Ph.D.). Imperial College London, University of London.
- [18] Servicio Geológico Colombiano (2016). [Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa](#). Bogotá: Imprenta Nacional.
- [19] Suárez, J. (2009). [Deslizamientos: Análisis geotécnico](#). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- [20] ISSMFE (1997). [Manual for zonation on areas susceptibles to rain induced slope failure](#). Tokio: Japanese Geotechnical Society.
- [21] Eeckhaut, M. et al. (2009). [Combined Landslide inventory and susceptibility assessment base don different mapping units: an example from the Ardennes, Belgium](#). Natural Hazards and Earth System Sciences 9, pp. 507-521.
- [22] Yepes, T. et al. (2013). [Infraestructura de transporte en Colombia](#). Bogotá: Fedesarrollo.

11. Ecuaciones de módulo de elasticidad en concreto sin refuerzo deducidas desde ensayos no-destructivos: *Impact Echo* y velocidad de pulso ultrasónico

Luis Zapata O.
Juan García C.
Gina Garrido O.

Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia

1. Introducción

El concreto es uno de los materiales más usados en el área de la construcción, debido a su gran resistencia a la compresión y su durabilidad [1]. Durante los primeros 28 días de curado del concreto, su capacidad de resistencia a la compresión se desarrolla casi en su totalidad, por esta razón es recomendable su estudio durante este periodo [1]. La resistencia a la compresión del concreto (f'_c) es importante como factor de control, puesto que permite una evaluación preliminar de su calidad. Este valor de resistencia se encuentra afectado por diversos factores, tales como tamaño de agregado, tipo de agregado y la relación agua-cemento (A/C), además de factores externos como humedad, temperatura y secuencia de mezclado [2].

Serrano y Pérez [3] plantean que las ecuaciones propuestas para el cálculo del módulo de elasticidad en la Norma Sismo Resistente NSR-98, de American Concrete Institute (ACI) y el Comité Europeo del Concreto (CEC), sobreestiman este valor en un 50%, 24 % y 46.2%, respectivamente. Finalmente, el estudio sugiere ecuaciones alternas a las contempladas en la NSR-98 y aconseja su uso en lugar de las recomendadas por la norma NSR-98, haciendo énfasis en la fuerte incidencia en la calidad que tienen los agregados usados para realizar el concreto en Bucaramanga, Colombia. El planteamiento anterior abre la posibilidad de proponer una ecuación alterna a la desarrollada en la Norma Sismo Resistente NSR-10, estudiando los distintos factores que pueden influenciarla [3]. Por otro lado, el módulo de elasticidad (E) del concreto está influenciado directamente por el valor de la resistencia a la compresión de este [3] y, como se mencionó anteriormente, se ve afectado por diversos factores, siendo (A/C) uno de los más relevantes para la resistencia.

2. Antecedentes

Ariza y Atuesta [4] afirman que la importancia de la relación agua/cemento fue descubierta por Duff Abrams, después de estudiar un alto número de hormigones de diferentes composiciones. Entonces, anunció la ley de que, con un agregado dado, la resistencia depende solamente de la relación agua/cemento del hormigón fresco. Este descubrimiento provocó importantes desarrollos, debido a que otras propiedades del hormigón también dependen de la relación (A/C) [4].

Teniendo en cuenta lo anterior, la (A/C) es modificada para obtener diferentes valores de f'_c . Asimismo, se quiere observar su influencia en la velocidad de propagación de onda de la velocidad de pulso ultrasónico (UOV) y el *Impact Echo* (I.E), en los diferentes especímenes de concreto. Existen métodos destructivos y no-destructivos para evaluar la calidad del concreto, como se contempla en la ACI 228, tales como el *Sonic Echo*, la respuesta de impulso, el análisis espectral de ondas superficiales, entre otros. La UPV es una prueba no-destructiva que consiste en medir el tiempo de viaje de una onda ultrasónica a través de un espesor conocido, permitiendo hacer un análisis interno y detallado del material a estudiar [5].

Además, de acuerdo con Malhotra y Carino [18], la medición de la velocidad del pulso ultrasónico como una alternativa de prueba no-destructiva para evaluar la calidad del concreto, se ha utilizado desde hace aproximadamente 50 años. La técnica fue desarrollada en Canadá y se utilizó con gran éxito desde la década de los sesenta para diagnosticar el estado del concreto [5]. Al igual que UPV, I.E es un método no-destructivo que permite el estudio del concreto por medio de la propagación de ondas de tensión, generadas por un impacto. Estas ondas viajan a través del material y son reflejadas por las fallas interiores del elemento de análisis o por las superficies externas [6]. Estos ensayos permiten conocer la velocidad de propagación de la onda (C_p) en el material, donde la velocidad de cálculo es diferente para cada uno. En el caso del UPV, se calcula dividiendo la *longitud* (L) que recorre la onda, sobre el *tiempo* (t) que tarda (ecuación (1)).

$$C_p = L/t \quad (1)$$

Para el caso del I.E, y de acuerdo con la ecuación (2), el valor de la velocidad se calcula despejando de la fórmula del *espesor* (T), el producto de la velocidad (C_p) por el tiempo (t), dividido por dos, debido a que la onda se da por rebote [6].

$$T = \frac{C_p * t}{2} \quad (2)$$

Estas velocidades de onda están directamente relacionadas a las propiedades del material, tales como módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson (ϑ) y la densidad característica del elemento (ρ), como se muestra en la ecuación (3) de la ACI 228 [7].

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\vartheta)}{\rho(1-\vartheta)(1-2\vartheta)}} \quad (3)$$

El I.E. es una tecnología reciente en comparación con el UPV. Se ha venido usando principalmente para la medición exacta de espesores de losas y muros, debido a que no es necesario acceder al otro lado de la superficie a analizar para obtener un registro de onda, caso contrario al UPV. Hasta el momento, se han desarrollado diversas investigaciones [1-4] que buscan estudiar cuáles variables tienen mayor influencia en el valor de la velocidad de onda en el concreto. Ariza y Atuesta [4] estudian la influencia que tiene la (A/C) y el tipo de agregado en el valor de velocidad. En su estudio elaboraron cilindros con resistencias variables, diferente relación (A/C) y variación en el tamaño del agregado de la mezcla. Los resultados permitieron confirmar la relación existente entre la velocidad y la (A/C), cuando, al aumentar el valor de (A/C), los valores de velocidad disminuyen sin importar el tamaño de agregado de la mezcla, que para este caso en particular era de 3/4" y 3/8". Además, en relación a la edad se comprobó que a partir del día 7 existe un aumento significativo en los valores de velocidad, llegando a su valor máximo en el día 28; finalmente concluyeron que la (A/C) tiene mayor efecto sobre la velocidad.

Bogas, Gomes y Gomes [2] analizaron la influencia de factores tales como tamaño de agregado, edad del concreto, tipo de agregado y relación agua/cemento. Consideraron 208 muestras que contenían valores de resistencia a la compresión entre 30 y 80 MPa, y variaciones de la relación (A/C) entre 0.3 y 0.65, además, realizaron un análisis individual de cada variable para observar su influencia en los resultados finales de resistencia a la compresión. Finalmente, y por medio del uso de las ecuaciones planteadas en el Euro Code 2: Design of concrete structures, plantearon una expresión que relaciona el valor de velocidad del UPV, con los valores de $f'c$ y de densidad del concreto. Este estudio mostró que la relación entre UPV y $f'c$ se afecta menos por el volumen de agregado en concreto de peso ligero; adicionalmente, se notó el aumento del UPV y $f'c$ con la edad y su disminución con respecto a (A/C) y al volumen del agregado.

Por otro lado, los estudios realizados por medio del Impact Echo son escasos debido a que este ensayo es una tecnología reciente, en comparación a la técnica de UPV. Un estudio relacionado es el de Lu et al. [8], que se enfoca a encontrar el valor de módulo de elasticidad dinámico (Ed) del concreto, utilizando el ensayo I.E. Para el desarrollo de este trabajo se realizó el estudio de especímenes cilíndricos de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. De forma paralela se realizaron elementos cuadrados de 100x100x400 mm, en los que se consideraron diferentes valores de módulo de elasticidad dinámico (Ed) 25, 35 y 40 GPa, sometidos a impactos de diferente duración, con el fin de estudiar el efecto que dicho impacto causa en la velocidad. El estudio logro validar el uso del I.E como método de cálculo del Ed, puesto que el valor obtenido al tomar la onda se asemeja al encontrado por medio del método tradicional de análisis de frecuencia; adicionalmente, plantearon una expresión que describe el valor del módulo de elasticidad, resaltando el hecho de que su uso puede no ser recomendada para concretos elaborados con agregados débiles. Finalmente, se comprobó que el tipo de agregado tiene una influencia importante en el valor de módulo de elasticidad, tanto dinámico como estático, contrario a lo que ocurre con el valor de resistencia a la compresión, que no se ve influenciado por esta variable.

A pesar de los muchos estudios realizados con los ensayos no-destructivos (END), todavía son materia de investigación debido a que los resultados no son definitivos para casos generalizados [1]. En este sentido, el presente proyecto intenta comprobar la influencia de (A/C) y la edad de evaluación del concreto, en el valor de velocidad de propagación de la onda, con el fin de plantear ecuaciones propias que describan de forma más exacta el valor de módulo de elasticidad obtenido a partir de la velocidad.

3. Materiales

En esta investigación se emplearon materiales provenientes del río Chicamocha, en el departamento de Santander, aportados por la empresa productora de cemento Cemex S.A. La caracterización de estos materiales se llevó a cabo por medio de pruebas de laboratorio para determinar el tamaño nominal del agregado grueso, la presencia de impurezas orgánicas en el agregado fino, así como la densidad, la absorción y el peso específico para los agregados fino y grueso. Todas estas pruebas se realizaron conforme a las normas NTC 77 [9], NTC 92 [10], NTC 127 [11], NTC 176 [12] y NTC 237 [13]. Para la elaboración de la mezcla se seleccionó cemento Portland de uso general tipo I.

Para la medición de la velocidad de pulso ultrasónico y el ensayo de Impact Echo se utilizó el equipo desarrollado por Olson Instruments, modelo NDE360 IE-1 NDE 1206188. En el ensayo de compresión simple de las probetas se utilizó la máquina de compresión tipo prensa hidráulica, proporcionada por la Universidad Industrial de Santander. Para llevar a cabo las pruebas se realizaron tres diseños de mezcla diferentes, siguiendo el método de volumen absoluto planteado en la norma ACI 211 [14]. Para estos diseños se usó un tamaño máximo nominal (TMN) de agregado de 1" y se fabricaron probetas cilíndricas de 200 mm de altura y 100 mm de diámetro, que fueron desencofradas pasadas 24 horas desde su fundición y curadas en agua y bajo techo durante 28 días [NTC 673]. Los ensayos se realizaron a los 14 y 28 días de edad. A estas probetas se les realizaron los ensayos de velocidad de pulso ultrasónico, ensayo de Impact Echo y, finalmente, el ensayo de compresión simple.

Para la realización de las mezclas se emplearon tres relaciones (A/C): 0.45, 0.52 y 0.58, utilizando un número diferente de probetas; para el día 14 se realizaron 5, 9 y 12 respectivamente, y para el día 28 se elaboraron 9, 14 y 19 respectivamente. Además, con

el fin de seleccionar un tamaño de muestra adecuado para cada caso, se realizó un análisis estadístico por medio de varianzas, para buscar un valor de desviación estándar adecuado para la resistencia del concreto. Teniendo en cuenta esto, Rivera [15] plantea una tabla donde muestra los valores típicos de desviación estándar y grado de uniformidad del concreto, dependiendo del tipo de condiciones en el que se produce (ver Tabla 1).

Tabla 1. Valores esperados del coeficiente de variación y el grado de uniformidad del concreto

V (%)	Uniformidad	Condiciones en que se obtiene
0 - 5	Excelente	Condiciones de laboratorio
5 - 10	Muy Bueno	Preciso control de materiales y dosificación por masa
10 - 15	Bueno	Buen control de materiales y dosificación por masa
15 - 20	Mediano	Algún control de materiales y dosificación por masa
20 - 25	Malo	Algún control de materiales y dosificación por volumen
>20	Muy malo	Ningún control de materiales y dosificación por volumen

Teniendo en cuenta la hipótesis de Rivera [15] se encontraron los tamaños de muestra dependiendo del valor de resistencia esperada en el día de análisis, con esto se logró dar un numero de probetas necesario para mantener el valor de desviación establecido (Ver Tablas 2 a 4).

Tabla 2. Tamaño de muestra día 14, resistencia de 2400 psi

Resistencia [psi]	2400
Desviación	120
Z Alfa/2	1,64
Z beta	1,28
Alfa	5%
Beta	0,1
Delta	150
Potencia	0,9
N° Probetas	5

Tabla 3. Tamaño de muestra día 14, resistencia de 2800 Psi

Resistencia [psi]	2800
Desviación	140
Z Alfa/2	1,96
Z beta	1,28
Alfa	5%
Beta	0,1
Delta	150
Potencia	0,9
N° Probetas	9

Tabla 4. Tamaño de muestra día 14, resistencia de 3200 Psi

Resistencia [psi]	3200
Desviación	160
Z Alfa/2	1,96
Z beta	1,28
Alfa	5%
Beta	0,1
Delta	150
Potencia	0,9
N° Probetas	12

Del mismo modo se realizó el análisis estadístico para el tamaño de muestra del día 28, cuyos valores se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Tamaño de muestra de probetas en el día 28 para resistencias de 3000, 3500 y 4000 psi

Resistencia [Psi]	Desviación	Nº Probetas
3000	120	9
3500	140	14
4000	160	19

Partiendo de los datos de velocidad, se realizó un análisis estadístico con el fin de ver el efecto que la relación (A/C) y el tiempo de curado tienen sobre el valor de módulo de elasticidad del concreto, y de esta forma plantear ecuaciones que se ajusten a su comportamiento.

4. Análisis de resultados

Para la obtención del módulo de elasticidad del concreto se debe contar con la densidad de los cilindros de mortero (ρ) y luego llevar a cabo el ensayo de resistencia a la compresión, de esta forma se obtiene el valor de módulo de elasticidad estático (E_s) [4], utilizando la ecuación (4). De manera alterna se halla un valor de módulo de elasticidad teórico (E_t), que se encuentra por velocidades de onda mediante ensayos no-destructivos, tales como el UPV y el Impact-Echo, donde la ecuación (3) muestra la relación entre las variables y E_t , y cuyos resultados se muestran en las Figuras 1 y 2.

$$E = \rho^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f'c} \quad \text{En Mpa} \quad (4)$$

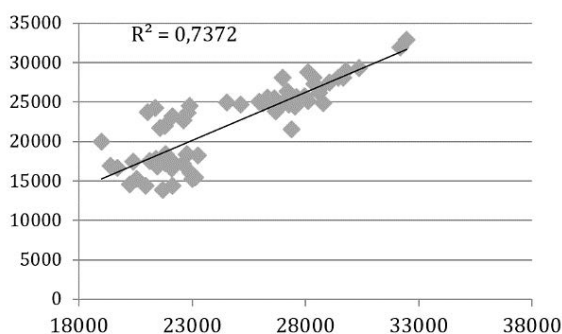


Figura 1. Relación de E-estático vs Et-UPV

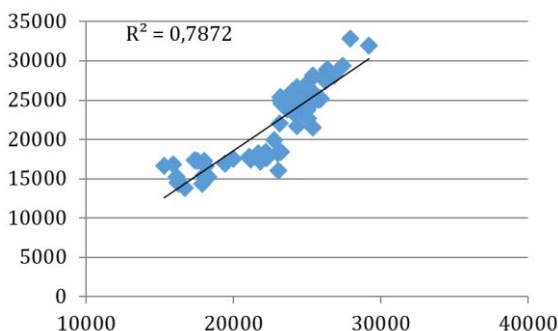


Figura 2. Relación de E-estático vs Et-I.E

Para determinar la densidad característica, se secan las muestras al horno durante 80 minutos a una temperatura de 110°C. Posteriormente, teniendo las dimensiones de los cilindros y utilizando la ecuación (5), se encuentra el valor de ρ para cada probeta.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (5)$$

Todos los resultados de los valores promedios de los ensayos de $f'c$, UPV e Impact-Echo pertenecen a cilindros de concreto que fueron fraguados durante 14 y 28 días, todas las probetas fueron sujetas a las pruebas mencionados previamente. Debido que E_t depende de la velocidad y a que se tiene una para cada ensayo no-destructivo, se resuelve hacer énfasis en la variación de la velocidad con respecto a la relación (A/C).

4.1 Variación de la velocidad con respecto a la relación A/C

Existe una relación clara entre (A/C) y la velocidad de UPV, la cual se espera que descienda cuando la relación agua/cemento aumente [1, 2]. Esto puede deberse al peso unitario del material, porque es una variable que afecta directamente la velocidad [16]. Una mezcla con relación (A/C) menor tiene menos vacíos entre poros, comparada con una relación (A/C) mayor, esto hace que el viaje de la onda no se vea afectado y recorra la probeta más rápidamente. En las Figura 3 y 4 se aprecia este comportamiento y también que aumenta significativamente la velocidad con la edad de fraguado. Si se sigue exhaustivamente la edad de fraguado la velocidad tiende a aumentar de manera logarítmica con el tiempo [4].

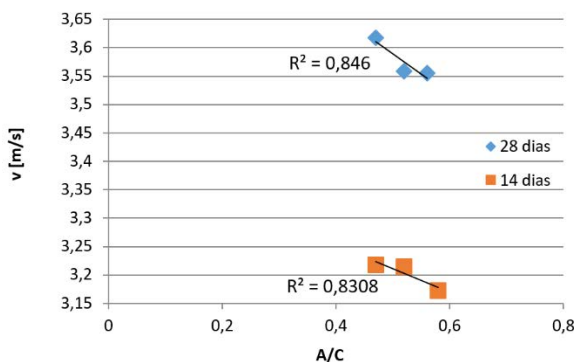


Figura 3. Velocidad UPV vs A/C

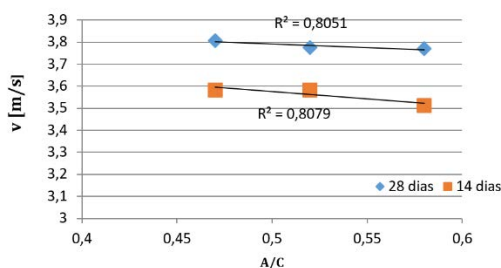


Figura 4. Velocidad I.E. vs A/C

De manera análoga se comporta la velocidad de onda de Impact-Echo, que se observa en la Figura 3, donde se puede llegar a explicar este fenómeno gracias a que los dos ensayos no-destructivos tienen el mismo fundamento teórico (ACI 228), debido a que la diferencia entre los ensayos está en el receptor de onda. El UPV debe tener el receptor al otro lado del objeto de estudio, contrario al Impact-Echo, donde no es necesario acceder al otro lado del elemento, además que cuenta con su receptor a pocos centímetros del emisor.

4.2 Planteamiento de las ecuaciones propias de los END

Teniendo en cuenta los ensayos efectuados a cada probeta, en las Figuras 1y 2 se relacionan los valores de módulo estático en función de módulos teóricos, calculados por medio de la ecuación (3). Estos valores dependen directamente de la resistencia a la

compresión, la cual se obtiene de manera directa por medio de la prensa hidráulica y de la velocidad captada por los equipos, para los módulos de elasticidad estático y teórico, respectivamente.

Las Figuras 1 y 2 muestran dispersiones aceptables, tal como se refleja en el coeficiente de correlación (R^2) y en el porcentaje de error obtenido entre los datos. Debido a esto y con el fin de mejorar esta dispersión, se decide plantear ecuaciones propias obtenidas a partir de los valores tomados por medio de los ensayos no-destructivos. Para evitar tal variación entre los datos, se decide hacer un análisis más detallado, con el fin de observar la mayor cantidad de información sobre la influencia de las diferentes variables que puedan afectar directamente el módulo de elasticidad. Para el análisis se divide la información de la siguiente manera:

- Datos reales
 - $f'c$ real (leído el lab.)
 - E-estático (desde *ecuación NSR-10*)
- Datos teóricos
 - I.E.
 - Velocidad
 - E (desde *ecuación ACI 228*)
 - E (ajustado: $C_p, f'c, \rho$) vs. Es
 - UPV
 - Velocidad
 - E (desde *ecuación ACI 228*)
 - E (ajustado: $C_p, f'c, \rho$) vs. Es

La ecuación (3) muestra que la velocidad es significativa en la determinación del módulo de elasticidad, lo mismo que la densidad y el coeficiente de Poisson. Esta última variable tiene un valor constante para esta investigación, que será tomado como 0,2 debido a que en concretos no se percibe gran variación cuando este factor presenta valores cercanos [14].

Para plantear las ecuaciones correspondientes a cada ensayo, se deben analizar por separado las diferentes mezclas de concreto, los ensayos no-destructivos y la edad de curado. Para obtener los datos se procede con la ejecución de los ensayos no-destructivos en cuestión, consecutivamente se dispone a procesarlos por medio del software propio de cada uno de estos y, posteriormente, se obtienen velocidades promedio de cada uno de los ensayos para cada probeta sometida a las pruebas, es decir, se obtienen dos velocidades para cada cilindro de concreto. A continuación, los datos se incorporan a la ecuación (3) para obtener el valor de E_t . De esta manera se tienen dos módulos de elasticidad teóricos para cada probeta.

Se desea realizar una relación entre los datos de módulo de elasticidad estático y los datos de módulo de elasticidad teóricos a partir de velocidades medidas en laboratorio. Además, analizar y proponer ecuaciones que se acerquen a los valores calculados con la ecuación (4). Para esto se emplea el software estadístico Statgraphics ®.

- *Planteamiento ecuación I.E para 14 días*

Inicialmente se planteó una regresión lineal múltiple que relaciona E-estático con la densidad y la velocidad tomada con los equipos I.E y UPV. Para un mayor ajuste de las ecuaciones planteadas se decide separar los datos por relación (A/C). Las Figuras 5 a 7 presentan el valor de R^2 para cada mezcla de concreto y su respectivo ajuste gráfico; asimismo, en la Tabla 6 se exponen las ecuaciones en donde figuran los valores de E_s ajustados en función de densidad y velocidad. Los datos de E_s obtenidos por medio de las

ecuaciones descritas en la Tabla 6 presentan errores promedio menores a 5%, estos datos se presentan más detalladamente en la Tabla 7.

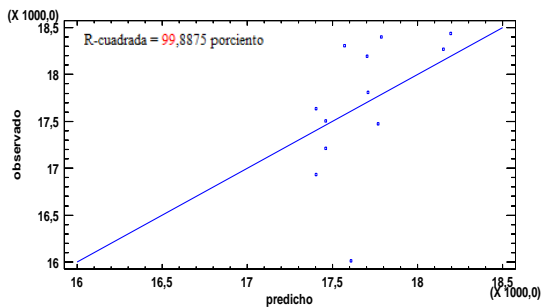


Figura 5. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,47

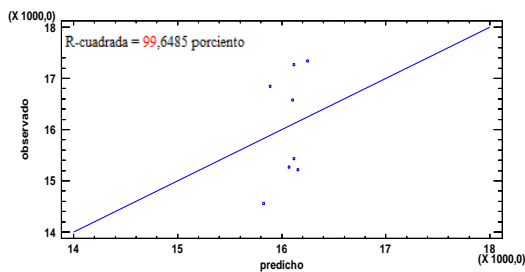


Figura 6. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,52

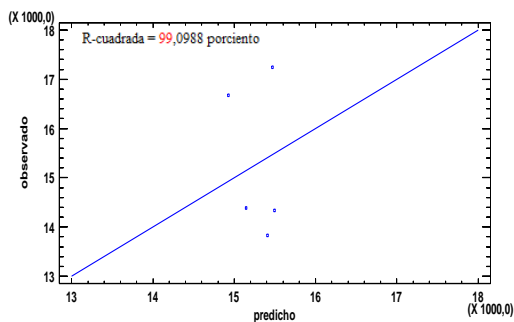


Figura 7. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,58

Tabla 6. Tabla de ecuaciones según su relación A/C (I.E)

I.E.		
Edad	A/C	Ecuación
14	0,58	$Es = 3,51689 \cdot \rho + 2,49275 \cdot C_p$ (6)
	0,52	$Es = 6,32782 \cdot \rho + 0,455223 \cdot C_p$ (7)
	0,47	$Es = 8,00824 \cdot \rho - 0,329035 \cdot C_p$ (8)

Donde:

- ρ es la densidad en $[kg/m^3]$
- V es la velocidad en $[m/s]$

Tabla 7. Tabla de porcentaje de error a 14 días: A/C (I.E)

I.E.				
Edad	A/C	Error promedio %	Error % Max	Error % min
14	0,58	9,11	11,38	5,29
	0,52	5,77	8,72	2,88
	0,47	2,50	9,98	0,28
Error promedio		4,87		

▪ *Planteamiento ecuación I.E para 28 días*

De forma paralela se hacen los análisis de datos para los resultados obtenidos por medio de ensayos destructivos y no-destructivos para el día 28. Se plantean las mismas condiciones de análisis, logrando un error promedio entre los datos de E_s muy cercano a 3% (Tabla 8). Las Figuras 8 a 10 muestran los ajustes de los datos y su respectivo R^2 para cada relación (A/C). Adicionalmente, se presentan las ecuaciones de las líneas en la Tabla 9 en función de la densidad y la velocidad.

Tabla 8. Tabla de porcentaje de error a 28 días A/C (I.E)

		I.E.		
Edad	A/C	Error promedio %	Error % Max	Error % min
28	0,58	3,56	6,80	1,15
	0,52	2,35	12,66	0,02
	0,47	3,25	7,54	0,05
Error promedio		3,02		

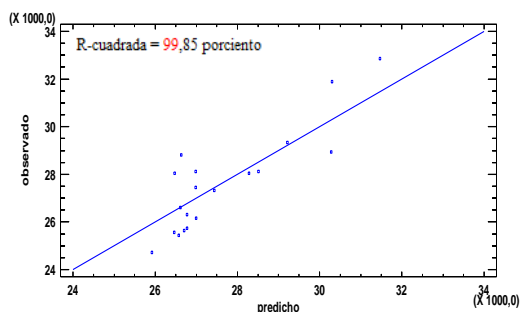


Figura 8. E_s en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,47

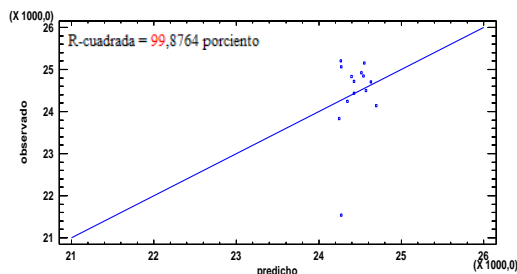


Figura 9. E_s en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,52

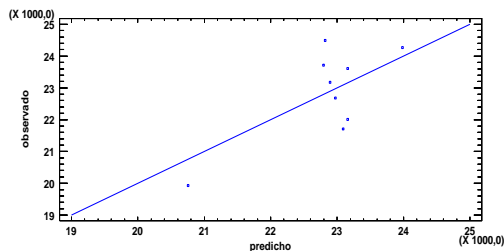


Figura 10. E_s en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,58

Tabla 9. Tabla de ecuaciones según su relación A/C (I.E)

		I.E.	
Edad	A/C	Ecuación	
28	0,58	$E_s = 14,4687 \cdot \rho - 3,24661 \cdot C_p$	(9)
	0,52	$E_s = 10,1875 \cdot \rho + 0,113467 \cdot C_p$	(10)
	0,47	$E_s = 14,0648 \cdot \rho - 1,90938 \cdot C_p$	(11)

Donde:

- ρ es la densidad en $[\text{kg}/\text{m}^3]$
- C_p es la velocidad en $[\text{m}/\text{s}]$

Analizando los puntos de la Figura 8, se puede observar que uno de los valores se encuentra por fuera del conjunto, a pesar de esto solamente se podría asegurar que los datos no se correlacionan de forma lineal, siempre y cuando el comportamiento total tomara una forma circular, de lo contrario y debido a los efectos de escala de las gráficas, no se puede asegurar que los datos no se relacionan de forma lineal [17].

▪ *Planteamiento ecuación UPV para 14 días*

Dado que el UPV tiene el mismo principio teórico que el Impact-Echo, se estipulan las mismas condiciones para el análisis. Se plantea una regresión lineal múltiple que relacione el módulo de elasticidad estático hallado con la ecuación (4) y las variables densidad y velocidad. Los datos estudiados pertenecen a una edad de curado de 14 días. En las Figuras 11 a 13 se muestran los datos graficados con base a las ecuaciones mostradas en la Tabla 10. Los datos tienen un error promedio de 5% como se muestra en la Tabla 11.

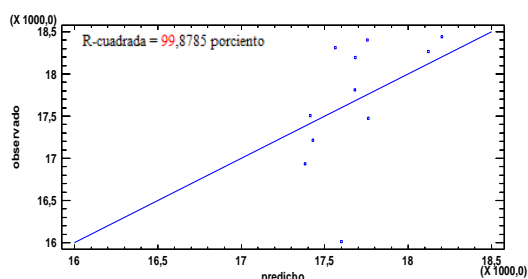


Figura 11. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,47

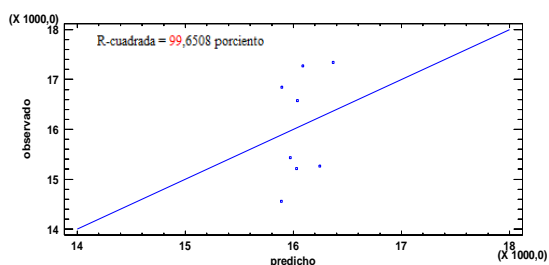


Figura 12. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,52

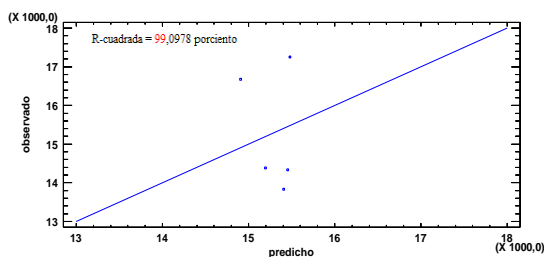


Figura 13. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,58.

Tabla 10. Tabla de ecuaciones según su relación A/C (UPV)

UPV		
Edad	A/C	Ecuación
14	0,58	$E_{\text{ajustado}} = 2,5563 \cdot \rho + 2,9210 \cdot C_p$ (12)
	0,52	$E_{\text{ajustado}} = 8,5586 \cdot \rho - 1,2128 \cdot C_p$ (13)
	0,47	$E_{\text{ajustado}} = 7,9273 \cdot \rho - 0,27598 \cdot C_p$ (14)

Donde:

- ρ es la densidad en $[\text{kg}/\text{m}^3]$
- C_p es la velocidad en $[\text{m}/\text{s}]$

Tabla 11. Tabla de porcentaje de error a 14 días A/C (UPV)

UPV				
Edad	A/C	Error promedio %	error % Max	error % min
14	0,58	9,13	11,38	5,62
	0,52	5,73	9,16	3,28
	0,47	2,65	9,91	0,54
Error promedio		5,03		

- *Planteamiento ecuación UPV para 28 días de fraguado*

Después de realizar el ensayo de UPV se analizan los datos en el software del equipo, que ofrece información detallada sobre la velocidad de recorrido de la onda. Estos datos pertenecen a una edad de 28 días de fraguado y se describen las ecuaciones (15) a (17), dependiendo de la relación (A/C), como se muestra en la Tabla 13. Las Figuras 13 a 15 muestran de manera gráfica la relación de E_s en función de la densidad y la velocidad y de acuerdo con las ecuaciones de la Tabla 14.

Tabla 13. Tabla de porcentaje de error a 28 días A/C (UPV)

UPV				
Edad	A/C	Error promedio %	Error % Max	Error % min
28	0,58	3,80	7,00	1,23
	0,52	2,38	12,20	0,05
	0,47	2,96	7,52	0,10
Error promedio		2,94		

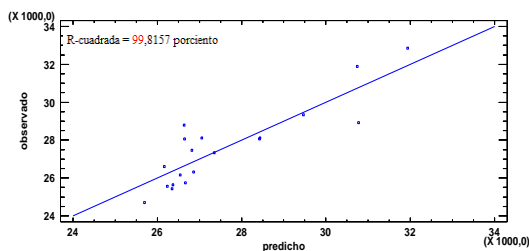


Figura 13. E_s en función de velocidad, $f'c$ y densidad

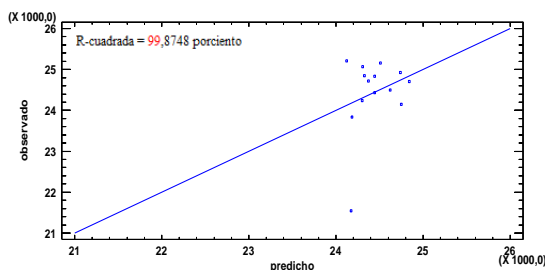


Figura 14. E_s en función de velocidad, $f'c$ y densidad

Tabla 14. Tabla de ecuaciones según su relación A/C (UPV)

UPV			
Edad	A/C	Ecuación	
28	0,58	E ajustado= $12,3626 \cdot \rho - 1,89335 \cdot C_p$	(15)
	0,52	E ajustado = $12,9532 \cdot \rho - 1,73364 \cdot C_p$	(16)
	0,47	E ajustado = $16,5528 \cdot \rho - 3,47792 \cdot C_p$	(17)

Donde:

- ρ es la densidad en $[\text{kg}/\text{m}^3]$
- C_p es la velocidad en $[\text{m}/\text{s}]$

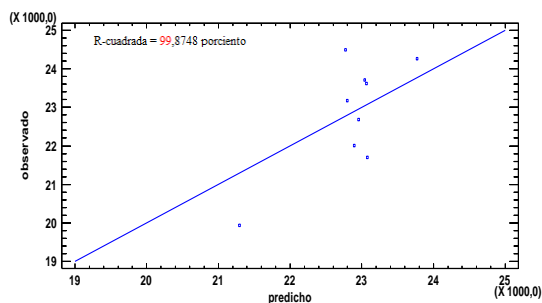


Figura 15. E en función de la velocidad, $f'c$, densidad

4.3 Análisis de datos obtenidos desde ensayos no-destructivos

Se observa que los datos obtenidos por medio de las ecuaciones propias de I.E. y UPV para el día 28, tienen un error promedio más bajo que los deducidos de las ecuaciones propuestas para el día 14. Esto puede llegar a explicarse por dos razones principalmente: 1) a la edad de 14 días las reacciones químicas de hidratación están en una forma termoquímica más activa que a la edad de 28 días, y 2) el número de datos para las dos edades son diferentes, es decir, la cantidad de cilindros varían conforme a la relación (A/C) y edad, esto expone una muestra poblacional diferente para cada edad de curado y por esto las condiciones de evaluación no son las mismas.

4.4 Correlación de módulo de elasticidad estático con teórico

Para correlacionar las ecuaciones planteadas anteriormente con los ensayos no-destructivos se procede con el siguiente razonamiento: se quiere llegar a relacionar los valores teóricos y estáticos de alguna manera que puedan alcanzar los objetivos de la presente investigación; para ello se ha pensado en recurrir a las ecuaciones obtenidas desde los ensayos no-destructivos. Estas ecuaciones (6 a 17) describen el módulo de elasticidad estático ajustado con un porcentaje de error promedio del 3,7%.

- *Correlación de módulo de elasticidad real con las ecuaciones propias de UPV*

Teniendo en cuenta el planteamiento anterior se presenta la correlación de los valores de módulo de elasticidad, por medio de las ecuaciones obtenidas desde cada uno de los ensayos no-destructivos y los valores conseguidos por medio del ensayo de compresión simple de las probetas. Como se puede observar en la Figura 16, los valores obtenidos por medio del ensayo de UPV son aproximados a los valores de módulo de elasticidad estático logrados durante la investigación. Como muestra el valor de R^2 esta correlación permite asegurar que las ecuaciones planteadas (12 a 17) son válidas a la hora de calcular un valor de módulo de elasticidad, cuando se cuenta con el valor de velocidad tomado en campo por medio del UPV. Para este caso el error con respecto al valor estático es de 3,7% aproximadamente.

- *Correlación de módulo de elasticidad real con las ecuaciones obtenidas de I.E*

La misma situación se observa con respecto a los valores de módulo obtenidos a partir del ensayo Impact Echo (Figura 17), donde se puede evidenciar, con ayuda del valor de R^2 , que los valores de módulo obtenidos por medio del I.E son cercanos a los valores calculados a partir del ensayo de compresión simple. Al igual que en el caso anterior,

esto demuestra que las ecuaciones planteadas para el I.E (6 a 11) son válidas para calcular un valor aproximado de módulo de elasticidad, cuando se cuenta con el valor de velocidad tomado en campo a través del Impact Echo. En este caso el error con respecto al valor real es de 3,7% aproximadamente.

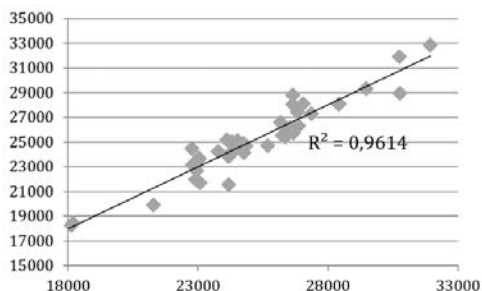


Figura 16. Correlación de los valores de módulo de elasticidad E-estático (MPa) vs. E-UPV (MPa)

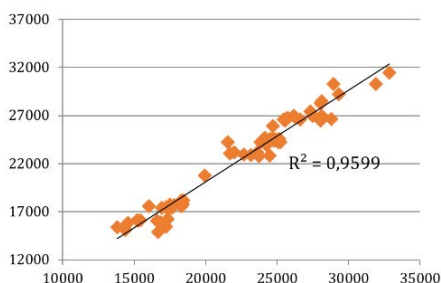


Figura 17. Correlación de los valores de módulo de elasticidad E-estático (MPa) vs E-I.E (MPa)

▪ *Análisis adicional de módulo*

Se estudia el comportamiento del módulo a partir de los valores de f_c , velocidad y densidad, para lo cual se plantea una ecuación en función de dichas variables y se estima el porcentaje de error entre estos valores de módulo y el E-estático. Los resultados se muestran en la Figura 18 y las ecuaciones correspondientes se tabulan en la Tabla 14. Este mismo análisis se realiza para el caso del Impact Echo y sus valores son mostrados en la Figura 19 y Tabla 16.

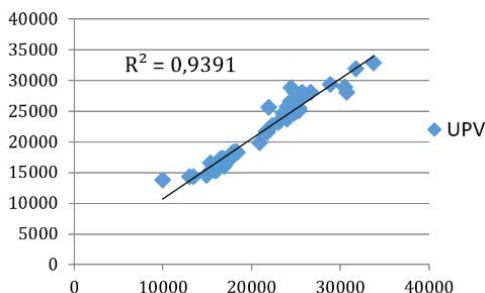


Figura 18. Valores de E-estático (MPa) vs E-UPV (MPa)

Tabla 14. Ecuaciones de módulo de elasticidad a partir de f_c , densidad y velocidad desde UPV

Edad	A/C	Ecuación
0,47	E ajustado	$= 7,3614 * \text{Densidad} + 765,925 * f_c \text{ [MPa]} - 4,95047 * \text{velocidad}$
	0,52	$E \text{ ajustado} = -2,35819 * \text{velocidad} + 0,137676 * \text{Densidad} + 1213,15 * f_c \text{ [MPa]}$
	0,58	$E \text{ ajustado} = -2,35819 * \text{velocidad} + 0,137676 * \text{Densidad} + 1213,15 * f_c \text{ [MPa]}$
28	0,47	$E \text{ ajustado} = 500,422 * f_c \text{ [Mpa]} + 17,4489 * \text{Densidad} - 7,87243 * \text{velocidad}$
	0,52	$E \text{ ajustado} = 6,67016 * \text{Densidad} + 524,502 * f_c \text{ [MPa]} - 1,01743 * \text{velocidad}$
	0,58	$E \text{ ajustado} = -4,23995 * \text{velocidad} + 10,1012 * \text{Densidad} + 610,214 * f_c \text{ [MPa]}$

A pesar de conseguir valores de correlación muy cercanos al valor unitario y errores promedio (Tabla 15) entre datos relativamente aceptables, es necesario aclarar que el valor de f_c utilizado para el ajuste de estas ecuaciones se encontró por medio del ensayo destructivo de compresión simple, que no sería afín al planteamiento inicial del proyecto, donde se busca conocer los valores de módulo de elasticidad a partir de valores tomados sin afectar la integridad de la estructura o del elemento a estudiar.

Tabla 15. Errores promedio

	% Error min	% Error promedio	% Error max
UPV	0,06	3,60	27,80
I.E.	0,01	1,46	6,36

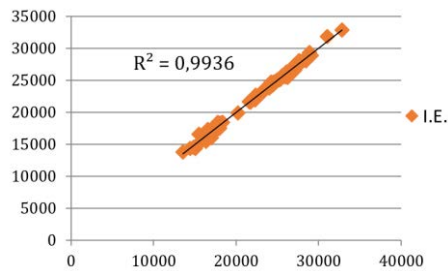


Figura 19. Valores de E-estático (MPa) vs E-I.E. (MPa)

Tabla 16. Ecuaciones de módulo de elasticidad a partir de f_c , densidad y velocidad desde I.E

Edad	A/C	Ecuación
14	0,47	E ajustado = $618,331 \cdot f_c$ [MPa] + $7,59424 \cdot$ Densidad - $4,14201 \cdot$ Cp [m/s]
	0,52	E ajustado = $-4,08596 \cdot$ Densidad + $1191,1 \cdot f_c$ [MPa] + $0,940279 \cdot$ Cp [m/s]
	0,58	E ajustado = $5,79921 \cdot$ Densidad - $3,80843 \cdot$ Cp [m/s] + $714,132 \cdot f_c$ [MPa]
28	0,47	E ajustado = $16,2136 \cdot$ Densidad - $8,64366 \cdot$ Cp [m/s] + $649,506 \cdot f_c$ [MPa]
	0,52	E ajustado = $5,48277 \cdot$ Densidad - $0,282201 \cdot$ Cp [m/s] + $530,313 \cdot f_c$ [MPa]
	0,58	E ajustado = $-4,89324 \cdot$ Cp [m/s] + $11,2596 \cdot$ densidad [kg/m^3] + $622,852 \cdot f_c$ [MPa]

Adicionalmente, se puede notar que los valores obtenidos por estas ecuaciones son muy cercanos, debido que se tienen en cuenta prácticamente las mismas variables contempladas por la ecuación de la NSR-10, con la única variación que se agrega el valor de la velocidad desde la técnica no-destructiva, es decir, finalmente se está planteando una ecuación paralela a la norma, que necesita parámetros obtenidos por medio de pruebas destructivas, pero que se pueden obtener desde memorias de cálculo, tanto estructural como de la mezcla de concreto.

▪ *Análisis adicional de velocidad*

Teniendo en cuenta que los ensayos no-destructivos ofrecen un valor directo de velocidad, se realizó el planteamiento de ecuaciones que solamente dependieran de este factor, con el fin de lograr una mejor correlación entre los datos de E-estático y los valores teóricos de E. Siguiendo este planteamiento se llegó a una serie de ecuaciones que se presentan en la Tabla 17 y en la Figura 20, para el caso del UPV.

Tabla 17. Ecuaciones de E-estático vs E-UPV (Cp)

Edad	A/C	Ecuación
14	0,47	E ajustado = $\exp(1,21096 \cdot \ln(\text{velocidad}))$
	0,52	E ajustado = $\exp(1,19899 \cdot \ln(\text{velocidad}))$
	0,58	E ajustado = $\exp(1,19464 \cdot \ln(\text{velocidad}))$
28	0,47	E ajustado = $\exp(1,24764 \cdot \ln(\text{velocidad}))$
	0,52	E ajustado = $\exp(1,23596 \cdot \ln(\text{velocidad}))$
	0,58	E ajustado = $\exp(1,24272 \cdot \ln(\text{velocidad}))$

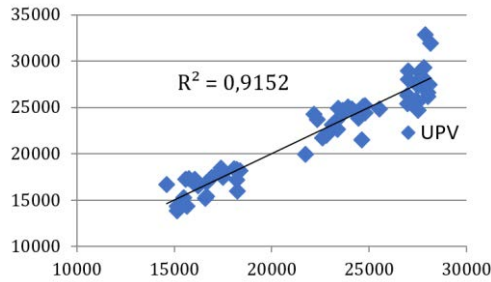


Figura 20. Valores de E-estático (MPa) vs E-UPV (MPa)

De la misma forma se realiza el análisis para los valores de módulo de elasticidad calculados por medio de la velocidad, pero obtenida desde el Impact Echo. En la Tabla 18 se muestran las ecuaciones planteadas y en la Figura 21 se muestra la correlación de estos datos con los datos de E-estático.

Tabla 18. Ecuaciones de E-estático vs E-I.E. (Cp)

I.E.		
Edad	A/C	Ecuación
14	0,47	E ajustado = $\exp(1,21093 \cdot \ln(Cp \text{ [m/s]}))$
	0,52	E ajustado = $\exp(1,21632 \cdot \ln(Cp \text{ [m/s]}))$
	0,58	E ajustado = $\exp(1,21293 \cdot \ln(Cp \text{ [m/s]}))$
28	0,47	E ajustado = $\exp(1,25625 \cdot \ln(Cp \text{ [m/s]}))$
	0,52	E ajustado = $\exp(1,24538 \cdot \ln(Cp \text{ [m/s]}))$
	0,58	E ajustado = $\exp(1,23434 \cdot \ln(Cp \text{ [m/s]}))$

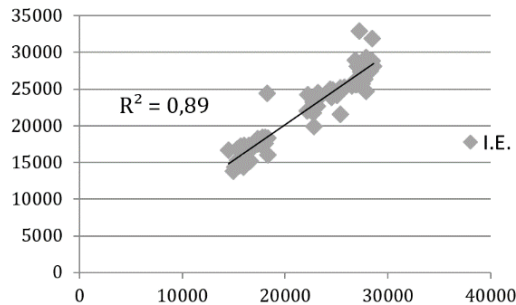


Figura 21. Valores de E-estático (MPa) vs E-I.E (MPa)

De acuerdo con el análisis anterior se puede notar que los datos de E-teórico, tomados a partir de los dos ensayos no-destructivos, se ajustan adecuadamente a los valores de E-estático, calculados a partir de la ecuación planteada en la NSR-10. Lo que se puede observar a partir del valor de coeficiente de correlación. Esto muestra la relación que existe entre la velocidad y el módulo de elasticidad, además, permite validar las ecuaciones planteadas para cada uno de estos ensayos.

4.5 Evaluación de la ecuación contemplada en la NSR-10 con las de I.E y UPV

Luego de tener las ecuaciones a partir de los ensayos no-destructivos y teniendo certeza que los valores obtenidos de módulo de elasticidad son válidos, se procede a evaluar las ecuaciones con la planteada en la NSR-10 (ecuación (4)). Para ello se toman los valores teóricos de resistencia a la compresión y velocidad para el día 28 y se reemplazan en estas ecuaciones, con el fin de observar los valores obtenidos y sus porcentajes de error correspondientes. Los valores teóricos de resistencia a la compresión son aquellos para los cuales fueron realizados los diseños de mezcla, es decir, 21.0, 24.5 y 28.0 MPa. Partiendo de estos valores de resistencia a la compresión y usando la fórmula

de velocidad planteada en la ACI 228, se encuentra el valor teórico de velocidad para el día 28, que se aplica a todas las ecuaciones. Estos valores se presentan en la Tabla 19. Partiendo de estos datos se procede a calcular el valor de módulo de elasticidad con ayuda de cada ecuación y posteriormente el error entre estos.

Tabla 19. Valores teóricos de $f'c$ y velocidad

$f'c$ [MPa]	Densidad [Kg/m ³]	Velocidad [m/s]
21,0	2300	3278,0
24,5	2300	3392,7
28,0	2300	3522,0

- *Evaluación de la ecuación de la NSR-10 con las obtenidas por medio del ensayo de UPV*

Como se planteó anteriormente, se evalúa la ecuación (4) con las obtenidas desde UPV. La Tabla 20 muestra los resultados de E y su error correspondiente.

Tabla 20. Errores desde E-NSR-10 y E-UPV

Ecuacion propia UPV	Ecuacion Norma NSR-10	% Error
22227,58	21735,51	2,264
23910,69	23477,04	1,847
25822,21	25098,01	2,885

- *Evaluación de la ecuación de la NSR-10 con las obtenidas por medio del ensayo de I.E*

Como en el caso anterior, se evalúa la ecuación (4) con las ecuaciones obtenidas de I.E. La Tabla 21 muestra los resultados de módulo y su error correspondiente.

Tabla 21. Errores desde E-NSR-10 y E-I.E

Ecuacion propia I.E	Ecuacion Norma NSR-10	% Error
22635.62	21735.51	4.14
23816.21	23477.04	1.44
25624.20	25098.01	2.10

5. Conclusiones

- Al interpretar los valores obtenidos por los END, se puede notar la influencia que la relación A/C tiene en el valor de velocidad y se puede observar que el valor de velocidad disminuye conforme aumenta el valor de la relación A/C, esto se debe a que la mayor cantidad de agua se transforma en vacíos que generan un medio ligeramente poroso, lo cual resulta en mayor tiempo de desplazamiento de la onda. Teniendo en cuenta esto, la velocidad de propagación del UPV se ve más afectada, en comparación a la velocidad de propagación del Impact Echo.
- Con respecto a la edad del concreto se observó que a medida que aumentan los días de curado aumentan los valores de velocidad en ambos casos, esto se debe a que el valor de velocidad depende directamente de la resistencia del elemento analizado y, como se conoce, la resistencia a la compresión del concreto aumenta con el paso de los días.
- En el caso del módulo de elasticidad se observa que este valor es bastante susceptible a los cambios en la densidad del concreto y de la resistencia a la compresión, y en el caso de los END al valor de velocidad, que, como se planteó anteriormente, depende a su vez de la edad del concreto y de la relación A/C.
- Debido a la dispersión de los datos tomados a las probetas y su comportamiento particular con respecto a la relación A/C, no fue posible plantear una ecuación única

que se ajustara a las diferentes mezclas de cemento para una misma edad, esto se podría lograr por medio de análisis estadísticos que se proponen para etapas posteriores a esta investigación.

- Debido al comportamiento heterogéneo del concreto, es recomendable tener tamaños de muestras significativos, con el fin lograr una mejor correlación entre módulos de elasticidad, tales como los investigados en este trabajo.

Observaciones

- A pesar del análisis estadístico realizado para el tamaño de muestra óptimo de las probetas, se recomienda tener un número de muestras más grande que el usado para esta investigación, que se logra no solo con el análisis de la resistencia hecho para este caso, sino también teniendo en cuenta variables tales como velocidad y tamaño de agregado.
- Para esta investigación no se tuvo en cuenta la influencia que tiene en tamaño del agregado en el valor del módulo de elasticidad, lo que se podría interpretar como una limitación porque, como se plantea en otras investigaciones, este es un parámetro de gran importancia en el análisis del concreto.
- Para futuras investigaciones se recomienda realizar un ensayo de esfuerzo-deformación, de modo que se cuente con el parámetro de módulo de elasticidad real del concreto, esto con el fin de tener valores aún más cercanos a los obtenidos en esta investigación.
- Aunque algunos datos se encuentran distantes de la línea de correlación descrita por las ecuaciones planteadas, no se puede asegurar desde el punto de vista gráfico que los datos no se relacionan de forma lineal.

Agradecimientos

La presente investigación se desarrolló gracias a los aportes de la Universidad Industrial de Santander, la empresa cementera CEMEX seccional Bucaramanga y la empresa de ingeniería/consultoría KER de Bucaramanga, especialmente a su gerente Ing. Carlos Ruíz quien aportó en gran parte del proceso intelectual de la misma.

Referencias

- [1] Quintero, L. et al. (2011). [Relación entre la resistencia a la compresión y la porosidad del concreto evaluado a partir de parámetros ultrasónicos](#). Revista ION Bucaramanga 24(1), pp. 69-76.
- [2] Bogas, J., Gomes, M. & Gomes, A. (2013). [Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive pulse velocity method](#). Ultrasonic 53(5), pp. 962-972.
- [3] Serrano, M. & Pérez, D. (2010). [Análisis de sensibilidad para estimar el módulo de elasticidad estático en concreto](#). Concreto y cemento. Investigación y desarrollo 2(1), pp. 17-30.
- [4] Sanabria, R. & Rincón, L. (2010). Evaluación del efecto de la relación agua/cemento, tamaño de agregado y tiempo de curado sobre la velocidad de pulso ultrasónico en concreto sin refuerzo. Trabajo de grado. Universidad industrial de Santander.
- [5] Solís, R., Moreno, E. & Castillo, W. (2004). [Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados](#). Ingeniería 8(2), pp. 41-52.
- [6] Herrera, R., Moreno, E. & Borroto, L. (1978). [Determinación de las frecuencias fundamentales mediante análisis de frecuencia por Impacto-Eco](#). Online [Feb 2015].
- [7] ACI (2013). [ACI 228.2R-13. Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures](#). American Concrete Institute.
- [8] Lu, X. et al. (2013). [Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method](#). Construction and Building Materials 47, pp. 231-239.
- [9] ICONTEC (2007). [Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. NTC 77](#). Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá.

- [10] ICONTEC (1995). [Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados](#). NTC 92. Instituto Colombiano de Normas Técnicas Bogotá.
- [11] ICONTEC (2000). [Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto](#). NTC 127. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá.
- [12] ICONTEC (1995). [Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso](#). NTC 176. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá.
- [13] ICONTEC (1995). [Método para determinar el peso específico y la absorción del agregado fino](#). NTC 237. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá.
- [14] ACI (1998). [Standard Practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete](#). ACI 211.1 91. American Concrete Institute.
- [15] Rivera, G. (2010). [Concreto Simple](#). Cali: Universidad del Cauca.
- [16] Sánchez, D. (2001). [Tecnología del concreto y mortero](#). Bogotá: Pontificia Universidad javeriana.
- [17] Camacho, C. [Coeficiente de correlación lineal de Pearson](#). Online [Jun 2015].
- [18] Malhotra, V. & Carino, N. (2003). [Handbook on non-destructive testing of concrete](#). Boca Raton: CRC Press.

12. Changes in the Engineering & Construction Industry in the last few years

Martha Garcia S.

Purdue University North West campus. Westville, Indiana, USA

1. Introduction: From fragmented to integrated project design and delivery

The engineering and construction industry (E&C) did not change too much for many centuries and has been one of the slowest to incorporate the new technologies. It was doing things in the same way for centuries, but in the last few years due to the development of new technologies, the E&C industry is changing in a high speed. Some of the big changes are due to the introduction of the 3D modeling, the cloud storage and the introduction of the Building Information Modeling that totally is transforming the industry from linear (Figure 1) to a more collaborative e integrated industry.

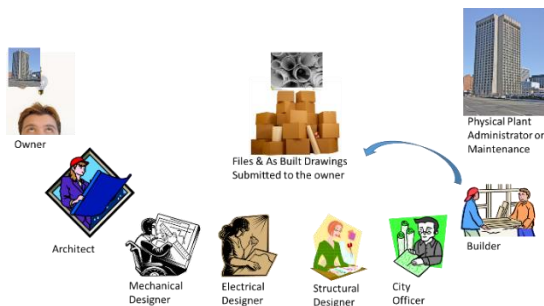


Figure 1. Fragmented project design and delivery with many independent lives

The lifecycle of a project was residing in the professionals with many different short lives and now is a single project life that goes from the owner's idea, design, construction, occupancy, maintenance and final disposal after the structure is no longer in use and does not become a harm for the world. The life span of the project is no longer a set of short lives, thanks to the database that becomes like the brain of the project. For example, the life span for the project for the structural engineer went from the moment he/she received the architectural drawings to incorporate on them the structural drawings. If some changes were required after, a new life span initiated. It was the way of doing business, with fragmented lives when each professional needs to wait until the previous consultant finished his/her part.

2. The rolls of the architect, the owner, and the builder

The owner of the project is the first person or entity that have an idea or requires a building, or home, or a project. In general, he or she, provides the money for the design and construction using his/her own funds, or money from a loan. Since no all owners know about design and construction, they approach most of the time to the architects.

For centuries, the architect, throughout history, has being a master building who held responsibility for both the design and the construction of the building [1] the architect use to design and produce the blue prints in two-dimensional style. The architectural drawings were used by the mechanical, electrical and structural engineers to produce in two-dimensional style their own designs that then were interpreted by the builders who participate in the bid process. However, today, the role of the architect has evolved into a profession that differs from the historical definition. The term architect comes from the ancient Greece "arkhi" meant head chief or master, and "Tekton" meant builder [2].

Growth led to new technologies and techniques and they led to specialization. As a result, the master builder lost expertise in all building disciplines. This is when the master builder separated into two professionals: the designer and the builder and then the same happened to the builder who separate in different fields to become the sub-contractors [3].

The architect coordinated the work of the mentioned professionals while doing their design and the bid process. It shows how fragmented the industry was. The life of any project was fragmented because for a professional starts their own work, the previous should have finished theirs. It was important for the subsequent work in other disciplines that the architectural drawings were the most complete possible to avoid further changes in succeeding work. In all cases a 2D blueprint drawings were produced and with the specifications, soil report and manual documents, the bid was opened.

The builder acquired all documents and prepared the bid documents to be submitted at the specified date. Very common rule for awarding the contract was to the low bidder. Low bidders in a competitive world, brought some consequences that we can see very clear through the lenses of the life cycle costing of some parts for a building as is shown in the Figure 2.

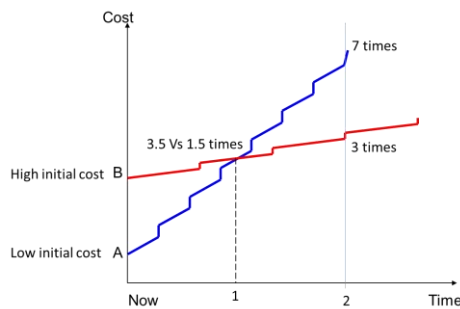


Figure 2. Whole Life Cycle Costing for equipment or other elements for a building

The builder to get the low bid needs to look ways to lower the expenses. Well, suppose a builder received two different quotations for a specific equipment, say for example a water heater. The first quotation “A” is lower than “B”. Both products fulfill the specifications provided by the architects. What is different? The life span. Product “A” has a 2 years’ life span while “B” has 5 years. It means that for a specific time “2” in the life of the building, you have to change 7 times the water heater “A” while if the “B” is selected, only 3 times needs to be changed. It is very easy in the graphic 2, to know whom will pay the extra when the builder selects product “A”.

Today with BIM, all the work is done simultaneously (Figure 3). The life span goes from the owner’s idea to the disposal of the building after it is no longer in service. The single data base is like the brain that keeps all the information from the idea to the dead of the building. The single database resides at the cloud (Figure 3) through a contract that the owner signs to storage all the information. The owner of the project, is the owner of all the information, and he or she can give access to data to the different players on the project, or to the company that is in charge of the administration and maintenance. To feed the data, the owner and the architect decide from the beginning the programs they want to use with the drawings, the estimate, the schedule etc. The owner pays for the access in the same way you pay monthly for other services in internet.

One of the activities the integrated process do is called value engineering after the cost of the building is found. The more complex the building projects, owners tend to look for

best value. Here is where the whole life cycle cost of the different components can play a role here. Previously builders to get the low bid selected a shipper equipment's with a low cost and owners at the end pay replacements more frequently at his or her expenses, making the building more expensive in a long run. Today, the value engineering with the life cycle cost take care of the long run extra expenses in maintenance after the building is turn to the owner by the builder.

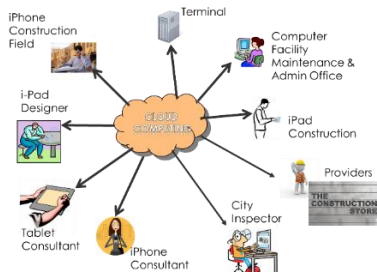


Figure 3. Integrated Process or Corporate Engineering

3. Paperless design and construction: Wireless integration

Software today does not do the drawings line by line as we previously did in CAD (Figure 4). The 3D model is build with 3D objects that exists in a data bases. In a similar way most of us recall playing with LEGO blocks. The software for "BIM Modeling" is connected to a database that can be expanded with the needs of the project. Whenever there is a necessity for an object that is not in the database, there is access to other wider databases where one can get the wanted item. For example, if a project calls for a lamp or a stair from X or Y factory, simply access the database provided by the software vendor and from there take the item to add to the 3D model. Software manufacturers receive 3D drawings from the manufacturers and place them in folders classified for their customers to use.

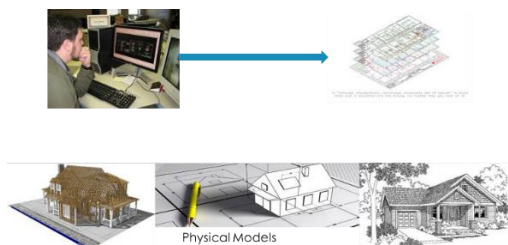


Figure 4. CAD Drafting –line by line

Product sales have changed greatly as a result of new technologies. Before product manufacturers and suppliers had to pay to see their products included in general catalogs that went to those professionals who had subscriptions to catalogs, or the manufacturer sent salesmen to visit design professionals providing catalogs so they could offer them to their customers. Today, manufacturers promote their products through web pages, providing electronic catalogs for free, where each object is identified and stored in a database containing prices, features, finished dimensions and 3D drawings. Designers then take those objects as they need in a block form and place them in their 3D models.

After the 3D model is created (Figure 5), the software cameras display the model as we have been accustomed to see in the traditional drawings, showing each of the floors, ceilings, walls, or any interior, or exterior view in two dimensions. The software does the drawings for us, but this time, not line by line as we were accustomed to do in CAD.

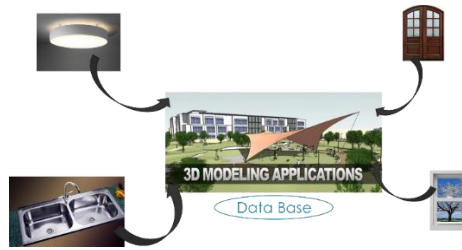


Figure 5. 3D Modeling

Architects and engineers in the past were accustomed to work independently in their own offices and exchange drawings with engineers from other disciplines. In larger companies with various professionals and servers, multiple professionals could work simultaneously on the same project because the software allowed them to do so and have only one file at a central site called a server. To solve many of the problems of simultaneous work, software packages that act as auditors were developed. First to find inconsistencies through "Clash Detection," (Figure 6) or errors, for example an air conditioning duct crossing a structural beam, or two pipes occupying the same space. Second, packages that can run simulations for energy analysis, analysis of flows in ventilation or air conditioning. Third and finally, packages that track changes that occur in the model to name just some of the applications on the market.

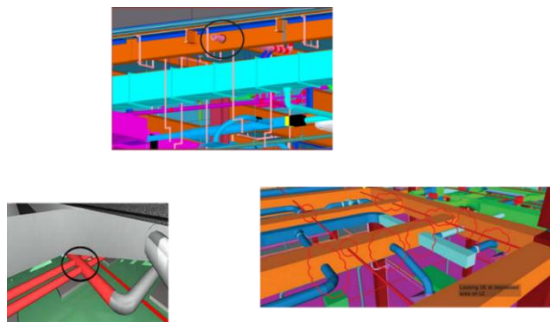


Figure 6. Clash Detection

In a recent year, companies that produce software are no longer selling the software in disks, today they provide services in a monthly statements and file the information in the cloud. It is one of the main reasons why the owners with the help of the architect, decide from the beginning where to storage the information for the project and the software to be used to feed the database of the project with the big advantage that all the designers and players can work simultaneously wireless and remote control feeding the single data base residing in the cloud. Today all of this is possible due that data bases can talk to each other after more than 20 years of efforts from different associations that finally arrived to an arrangement that made possible the communication in between.

Due to a different device in the market, the cloud storage and applications on the tablets and phones, all the players in the engineering and construction industry are wireless and connected to a project 24 hours a day, and 7 days a week [4].

4. From 3D to 4D and 5D models

The incorporation of BIM and the progress in computer programs and capacity, have created the opportunity to automate the schedule of work and generate the display of the sequence of construction, creating what is known as "4D" or visualization of the constructive process. The drawings in "2D" required the engineer or the builder with

experience to visualize the project in three dimensions as well as the sequence of construction to proceed to meet the project's schedule. As a process it requires a lot of common sense, and was always important that a professional with experience in construction be the one creating the schedule.

To reach what is in use today, generating activities and visualizing the sequence in the model has required more than twenty years of work from many initiatives around the world. The first step consisted of generating a list of activities; the second step consisted of displaying the work schedule; the third was to automatically connect the activities and the 3D view from the BIM model [5]. With the arrival of 3D CAD and establishing the relationship of the activities and BIM, models have been able to reach the simultaneous generation of activities in the model. Production rates are provided by the team or the person responsible for developing the schedule or from up to date productivity rates from databases.

The project cost is possible due to the implementation of the parametric model that can be created with the help of BIM software [6]. With three-dimensional models supported in databases, quantities and prices can be extracted in the form of spreadsheets or exported to specialized software in estimating to quantify the costs. What was mentioned so far is known as the technology of "5D" which is maturing to the point that some software is able now to have a very close estimate from the 3D model.

Most of the existing problems are related with the different types of estimates (Preliminary versus Final). Another problem is that the estimate is based on a single, external database, as well as the choices the design team make when shopping for the software package. Yet another challenge when extracting data from the BIM model is that it has to be done by professionals with experience in estimating since the project could require temporary structures or special equipment during the construction process. "For now it appears that the construction estimate should be linked to 'clash detection' to detect the constructability of the sequence of the work to be close to reality" [7].

With specialized software like Bentley SITEOPS designing a road between two points, A and B, a line is drawn between those points and the software will produce a relevant, efficient design taking into account the minimum volumes to dig, the local codes and standards, and specifications supplied. This software substantially reduces production time, construction costs, and facilitate checking government agencies for compliance with established standards. Some software packages are so advanced that, they reproduce the new contours of the land, work scheduling (4D) and estimates (5D) immediately if the attached database is updated. In a similar way, new development with different styles of building can be designed and in short time and estimating and schedule are provided.

5. Simulations

Another change with BIM models is related to complex simulations. These can be done today thanks to new software packages that allow simulations of the physical behavior to analyze its efficiency in many aspects such as behavior; performance and energy of the structural; electrical; and mechanical, water and sewage systems; among others.

Resistance exists by some faculty or elder professionals to make designs with three-dimensional models, suggesting that students are not learning what they should because the short time required between the development of design and the drawings; but this is most likely because they do not know how to use the new tools that not only have the rules embedded within the software, but that analyze through simulations how the new

projects; building, road, water, sewer, power line etc., will behave over time. With simulations, one not only checks that it complies with codes, but can analyze the possible failures of a system over time (Figure 7).

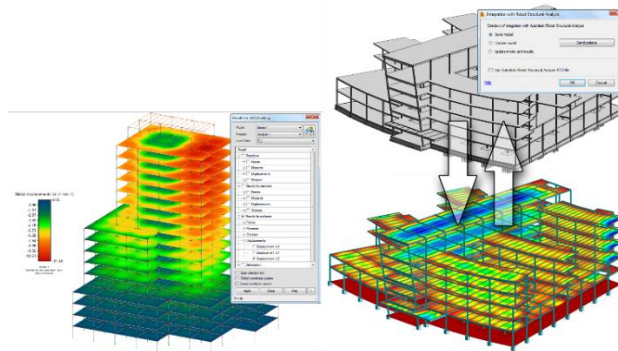


Figure 7. Simulations

For those people accustomed to use software packages for scheduling or hydro sanitary systems, it is very easy to understand what simulation means. When assigning times to each activity represented by bars joined by some sort of sequence and pressing the button that represents the clock time, the program will calculate the duration of the project. If one changes the variables, such as duration of one or more activities and presses the clock button again, the software calculates the new time for the construction. What is done here is just a simulation, where the computer calculates the duration for different routes or "paths" for the total duration. Similarly, one can do other simulations, such as calculating air flows in air ducts in a building, or the flow rates and other parameters like energy in a pipeline or in a sewer system. So calculations are much easier and drawings are produced simultaneously giving the possibility of analyzing more variables that lead to a more efficient, more economical and more detailed system.

6. Maintenance and Operations

Another factor that was making the buildings more expensive in a long term was the maintenance that frequently ended up in companies specialized in administration and have no people to know about construction or design in the various engineering disciplines. The administration rarely looks for the documents and as built drawings since they do not have too much knowledge in interpreting those drawings. Then, when damage occurs, these companies rely in the people from the insurance companies or specialized companies with high tech equipment to find problems and solutions that in general ended up being very expensive.

Builders and construction management companies are now offering to be administrators for the buildings they construct. They have the knowledge of databases, technology, construction management techniques and skills, and the 3D modeling knowledge to find very easy the parts or equipment that failed, manufacturing companies, actual cost and even the life span of the parts that allow them to have a budget in anticipation of its fail. The best way for changing parts can be determined directly from the 3D model instead of braking walls and ceilings trying to reach specific places to find or make changes. It decreases the maintenance expenses.

One real example: A high upper class high-rise residential condo building was finished in 2009 in Atlanta by a developer. In October 2015 one owner of a condo (Javier) noticed some mold smell coming from the main bedroom. He inspected the room and found mold

behind a shelf and under the carpet. Next day, he called his insurance company who advised him to find some quotations and send them to the insurance company. He approached the administration, which advised him to allow the administration to review what they found. A builder went and made a hole in the wall and lifted the carpet of the room. The hole in the wall showed no signs of water coming from the bathtub, but shows signs of water coming from the next-door condo.

At this point the administration was involved since it was required to open another hole in the neighbor's condo. Nothing was found. The administration then sends another company to Javier's condo and poured water directly over a granite shower shelf above where Javier keeps bath supplies. Water never reaches this place during regular shower usage, but they poured water over this section that ended up going behind the wall. The recommendation was to re-seal, since according to them, it was the cause for the humidity in the room. At this point it was already the middle of December when the room was repaired, painted and re-carpeted. The expenses for the owner were \$500 for the deductible and \$1,500 for the insurance company. It did not include the expenses of the company sent by the administration or any repair at the neighbor's condo.

A week later Javier found that the carpet was completely wet in the mornings. He called the repair contractor who immediately stopped by, opened the wall again and found out that the water was coming from the next door condo, as it was observed the first time. The administration was involved again and took them 1½ months to have the next door neighbor to enter into their unit and investigate the leakage further. Nothing was found and the administration contracted with a company that has the latest technology to find problems with cracked pipes. They investigated for two weeks from the 27th floor all the way to the 12th floor because from the beginning they suspected that the water was coming from the roof. While on the 12 floor where Javier's condo is located, they decided to tear more holes in the drywall separating the two units. In this opportunity they found the pipe after many attempts while destroying all the drywall in the wall. The pipe was in the middle of the separation walls between the two condos. A small section of the pipe was changed and after the wall was dried, they fixed the wall. By that time, it was the first week of June of 2016. It means the administration took 8 months to solve a simple problem that with "3D as built drawings" could be solved in a matter of minutes.

Sources of expenses and delays are due to the lack of knowledge of engineering and construction to investigate the problem in the "as built drawings" in the 3D model, where you can find in a short time, the best way to change the failed pipe instead of breaking through walls and causing time, money, and stress to the condo owner. The expenses at the end became huge since two different construction companies and a contractor from the first insurance company and the administration were involving during the 8th month investigation of a single crack pipe located between two condos. All of this long term problems can be resolve in a matter of short time, when the administrator has knowledge of the building and has access to the construction files and databases connected to "the as built 3D model". It is what is happening today. The owner of the project owns and has the files from the beginning of the design all the way during the construction and administration until the building is no longer in service and the owner has the responsibility of the final disposal. The other advantages today are that owners today prefer to have the maintenance and administration with the same builder or a company that has knowledge of construction, data bases and management skills. This major change is what is called the life cycle of the building that is a consequence of the Integrated Project Delivery or Corporate Engineering.

Actually as a consequence of the BIM and the integrated design and delivery systems, the roll of the owner is more active than before and the architect is re-gaining the role that lost with the specialization of the work. According to Taylor [1] there is a new trend in the industry that could perhaps be considered as a shift back to the master builder concept. According to Widener [8], there is a growing trend for the architect to become the lead in the design-build contract, the architect coordinates the project, including the construction in one of two ways: either as a construction manager for fee or a construction manager at risk [9].

7. 3D Models, Manufacturing and 3D Printers

Artisanal models kept the construction industry completely asleep for centuries. The digital 3D models created today by architects and engineers work in two ways: 1) Manufacturing facilities can assemble parts with high precision that will replace some of the craftsmanship that we are accustomed to see in the site construction. Manufacturing parts are assembled with precision and higher quality that allows sustainable construction with less waste than craft works.

The construction time is substantially reduced and many of the assemblies can be performed by robots in assembly lines similarly to what happens with the automotive industry. 2) Already developed 3D printers in Europe, Asia and North America can build houses in situ with concrete and other materials that require a minimum of people and a few trained workers. They have been building homes in actual size in record time of one home per day or less and have been conducting trials with different materials and concrete with concrete reinforced with fiberglass reaching resistances between 12 500 and 14 000 psi.

The 3D printers are not only transforming the business of building houses but commercial and industrial buildings too; majestic buildings from the past easily can be reproduced. We could build today, as many of the magnificent projects built in the past centuries. 3D printers with pumped concrete used as raw material can build the walls and have the ability to install additional elements such as windows, doors, beams, floors etc., which have previously been stored nearby. Each object is identified by bar codes.

The system of selecting materials by robot has been used for some time in railways where wooden beams and railing are first left in position by a robot that identifies the place where they are and saves the exact position where they will be placed by the contractor's machines on site. The software, after the final installation, will keep on its database the position in which each element was installed [10].

Manufacturing facilities and assembly companies will send prefabricated parts to the houses or buildings to any place in the world. One example of this type of work are the new buildings built in China where a 30 stories building was built in a record of 15 days. The company was going to complete by the end of March next year in Changsha the tallest skyscraper in the world, standing at 2,749ft (838m) high, over 220 floors [11] but protest from people made to drop the plans according to Peoples' Day Magazine [12], because it was situated in a wet and wild area. Similar building built in Dubai took 5 years with traditional methods. The industry of the engineering and construction sometimes moves like waves, getting the tallest buildings or using the more innovative ways to build. That is the reason, other big building is on the way. If you visit the web site for the dynamic architecture, you will get a good comprehension of what means manufacturing and assembling innovative buildings.

8. 3D Models for construction licenses and Google Glasses

For the approval of the design by the owner and/or government officers, they can have access to the 3D model and use the Google Glasses (Figure 8) the feature provided by the software to walk virtually over the project and experience the view of the different spaces; even behind walls they may see the parts that are usually hidden, like: pipes, air conditioning ducts, equipment etc. They may even experience the feeling of being in the middle of a garden or the natural lighting they will have throughout the year (Figure 9).

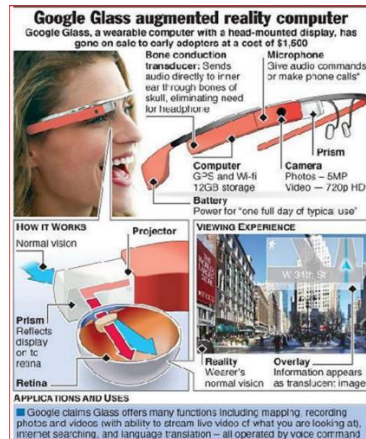


Figure 8. Google Glasses augmented reality



Figure 9. Construction License

The employees of the government body responsible for the design approval may be granted construction permits easier than before since they can make virtual tours minimizing the time required to study the drawings and converting those 2D blue prints in an imaginary 3D model to find inconsistencies in the design. The 3D model and software capabilities can reduce drastically the time spent converting 2D drawings into a 3D models. Similar things will happen for the builder

9. Construction equipment's

Construction equipment is now in the process of being reinvented and can do activities during construction in different ways than was previously accustomed. For example, in highway construction where they used to build layer by layer, new equipment with less labor are performing those activities simultaneously with greater precision and efficiency, to mention only one case.

One of the more advanced industry in the last few years is the steel industry. It was a moment that in US, the steel industry got in bankruptcy due to the way of doing their processes. It was a weakened call to change completely reinventing the whole industry. Tons of workers use to be in production lines exposed to inhuman temperatures. Today all people in the production lines are located in upper cabins with air conditioner and sit down comfortably in front of a computer. The lines of production have sensors that transmit signals to the computer that the worker analyses to accelerate or decelerate

the materials on the line. Investments and reinventing the process was the key success for this industry.

Similar things happen in installing pipes for aqueduct and sewer systems where workers are sitting comfortably in cockpits in front of a computer that graphically displays the data in numerical and graphical form, sending signals to the head of the micro-tunnel boring machine. Excavation equipment's have now GIS (Geographic Information Systems) that collect data from the satellites and the 3D model to guide the excavation to the proper contour lines facilitating the location of where the foundations of the building or other parts will be located.

Many other machines are ready invented and are being use for installing repetitive materials like bricks (Figure 10) or paves, tiles, painting, and plaster. The good part is that those machines are doing a sustainable work, since the waste factor became minimum and the productivity rates are very high compared with traditional rates done by workers.



Figure 10. Brick Layer Machine

Of course the more one has, the more one wants; every time the computer does certain functions, new ideas come up and the desire is for the computer to do more. One of the main problems associated with this is the cost that can only be absorbed by large companies. Every year software vendors update their programs so that they can communicate with others and can perform new tasks, which in turn raises prices and becomes prohibitive for small companies that gradually became relegated.

Companies that produce software, have begun to provide services through the cloud. This means that software services can now be purchased as an internet service with many more advantages. The cloud helps companies to work smarter and more economically thus saving costs and time; becoming more flexible; agile and competent than before. Moving to the cloud means that companies are more focused on the job without worrying about the technology that requires having technicians and systems engineers in each company to keep up with the internal network and installing software updates, which can be very expensive. Now small contractors may access the same packages that powerful companies use and allows them to more easily compete in the globalized world without large investments in software, hardware and technical personnel for maintenance.

10. Conclusions

The world of architecture, engineering and construction is becoming less centered on the construction drawings and switching to a world focused on databases that share

information through the cloud, avoiding duplication of information and facilitating the exchange and collaboration between different professionals and contractors, making the work easier and more precise. The new models are so detailed and in such high-resolution digital representations, almost life-like, that they require professionals with more knowledge of database software.

With the current changes and its implementation, it is expected that there will be a higher speed and efficiency in the execution of designs and constructive drawings. Scheduling and estimating will be more exact since quantity take offs and cost expenses are done by the software with updated data bases. The implementation of new technologies is making improvements in the quality of construction, lowering risks. Carrying out of projects with high levels of complexity are possible thanks to new technologies that are paving the road for product innovation and increases in customer satisfaction.

Companies that excel in the future will be those that have human and technical teams capable of designing efficient projects and/or those that can make precise constructions based on assemblies of parts that have been manufactured with green or sustainable materials and will be a common practice to include the disposal of the building when it reaches the end of its life cycle.

Work on schedules are improving since conflicts between designs from different disciplines can be avoided due to early detection and it happens prior to the physical construction. Everything is possible thanks to integrated or concurrent design processes. A change in culture to work on shared databases, a new philosophy of exchanging data is required and old professionals need to learn how to do things and forget their old habits.

One of the key changes to reach the next level of efficiency in construction is that designers should use new tools to produce construction drawings with a higher degree of accuracy than the usual detail. An efficient design will be the one in which the construction drawings come directly from the 3D model. For this to be possible, designers must create a model with great detail. Simulations of the construction process will allow to schedule the arrival of materials and equipment to the worksite just in time when it is needed to be installed or used.

Not only the design has changed, the construction process has also been changing with the emergence of 3D printers that not only changed the design with new shapes and styles, but also allowed the entry of new construction materials substituting completely handcrafted materials with a more sophisticated computer-guided, pre-manufactured parts.

References

- [1] Taylor, M. (2000). [Return of the Master Builder](#). Civil Engineer 70(3), pp. 40-43.
- [2] Berman, G. (2003). [Are forces watching the owner's hen house? An examination of the architect's and construction manager's roles in managing & administering the design & construction process](#). CM eJournal 1(27), pp. 1-27.
- [3] Thomsen, C. (2002). [Integrating Architecture, engineering and construction services](#). Online [Dec 2015].
- [4] Antevy, J. (2007). [Trends in Online Project Management](#). Online [May 2016].
- [5] Weldu, Y. & Knapp, G. (2012). [Automated Generation of 4D Building Information Modelins-through Spacial Reasoning](#). In Construction Research Congress. West Lafayette, USA.
- [6] Eastman, E. et al. (2011). [BIM handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors](#). New York: Willey.
- [7] Forgues, D. et al (2012). [Rethinking the Cost Estimating-through 5D BIM process, Case Study](#). In Construction Research Congress. West Lafayette, USA.

- [8] Widener, C. (2000). [The Next Generation Architect: Using CM to take control of design and Construction](#). In AIA Conference. Springfield, USA.
- [9] Burr, K. & Jones, C. (2010). [The Role of the Architect: Changes of the Past, Practices of the Present, and Indications of the Future](#). *Construction Education and Research* 6(2), pp. 122-138.
- [10] Garcia, M. (2015). [The Transformation of the Construction Industry](#). In Laccei. Santo Domingo, Dominican Republic.
- [11] Coonan, C. (2012). [China to build world's tallest building - in just 90 days](#). Online [May 2016].
- [12] Wikipedia. [Sky City \(Changsha\)](#). Online [Jun 2016].

13. Cuantificación de la información de diseño detallado en proyectos de construcción

**Edward Vargas
Guillermo Mejía**

Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia

1. Introducción

El sobrecosto en los proyectos es uno de los principales problemas de la industria de la Arquitectura, la Ingeniería y la Construcción (AEC) y, al contrario de lo que se pueda pensar, no es exclusivo de los países en desarrollo sino un problema generalizado [1, 2]. Varios de los factores que generan el sobrecosto han sido relacionados con la etapa de diseño del proyecto, cuyos procesos influyen en la calidad, la incertidumbre y los costos de construcción de los proyectos [3]. Algunos factores se relacionan con la definición del alcance y claridad de los diseños [4]: deficiente documentación [5], falta de redundancia como medida de control y garantía de calidad, procesos de transferencia ineficaz, mal uso del lenguaje y habilidades de interpretación deficientes [6].

A pesar de tener identificada a la calidad de la información generada durante la etapa de diseño, como factor de sobrecosto, aun no se cuenta con metodologías claras de gestión de diseño para implementarla [3] y los esfuerzos para expresarla en términos cuantitativos han sido escasos [7]. Investigadores de la industria recomiendan coordinar y controlar esa documentación de manera que produzca planos de detalle correctos y completos, con todas sus especificaciones [8]. Además, la gestión adecuada de los diseños y la medida de calidad de la documentación, requiere indicadores cuantificables para hacerle seguimiento a la gestión. En este sentido, una de las preguntas a resolver es ¿cómo cuantificar la información de diseños detallados? Teniendo en cuenta las características de los elementos del sistema estructural de un proyecto y del lenguaje propio de los planos de diseño, el presente estudio propone una metodología para cuantificarla.

2. Antecedentes

2.1 Gestión del diseño en la construcción

Varios estudios han demostrado la importancia de la gestión del diseño, desde su fase inicial de ingeniería básica [8] hasta el diseño detallado [9]. La gestión del diseño es un proceso de ingeniería de detalle que debe ser eficaz y eficiente, evidenciarse en la calidad de los documentos precontractuales, en la definición del alcance y en la claridad de los planos que se producen [4, 5]. La gestión del diseño de un proyecto podría considerarse como una gestión de procesos de comunicación [10]. Los procesos de gestión de diseño desarrollan procesos de comunicación síncrona y asíncrona (Figura 1), que hacen referencia a la comunicación directa y en tiempo real, o a aquellas que ocurren con diferencia temporal, principalmente entre los equipos o personas de diseño [11].

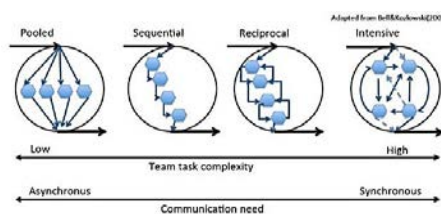


Figura 1. Procesos de comunicación en diseño [12]

Estos procesos de comunicación generan flujos de información para el desarrollo de tareas técnicas y administrativas. En este sentido, existen modelos de flujo de información orientados a la gestión de información de un proyecto de diseño, basados en diagramas de flujo de datos (DFD) [12] (Figura 2), que permiten entender algunos problemas que se generan durante esta etapa.

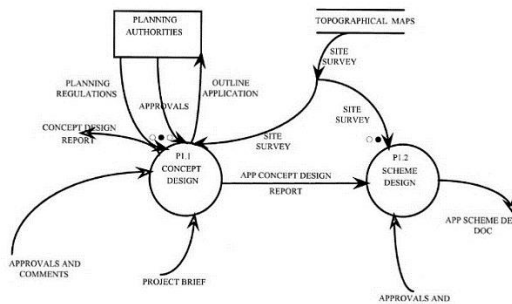


Figura 2. Diagrama de flujo de datos [13]

El modelo tradicional de gestión concibe el proceso de diseño como una secuencia de actividades [12], sin embargo, en las últimas décadas se han explorado y estudiado nuevos enfoques de gestión en construcción basados en tecnologías de la información, aunque efectivos para el control de la calidad y la información sincrónica, se ha evidenciado que carecen de una base conceptual generalizada, lo que se convierte en una barrera para el avance en la gestión de diseños y de proyectos [14].

Con el fin de gestionar adecuadamente un proceso de diseño, es importante establecer las métricas de los procesos [12], para lo cual se han desarrollado indicadores para ayudar a cuantificar y caracterizar el flujo de información en los proyectos [15]; sin embargo, se encuentran pocas referencias directas para la estimación de la cantidad y calidad de información contenida en los documentos de diseño. Todo esto evidencia la falta de reconocimiento de la dinámica propia de la información de diseño y el problema de las comunicaciones en la gestión. En la actualidad, la información y la comunicación se consideran factores críticos de éxito en los proyectos de construcción. La etapa de diseño es el origen de cambios, errores y omisiones en los documentos contractuales, factores que son claves en los sobrecostos [16]. La industria AEC requiere más herramientas e investigaciones formales sobre metodologías de medición del desempeño del proceso de diseño y de sus resultados, lo que hacen necesarios enfoques diferentes a los tradicionales.

2.2 Medidas de información de diseño

Los parámetros de medición de la información de diseño dependen del medio de transmisión o comunicación donde se aplican. En este sentido, la información de tipo gráfico, como la que conforma los planos de diseño, requiere consideraciones especiales para su categorización y cuantificación. Tribelsky [15] introdujo algunos conceptos básicos de medición del flujo de información en proyectos de ingeniería, los cuales se describen en la Figura 3:

- Paquete de información. Es una vista de dibujo, un documento de texto, una hoja de cálculo o una tabla de datos en formato digital o impreso.
- Elemento de información. Es una pieza única de información, puede ser textual o gráfica.
- Objeto de información. Es un componente de una edificación o una instalación técnica, con características y atributos de ingeniería.

- Atributo de información. Es un atributo técnico o de gestión de un objeto de información.
- Acción. Es aquella realizada por un miembro del equipo para comunicar información.
- Evento de proyecto. Es un evento en el ciclo de vida de un proyecto en el que hay un pico de demanda de información.

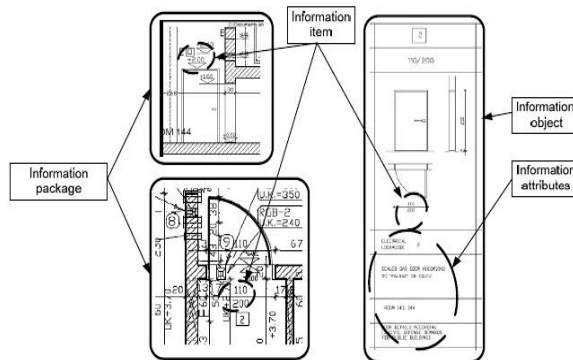


Figura 3. Información en planos [15]

Adicionalmente, otro aspecto importante para la cuantificación de información es la organización y descripción jerárquica de un sistema de indicadores, que transformen la información en significado y optimicen su transmisión [17] (Figura 4).

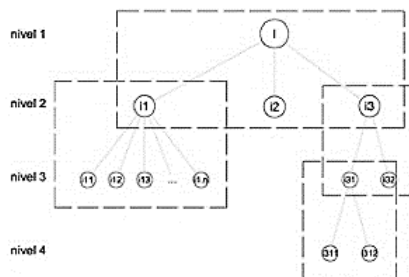


Figura 4. Representación jerárquica de un sistema [17]

Según la propuesta de Tribelsky [15], se puede evidenciar la organización jerárquica de la siguiente manera: un proyecto está representado en planos (nivel 1), que a su vez contienen paquetes de información (nivel 2), los cuales describen elementos, objetos y atributos (nivel 3). La representación gráfica de información, de la misma manera que el lenguaje escrito, debe seguir unas reglas de sintaxis y morfología que garanticen la efectividad de transferencia del mensaje. Los trabajos publicados hasta el momento no presentan un marco conceptual enfocado hacia el análisis de la composición de la información en un plano de diseño, ni su relación con el objeto descrito.

3. Objetivo y metodología

Este estudio tiene como objetivo determinar un conjunto de medidas e índices que cuantifiquen la información consignada en los planos detallados de diseño, las cuales comunicarán sobre la composición de la información de diseño, representada en planos, y facilitarán evaluar el nivel de diseño detallado del proyecto y la calidad de la información consignada. Para este trabajo se consideraron planos de diseño detallados, de estructuras aporticadas en concreto y los proyectos analizados fueron ejecutados en el departamento de Santander, Colombia.

La metodología de investigación se desarrolló en tres etapas:

1. Definición de las unidades de información básicas, de la metodología de medición de cada unidad y de los índices de información derivables.
2. Validación por medio de panel de expertos de los conceptos metodológicos e índices de medición propuestos.
3. Medición y registro de la información de diseño detallado aplicada a casos de estudio.

4. Medidas e índices de información de diseño detallado

Con el fin de definir las medidas de cuantificación de información gráfica asociada a los proyectos del presente estudio, se tomó como base la propuesta hecha por Tribelsky [13]. A partir de las definiciones básicas de paquete y objeto de información, se complementó su alcance con el análisis de patrones de representación de información para el caso de estructuras de concreto de tipo aperticado, desde el punto de vista de la representación jerárquica de sistemas. A continuación, se describen las medidas e índices propuestos por este estudio, cuyo resultado fue validado por un panel de expertos vinculados al sector académico y productivo.

4.1 Paquete de información

Corresponde a un recuadro de dibujo que contiene los componentes necesarios para transmitir información de un objeto dado y se considera la unidad básica de transferencia de información en planos de diseño [15]. Su característica principal es que poseen un área medible y pueden poseer escala gráfica asociada. Según su funcionalidad se clasifican en cinco categorías necesarias, excluyentes y suficientes para la materialización de un objeto de información: localización, dimensión, despiece, detalle y referencia o atributo. El orden y relación de estos paquetes, para describir uno o varios objetos de información, equivale a la sintaxis del mensaje que se transmite en el plano de diseño (Figura 5).

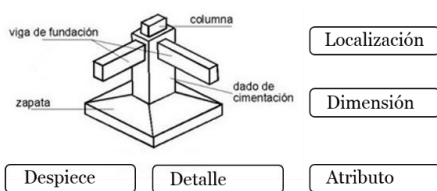


Figura 5. Sintaxis del mensaje *Objeto*

Los paquetes de información, que describen despieces y atributos en los planos de diseño, son comunes y fáciles de identificar. Entre ellos, los paquetes de detalles incluyen información de la distribución interna del refuerzo en un objeto, mientras que los paquetes de localización incluyen todos los detalles que expresen información espacial de objetos individuales, en el conjunto general del sistema estructural. La Figura 6 muestra un ejemplo de paquetes de detalle y de localización en planos de diseño.

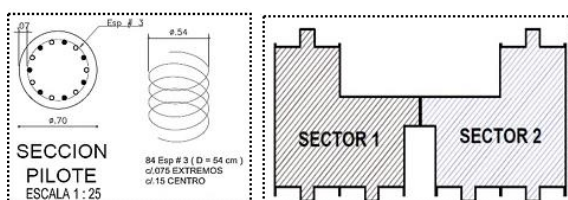


Figura 6. Paquetes de detalle y localización

La metodología de medición propuesta para los paquetes de información, permitió estandarizar y comparar objetivamente los diferentes proyectos de diseño, de acuerdo con las preferencias de dibujo, disponibilidad comercial de papel, o percepción de quién realiza la medida. Los conceptos básicos de la metodología son:

1. Delimitación del paquete de información. El paquete de información corresponde al recuadro de dibujo, definido por los puntos superior izquierdo e inferior derecho, que definan el rectángulo de menor área que incluya todos los elementos de información asociados.
2. Área del paquete. Corresponde al área comprendida por el recuadro de información delimitado, expresada en decímetros cuadrados [dm²].
3. Área equivalente del paquete. Los paquetes de información se representan en los planos por medio de escalas de dibujo, de acuerdo con las necesidades del proyecto o preferencia del diseñador. Las escalas más representativas y usadas por los diseñadores se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Escalas comunes en planos de diseño

Contenido	Escala
Planos de localización en planta	1:100 – 1:250
Plantas de entepiso	1:50 – 1:100
Despieces	1:50 – 1:100
Detalles	1:20 – 1:25

Con el objeto de unificar la medida de información de los paquetes de información de diferentes proyectos, se definió el área equivalente del paquete, que es la estandarización de las áreas de paquete de igual tipo, afectada por un factor de conversión, como se expresa en la ecuación (1).

$$Ae_{ppaq} = A_{paq} * \left(\frac{Escala_{dibujo}}{Escala_{estandar}} \right)^2 \quad (1)$$

Donde $Escala_{dibujo}$ corresponde a la escala indicada en planos de diseño y $Escala_{estandar}$ se encuentra definida por la Tabla 2, según el tipo de paquete.

Tabla 2. Escalas estándar propuesta

Tipo de paquete	Escala
Planos de localización en planta	1:100
Plantas de entepiso	1:100
Despieces	1:100
Detalles	1:25

Los paquetes de información se representan gráficamente a través de planos, que son áreas de papel de dibujo estandarizadas. Para facilitar su medida y comparación entre diferentes proyectos, se definieron los siguientes:

- Área bruta. Corresponde al tamaño físico de papel de los planos de diseño. Teniendo en cuenta las diferencias en disponibilidad comercial de papeles y equipos e impresión, se definió como medida de unificación al tamaño equivalente más cercano del estándar internacional ISO 216 series A y B, expresado en decímetros cuadrados [dm²].
- Área útil. Corresponde al espacio efectivamente disponible para transmitir información gráfica del proyecto. Se obtiene sustrayendo el área destinada a rotulo del área bruta o espacio de papel. La unidad de medida es el decímetro cuadrado [dm²].
- Área neta. Corresponde a la suma de las áreas de paquete contenidas en un mismo plano, expresada en decímetros cuadrados [dm²].

4.2 Objeto de información

Corresponden a la representación gráfica de un elemento estructural de obra, que posee forma, función y comportamiento, que deben corresponder en una relación uno a uno a los elementos estructurales requeridos para la estabilidad y funcionalidad del proyecto. Se clasifican en familias que atienden a su función estructural principal y por tipos, que son aquellos que agrupan los objetos por similitud de función, dimensión, atributos y disposición de refuerzo. La Figura 7 muestra el conjunto de objetos de una edificación de tipo aporticado.

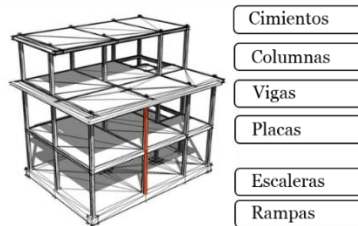


Figura 7. Objetos de información de un modelo estructural

La metodología de medición y contabilización de los objetos de información, parte, en principio, de la información del sistema estructural diseñado y consignado en planos y las características geométricas básicas del mismo. Los conceptos básicos definidos son:

- Área de diseño. Corresponde al área total de la estructura aporticada del proyecto. El área de diseño se calculó como la totalidad del área bajo cubiertas de todos los niveles de la estructura; en las edificaciones en que existen plantas típicas con diferente área, se tuvo en cuenta la de cada una por el número de niveles que corresponde.
- Niveles de diseño. Es el número máximo de niveles de la estructura del proyecto, con relación a la primera planta típica de la estructura analizada.
- Objetos tipo. Su definición se realizó a partir de la información consignada en planos. Estos objetos denominan la familia de los objetos o componentes estructurales (i.e. cimentación, columnas, vigas, viguetas, placas, escaleras y rampas).
- Objetos de información. Es la contabilización de los elementos o componentes estructurales que pertenecen a una familia y se parte de la definición de tipos registrada en planos. De lo contrario, se tomará como unidad de objeto de información al continuo longitudinal entre ejes extremos, para el caso de vigas, o niveles de cimentación y cubierta, para el caso de columnas.

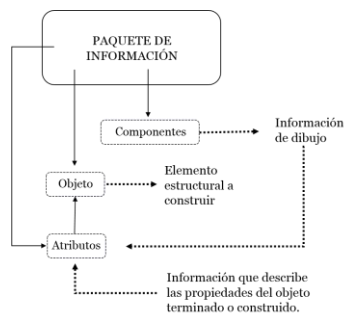


Figura 8. Jerarquía del paquete de información

Los objetos de información en los planos de diseño corresponden a una representación de un elemento tangible, y su materialización requiere información precisa de su ubicación en el espacio, dimensiones y características. Este conjunto de información

corresponde a un mensaje, y cada paquete de información equivale a las palabras que lo constituyen. La simbología de estos paquetes guarda entre sí una relación jerárquica específica de contenedor-contenido, así como una estructura específica de relación, como se muestra en la Figura 8.

4.3 Índices de información

La metodología de medida propuesta permite comparar objetivamente los diferentes proyectos de diseño, estandarizando las preferencias de dibujo, disponibilidad comercial de papel o percepción de quién realiza la medida. El análisis de la información consignada en planos y su relación con el tamaño de los proyectos de diseño, se analizan por medio de tres categorías de indicadores:

1. Categoría de proyecto. Estima el tamaño de un proyecto expresado en áreas de diseño, elementos estructurales y objetos tipo. Los índices más representativos son:

Ad: *Área de diseño* (ecuación (2)). Donde At_i hace referencia a las áreas típicas por planta y n_j al número de plantas tipo por cada área típica. Este índice permite caracterizar el tamaño de un proyecto de diseño por medio del área total de diseño.

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n At_i * n_j \quad (2)$$

Oi: *Número de objetos de información* (ecuación (3)). Donde, O_i hace referencia a los objetos típicos y n_j al número de objetos por cada tipo. Este índice permite caracterizar el tamaño de un proyecto de diseño con base al número total de objetos de información.

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n O_t * n_i \quad (3)$$

OiAd – *Objetos de información por área de diseño* (ecuación (4)). Este índice también puede entenderse como la cantidad de área de diseño por unidad de objeto, y permite caracterizar el tamaño de un proyecto en términos de la densidad de objetos de información.

$$\frac{A_d}{O_i} \quad (4)$$

And: *Área equivalente de proyecto por área de diseño* (ecuación (5)). Donde AEQ_p hace referencia al área equivalente de dibujo por proyecto y A_d al área de diseño total del proyecto. Este indicador permite estimar la cantidad de información representada en planos, con relación al tamaño de proyectos de diseño.

$$\frac{AEQ_p}{A_d} \quad (5)$$

2. Categoría de plano. Esta categoría de índices estima la cantidad de información representada, gráfica o textualmente, en los planos de diseño, expresado como porcentaje del área útil de los planos. Los índices más representativos son:

Rabu: *Relación área útil vs área bruta* (ecuación (6)). Donde $A_{útil}$ hace referencia al área o espacio de papel menos el área destinada al rótulo del plano, es decir, al espacio disponible para dibujo, y A_{bruta} hace referencia al espacio de papel según estándar ISO 216. Este índice permite comparar, entre un conjunto de planos de proyectos de diseño, la cantidad de información que se transmite.

$$\left(\frac{A_{útil}}{A_{bruta}} \right) * 100 \quad (6)$$

Ranu: *Relación área neta vs área útil* (ecuación (7)). Donde A_{neta} hace referencia a la suma de las áreas de paquetes de información.

$$\left(\frac{A_{\text{neta}}}{A_{\text{útil}}} \right) * 100 \quad (7)$$

3. Categoría de paquete. Esta categoría estima la cantidad de información expresada en las áreas de las unidades básicas de información, representada en decímetros cuadrados [dm²], y su composición porcentual por tipología de paquete de información (localización, dimensión, despiece, detalle, referencia/atributo). Los índices más representativos son:

AEQp: *Área equivalente de proyecto* (ecuación (8)). Donde *i* hace referencia a paquetes por tipología y *j* al número de tipologías que se consideran para el análisis. Este índice permite el análisis comparativo entre proyectos.

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n Aeq_{ij} \quad (8)$$

AEQt: *Área equivalente por tipología* (ecuación (9)). Donde *i* hace referencia a paquetes por tipología. Este indicador permite comparar la composición de un conjunto de planos de un proyecto.

$$\sum_{i=1}^n Aeq_i \quad (9)$$

5. Validación de conceptos y de la metodología de medición

La validación de los conceptos principales y de la metodología de medición de información sobre planos, se realizó con un panel de expertos en el que participaron profesionales afines al área de diseño estructural y consultoría. La Tabla 3 muestra las características de los panelistas y su experiencia en el área indicada.

Tabla 3. Panel de expertos

Panelista	Sector	Experiencia
<u>1</u>	Académico	10 - 15
<u>2</u>	Académico	15 - 20
<u>3</u>	Diseñador	5 - 10
<u>4</u>	Diseñador	>20
<u>5</u>	Consultor	>20
<u>6</u>	Consultor	>20
<u>7</u>	Consultor	>20
8	Consultor	5 - 10
<u>9</u>	Constructor	>20
<u>10</u>	Constructor	>20

Para el panel de expertos se utilizó la metodología de grupo nominal. Sus percepciones se registraron en formularios tipo encuesta de carácter confidencial, utilizando una escala de clasificación de uno (1) a cinco (5), en la que (1) indica completamente en desacuerdo y (5) totalmente de acuerdo. La validación se estructuró en dos partes: 1) conceptos principales y su pertinencia para clasificar y cuantificar, tanto la información de la realidad del proyecto como la representación en planos de diseño (Tabla 4); y 2) validar la metodología de cuantificación de la información consignada en planos y registro de información de la realidad del proyecto (Tabla 5).

Tabla 4. Validación de conceptos

Aspecto	1 - 2	3	4	5
<u>Definición</u> de paquete	0%	0%	30%	70%
<u>Clasificación</u> de paquete	0%	10%	50%	40%
<u>Definición</u> de objeto	0%	0%	10%	90%
<u>Clasificación</u> de objeto	0%	10%	30%	60%

La definición de los conceptos de paquetes y objetos, y la clasificación propuesta para caracterizar la información asociada a proyectos de diseño estructural, fueron aceptadas favorablemente por parte de los expertos consultados, porque más del 90% estuvo completamente de acuerdo con la propuesta. Las observaciones complementarias registradas fueron sugerencias sobre la categorización de los objetos estructurales, sin embargo, el nivel de detalle sugerido no se encuentra en el alcance del presente estudio.

Tabla 5. Validación de metodología de medición

Aspecto	1 - 2	3	4	5
Delimitación paquetes	0%	0%	30%	70%
Método área equivalente	0%	10%	20%	70%
Propuesta escala estándar	20%	10%	40%	30%
Delimitación espacio papel	0%	0%	30%	70%
Cálculo de área de diseño	0%	10%	20%	70%
Cuantificación de objetos	0%	0%	30%	70%
Cuantificación de tipos	0%	0%	40%	60%

La metodología de cuantificación de información de la realidad del proyecto, el cálculo de área de diseño, la cuantificación de objetos y determinación del número de tipos de objeto, así como la propuesta de cuantificación de paquetes de información y la aplicación de un estándar de escalado, fueron aceptados favorablemente por parte de los expertos consultados, porque más del 90% estuvo completamente de acuerdo con la propuesta, excepto sobre la escala estándar. Las observaciones complementarias registradas fueron sugerencias sobre la escala estándar para el cálculo del área equivalente (Tabla 5), sin embargo, esta escala se propone como referencia para efectos de comparación entre proyectos y no pretende recomendar un valor para aplicar en la elaboración de planos de diseño detallado.

En resumen, los resultados del proceso de validación indican que, los conceptos y metodología de medición de información, fueron aceptados por el panel de expertos en su mayoría. Esto indica la claridad de las definiciones, de las metodologías de medición y de la utilidad práctica de la propuesta de este estudio.

6. Casos de estudio

Para el presente proyecto de investigación se seleccionaron veinte (20) casos de estudio, a los que se aplicó la metodología de medición propuesta. Los casos correspondieron a proyectos ejecutados en el departamento de Santander, Colombia, diseñados para estructuras de concreto tipo aporticado, con diferentes usos, áreas de diseño y niveles de construcción. La Tabla 6 muestra las características generales de cada proyecto, dónde se indica el uso del proyecto, el número de planos detallados generados, el área de diseño y el número de niveles.

El registro de los casos de estudio se organizó en una base de datos, que integró información acerca de la realidad del proyecto, la representación gráfica de su estructura y de los paquetes o unidades básicas de información (Figura 9).

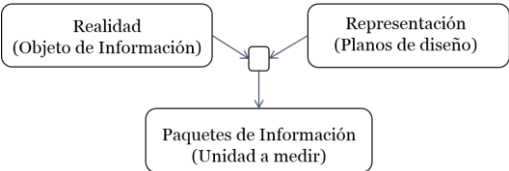


Figura 9. Relación conceptual base de datos

Tabla 6. Casos de estudio analizados

Id	Uso del Proyecto	No. Planos	Ad [m²]	Niveles
1	Transporte	7	1.938	2
3	Deportivo	62	14.841	5
4	Salud	15	6.099	6
5	Comunitario	12	708	1
6	Comunitario	5	436	1
7	Deportivo	22	2.972	1
9	Educativo	16	1.676	2
10	Comunitario	9	993	1
14	Transporte	13	2.399	2
16	Educativo	8	4.741	3
17	Educativo	2	321	2
18	Educativo	13	4.641	4
19	Educativo	29	8.110	6
20	Comunitario	24	4.162	3
25	Comercial	12	2.203	4
26	Unifamiliar	3	786	6
28	Educativo	6	912	2
29	Multifamiliar	6	572	3
30	Multifamiliar	9	2.343	5
31	Multifamiliar	11	3.424	9

Sobre la realidad del proyecto se registró: tipo de proyecto, área de diseño, área de la planta base, niveles de construcción e información sobre los componentes estructurales del pórtico: número de tipos y de objetos estructurales. Sobre la representación gráfica se registró información a nivel de plano: número de planos detallados, área útil de planos, número de paquetes de información, área neta dibujada y área neta equivalente. Sobre los paquetes de información se registró el número de paquetes desagregado por tipo de paquete y las áreas equivalentes de los paquetes desagregado por familia de objeto.

7. Resultados y discusión

7.1 Información sobre los proyectos

La Tabla 7 muestra el resumen estadístico de las características generales de los casos estudiados, donde se analizaron proyectos cuya área de diseño (Ad) promedio fue de 3.214 m², área base (Ab) o área del primer nivel de edificación con promedio de 1.223 m² y, en promedio, 3 niveles de altura.

Tabla 7. Estadísticas de la información de proyectos

	Ad [m²]	Ab [m²]	Niveles	Tipos	Objetos
Promedio	3.214	1.223	3,4	83,3	274,1
DesvStd	3.439	1.482	2,2	53,2	270,3
Mínimo	321	107	1,0	17,0	44,0
Q1	818	452	2,0	44,3	106,5
Mediana	2.273	866	3,0	76,5	130,5
Q3	4.521	1.255	5,0	105,5	362,3
Máximo	14.841	6.816	9,0	208,0	1.003,0
Asimetría	2,3	3,2	0,9	1,1	1,9
Curtosis	6,4	11,4	0,5	1,0	2,9

El número promedio de tipos de elementos estructurales diseñado fue de 83 y de objetos estructurales de 274, lo cual da una idea sobre el grado de complejidad de la representación gráfica en los planos detallados de construcción. Se analizaron proyectos

que necesitaron, como mínimo, representar información sobre 17 diferentes tipos de elementos estructurales, hasta proyectos que necesitaron 208 tipos. Igualmente, se analizaron proyectos que requirieron localizar, como mínimo, 44 objetos estructurales, hasta proyectos que requirieron localizar 1.000 objetos. La información sobre las características generales de los proyectos se desagregó en categorías: según el área de diseño (Tabla 8) y según los niveles construidos (Tabla 9), para indicar los índices de complejidad basados en los tipos y objetos estructurales requeridos por los mismos.

Tabla 8. Información de proyectos desagregado por área

	Tipos	Ad/T	Objetos	Ad/O	O/T
<i>Área de diseño < 1.000 m² (N = 7)</i>					
Promedio	39,1	21,3	97,6	7,0	2,8
DesvStd	22,0	11,5	26,9	1,8	1,1
Mínimo	17,0	7,0	44,0	4,5	1,5
Mediana	36,0	18,9	105,0	7,5	2,6
Máximo	82,0	39,7	126,0	8,9	4,9
<i>Área de diseño [1.000-3.000] m² (N = 6)</i>					
Promedio	99,3	23,3	321,0	11,5	3,0
DesvStd	30,3	3,4	304,0	8,0	1,8
Mínimo	68,0	19,3	98,0	3,2	1,1
Mediana	93,5	22,8	258,0	7,9	3,0
Máximo	154,0	28,5	920,0	22,5	6,0
<i>Área de diseño > 3.000 m² (N= 7)</i>					
Promedio	113,6	67,3	410,0	20,1	4,0
DesvStd	64,1	36,3	306,0	9,7	2,8
Mínimo	55,0	20,9	111,0	9,4	1,5
Mediana	77,0	70,3	390,0	18,6	2,5
Máximo	208,0	130,2	1003,0	35,1	8,8

El grado de complejidad de los proyectos representados por el número de tipos y objetos y analizados por área de diseño, muestra que, en áreas menores a 1.000 m², en promedio se requirieron representar 39 tipos, mientras que para áreas entre 1.000 m² y 3.000 m² se requirió el doble y para áreas mayores a 3.000 m² casi el triple. Esto lleva a suponer que, a mayor área de diseño, mayor número de tipos y mayor área de dibujo. Se puede notar que la complejidad depende más del número de tipos de elementos estructurales, que del número de objetos estructurales (Figura 10). La relación objetos/Tipos (O/T = 3.0) es casi la misma en proyectos de área menor a 3.000 m², mientras que para proyectos mayores a 3.000 m² es 4.0. En tal caso, la diferencia en complejidad es más notoria cuando los proyectos son menores y mayores a 3.000 m².

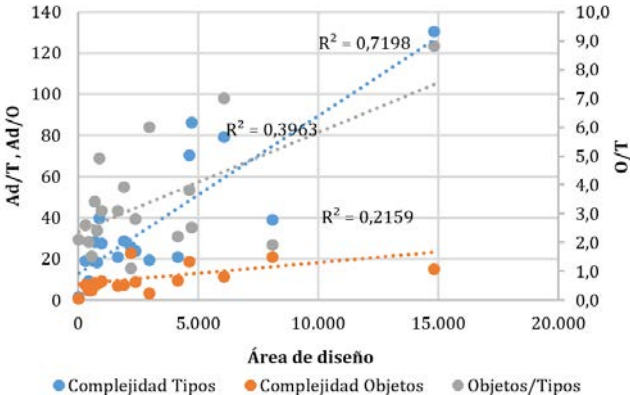


Figura 10. Relación complejidad vs área de diseño

El grado de complejidad de los proyectos analizados por niveles de construcción (Tabla 9), muestra que, en proyectos hasta de dos niveles de construcción, se requiere en promedio 61 tipos de objetos, mientras que proyectos con 3 y 4 niveles requirieron un 60% más (98), casi igual que para proyectos con más de 4 niveles (104). En este caso, la diferencia en complejidad es más notoria cuando los proyectos son menores y mayores a 2 niveles.

Tabla 9. Información de proyectos desagregado por niveles

	Tipos	Ad/T	Objetos	Ad/O	O/T
<i>Niveles [1-2] (N = 9)</i>					
Promedio	61,3	24,0	240,7	7,0	3,5
DesvStd	44,9	8,5	269,2	1,9	1,2
Mínimo	17,0	9,1	44	3,2	2,0
Mediana	48,0	23,8	113	7,3	3,1
Máximo	154,0	39,7	920	8,9	6,0
<i>Niveles [3-4] (N = 5)</i>					
Promedio	97,6	42,0	210,4	18,0	2,2
DesvStd	58,0	34,3	142,7	11,9	1,0
Mínimo	55,0	7,0	98,0	4,5	1,1
Mediana	82,0	25,6	135,0	18,6	2,2
Máximo	199,0	86,2	444,0	35,1	3,8
<i>Niveles [5-6] (N = 6)</i>					
Promedio	104,2	55,6	377,0	17,6	3,8
DesvStd	56,8	42,5	356,0	8,3	3,3
Mínimo	43,0	18,3	105,0	7,5	1,1
Mediana	92,0	42,0	252,0	17,7	2,2
Máximo	208,0	130,2	1003,0	30,9	8,8

7.2 Información generada en planos

La Tabla 10 muestra el resumen estadístico de la información generada en planos. El promedio de planos analizados por proyecto fue 14, lo que representa, en promedio, un área útil para dibujar de 936 dm². El número promedio de paquetes de información generado por proyecto fue 236, lo que representó, en promedio, un área neta de 497 dm² y un área neta equivalente de 480 dm². El número mínimo de paquetes identificados en un proyecto fue 31 y el número máximo 835, lo que significó, en área neta equivalente, 40 dm² y 2.893 dm², respectivamente.

Tabla 10. Estadísticas de la información en planos

	No. Planos	Aútil [dm²]	No. Paquetes	Aneta [dm²]	AnetaEq [dm²]
Promedio	14,2	936,0	236,0	497,0	480,0
DesvStd	13,2	840	231,0	493,0	765,0
Mínimo	2,0	139,0	31,0	70,0	40,0
Q1	6,3	475,0	82,5	209,0	78,0
Mediana	11,5	749,0	168,0	365,0	204,0
Q3	15,8	1.012,0	218,8	598,0	377,0
Máximo	62,0	3.968,0	835,0	2.263,0	2.893,0
Asimetría	2,7	2,7	1,9	2,7	2,6
Curtosis	9,1	9,0	2,9	8,7	6,1

Los índices de representación gráfica, mostrados en la Tabla 11, indican que, en promedio, se dibujaron 17 paquetes por plano, cada uno con mínimo 6 paquetes y máximo 31. Los paquetes, en promedio por plano, ocuparon el 50% del área disponible para dibujar, es decir, una densidad gráfica de 0,5. En promedio, cada tipo estructural demandó 4,7 dm² de dibujo y cada objeto 1,5 dm².

Tabla 11. Índices de representación gráfica

	Paq /Plano	ANEq /Aútil	ANEq /Paq	ANEq /Tipo	ANEq /Objeto
Promedio	17,1	0,51	1,60	4,74	1,46
DesvStd	6,7	0,10	1,04	5,53	1,19
Mínimo	6,2	0,32	0,32	0,57	0,37
Q1	13,1	0,42	0,75	1,96	0,68
Mediana	15,9	0,53	1,33	3,36	0,98
Q3	20,7	0,58	2,06	4,85	1,93
Máximo	31,0	0,65	4,16	25,38	5,21
Asimetría	0,3	-0,7	1,1	3,1	1,9
Curtosis	-0,1	-0,8	0,7	10,8	4,2

El análisis de la información generada en planos y espacio de dibujo para los proyectos estudiados, se realizó de manera desagregada, siguiendo la categoría de análisis de los proyectos por áreas de diseño (Tabla 12) y el número de niveles (Tabla 13).

Tabla 12. Información de planos desagregado por área

	No. Planos	Aútil [dm ²]	No. Paquetes	Aneta [dm ²]	AnetaEq [dm ²]
<i>Área de diseño < 1.000 m² (N = 7)</i>					
Promedio	6,1	454,5	79,4	197,7	83,4
DesvStd	3,4	231,9	35,5	124,1	63,0
Mínimo	2,0	138,6	31,0	70,5	39,7
Mediana	6,0	575,1	76,0	186,2	54,4
Máximo	12,0	766,8	146,0	376,3	214,2
<i>Área de diseño [1.000-3.000] m² (N = 6)</i>					
Promedio	13,2	904,0	206,0	456,4	346,0
DesvStd	5,3	309,0	72,3	167,0	265,0
Mínimo	7,0	459,0	139,0	298,3	107,0
Mediana	13,0	855,0	199,0	403,0	293,0
Máximo	22,0	1.048,0	336,0	757,0	851,0
<i>Área de diseño > 3.000 m² (N= 7)</i>					
Promedio	23,1	1.445,0	417,0	831,0	991,0
DesvStd	18,7	1.236,0	308,0	703,0	1.132,0
Mínimo	8,0	439,0	165,0	257,0	146,0
Mediana	15,0	983,0	207,0	621,0	381,0
Máximo	62,0	3.986,0	835,0	2.263,0	2.893,0

Las necesidades de representación gráfica de los proyectos mostraron comportamiento similar a la complejidad, según el área de diseño. En proyectos con área menor a 1.000 m² se requirieron cerca de 6 planos, en promedio, mientras que áreas entre 1.000 m² y 3.000 m² requirieron casi el doble (13,2) y, para áreas mayores a 3.000 m², casi cuatro veces (23,1). Lo mismo mostraron los datos relacionados con el número de paquetes dibujados: con área de diseño menor a 1.000 m² se requirieron cerca de 79 paquetes, en promedio, mientras que áreas entre 1.000 m² y 3.000 m² requirieron 2,6 veces más (206) y, casi cinco veces (417), para proyectos con áreas mayores a 3.000 m². Este resultado indica que hay una relación directa entre el número de paquetes de información y el grado de complejidad de los proyectos (Figura 11). El modelo de regresión lineal mostró, a un nivel de significancia $\alpha = 0,05$, que el área de diseño es un predictor estadísticamente significativo ($p < 0,001$) del número de paquetes de información, el cual explica en un 71% su variabilidad. Lo mismo se evidenció con el número de tipos, que resultó ser un predictor estadísticamente significativo ($p < 0,001$), explicando en un 69% la variabilidad del número de paquetes de información generados.

Cuando la información sobre la representación gráfica en planos se desagregó por niveles de construcción (Tabla 13), indica que, en promedio, se generaron 10 planos por

proyecto, en proyectos de 1 a 2 niveles, que aumentó, aproximadamente 25% (12,6), en proyectos de 3 y 4 niveles, y que se duplicó (21.5) en proyectos de más de 4 niveles. En cuanto al número de paquetes de información generados se mantuvo una relación 1:2:3. En proyectos de 1 y 2 niveles se generaron 127 paquetes en promedio, 252 en proyectos de 3 a 4 niveles y 386 en proyectos de más de 4 niveles. Lo mismo se evidenció en los datos de área neta equivalente con 283 dm², 622 dm² y 723 dm², respectivamente.

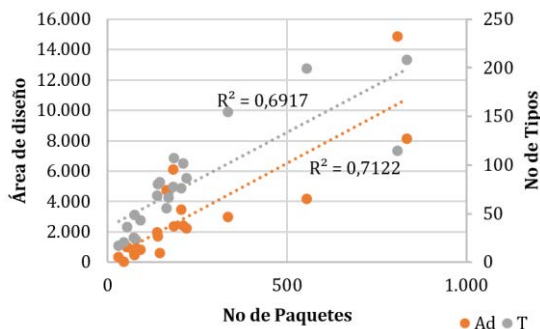


Figura 11. Relación complejidad vs No. de paquetes

Tabla 13. Información de planos desagregado por niveles

	No. Planos	Aútil [dm ²]	No. Paquetes	Aneta [dm ²]	AnetaEq [dm ²]
<i>Niveles [1-2] (N = 9)</i>					
Promedio	10,2	682,0	127,3	339,2	283,3
DesvStd	6,2	381,0	95,6	209,5	254,8
Mínimo	2,0	139,0	31,0	78,8	39,7
Mediana	9,0	585,0	79,0	348,0	166,6
Máximo	22,0	1.408,0	336,0	757,0	851,0
<i>Niveles [3-4] (N = 5)</i>					
Promedio	12,6	787,0	252,0	417,0	622,0
DesvStd	7,0	462,0	172,7	285,0	951,0
Mínimo	6,0	439,0	146,0	193,0	47,0
Mediana	12,0	576,0	171,0	304,0	251,0
Máximo	24,0	1.572,0	557,0	903,0	2.315,0
<i>Niveles [5-6] (N = 6)</i>					
Promedio	21,5	1.440,0	386,0	799,0	723,0
DesvStd	21,7	1.356,0	340,0	791,0	1.094,0
Mínimo	3,0	197,0	93,0	70,0	54,0
Mediana	13,0	923,0	196,0	505,0	264,0
Máximo	62,0	3.968,0	835,0	2.263,0	2.893,0

7.3 Información representada en paquetes

La Tabla 14 muestra el resumen estadístico de los tipos de paquetes de información generados para los proyectos. Con base en los datos de la tabla, se observa que, en promedio, se generaron entre 5 y 6 veces más paquetes de despiece y detalles (85 – 100), que paquetes de localización (15). Además, que los paquetes de referencia generados, en promedio (30), representaron la tercera parte de los paquetes de detalle (100).

La composición promedio por tipología de los paquetes de información de los proyectos analizados, muestra la preponderancia general de paquetes de detalle, con casi la mitad del total de los paquetes que, sumados a los paquetes de despiece, representan el 80% de los paquetes de información de los proyectos analizados. La información de referencia y localización sigue en orden de preponderancia, con 13% y 6% respectivamente, mientras que los paquetes de información dedicados a definir de forma exclusiva el dimensionamiento de objetos de información es casi inexistente.

Tabla 14. Estadísticas de los tipos de paquetes

	P_Loc	P_Dim	P_Desp	P_Det	P_Ref
Promedio	14,5	3,5	84,6	100,8	30,4
DesvStd	26,4	4,5	68,7	103,5	60,7
Mínimo	2,0	0,0	6,0	12,0	0,0
Q1	4,3	0,0	30,5	34,0	5,3
Mediana	7,5	2,0	68,0	68,5	12,0
Q3	9,8	5,5	102,8	108,3	23,5
Máximo	123	17	279	414,0	268,0
Asimetría	4,0	1,9	1,6	2,0	3,6
Curtosis	17,2	3,6	2,8	3,7	13,7

Analizando los índices calculados con el área de diseño y el número de paquetes, se observa que, en promedio, por cada 343 m² de diseño se genera un paquete de localización y por cada 37 m² o 39 m² uno de despice o de detalle. En los índices calculados con el área de diseño y los paquetes de detalle y despice, se nota mucha variabilidad (Tabla 15).

Tabla 15. Estadísticas de los índices de paquetes

	Ad /P_Loc	Ad /P_Dim	Ad /P_Desp	Ad /P_Det	Ad /P_Ref
Promedio	343,2	1.322,0	38,9	36,8	218,3
DesvStd	295,5	1.858,0	23,9	24,2	269,3
Mínimo	71,5	79,0	8,5	8,8	47,2
Mediana	271,0	1.047,0	30,2	26,2	100,1
Máximo	1.160,3	7.421,0	108,3	84,7	1.171,5

La Tabla 16 muestra el resumen estadístico de las áreas equivalentes de los paquetes de información generados, para los proyectos, de acuerdo con la familia de objetos. Se observa que, la relación entre áreas equivalentes de cimentación, columna y vigas fue, en promedio, de 1:4:5. Se generaron en promedio por proyecto 72 dm² de área equivalente de cimentación, 287 dm² de área equivalente de columnas y 351 dm² de área equivalente de vigas.

Tabla 16. Estadísticas de las áreas equivalentes por familia de objetos

	AE_Cim [dm ²]	AE_Col [dm ²]	AE_Vig [dm ²]
Promedio	72,3	287,0	351,0
DesvStd	107,6	520,0	619,0
Mínimo	2,7	11,0	8,0
Q1	11,7	29,0	48,0
Mediana	28,3	84,0	111,0
Q3	65,3	209,0	263,0
Máximo	369,2	1.984,0	2.283,0
Asimetría	2,1	2,6	2,7
Curtosis	3,6	6,4	6,4

Analizando los índices calculados con el área de diseño y el área equivalente, como se muestra en la Tabla 17, se observa que, en promedio por cada 98 m² de área de diseño, se genera un 1 dm² equivalente de cimentación, mientras que, por cada 27 m² de área de diseño, se genera 1 dm² equivalente de columnas y por cada 19 m² de área de diseño 1 dm² equivalente de vigas. Se invierte la proporción anterior encontrada con los objetos: 1: ¼: 1/5.

Esto indica que se puede suponer una relación proporcional de las áreas equivalentes con el área de diseño y/o el número de tipos definidos en el proyecto. Planteando un modelo de regresión lineal simple con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$, se observó que el número de tipos es un predictor estadísticamente significativo ($p = 0,001$) del área

equivalente de cimentación, que explica su variabilidad en un 47%. Por su parte, se encontró que el área de diseño (Ad) no es un predictor estadísticamente significativo ($p = ,08$) del área equivalente de cimentación, aunque explica su variabilidad en un 17% (Figura 12).

Tabla 17. Estadísticas de los índices de área equivalente

	Ad /AE_Cim	Ad /AE_Col	Ad /AE_Vig
Promedio	98,1	26,82	19,37
DesvStd	80,5	15,76	12,54
Mínimo	8,8	2,1	2,16
Mediana	74,5	23,52	15,52
Máximo	275,3	64,25	42,52

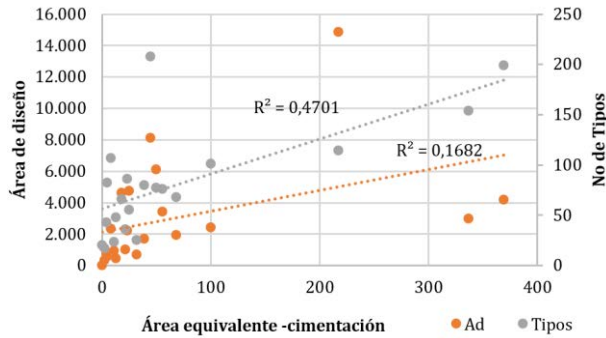


Figura 12. Predictores del área equivalente -cimentación

Con respecto a los modelos de regresión lineal simple, para explicar la variabilidad del área equivalente de columnas, se observa que el número de tipos es un predictor estadísticamente significativo ($p = 0,001$) que explica la variabilidad del área equivalente de columnas en un 46%, y que el área de diseño (Ad) es un predictor estadísticamente significativo ($p = 0,08$) que explica en un 34% la variabilidad del área equivalente de columnas (Figura 13).

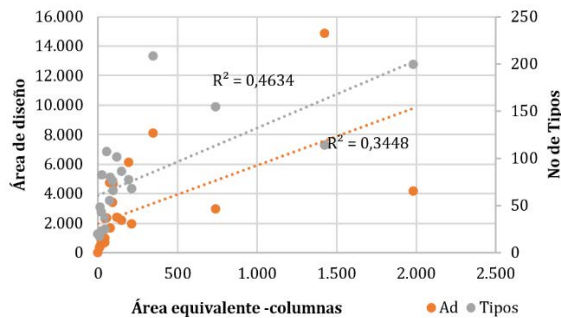


Figura 13. Predictores del área equivalente -columnas

Por su parte, los modelos de regresión lineal simple, que explican la variabilidad del área equivalente de vigas, muestran que el número de tipos es un predictor estadísticamente significativo ($p = 0,005$) que explica la variabilidad del área equivalente de vigas en un 36%, y que el área de diseño (Ad) es un predictor estadísticamente significativo ($p < 0,001$) que explica en un 56% la variabilidad del área equivalente de vigas (Figura 14).

La Figura 15 muestra la composición de los paquetes de información por tipología, agrupada por el grado de complejidad expresada en área de diseño. En las tres categorías

se observa, consistentemente, el comportamiento de las áreas equivalentes de los paquetes de tipo localización y dimensiones y su baja preponderancia en la composición general de planos. El área equivalente combinada de los paquetes, por tipología de despiece y detalle, se mantienen aproximadamente constantes para los tres casos, mientras que, en el caso de la tipología referencia, se observa una variación sustancial, con mayor relevancia en los proyectos de área mayor a 3.000m²

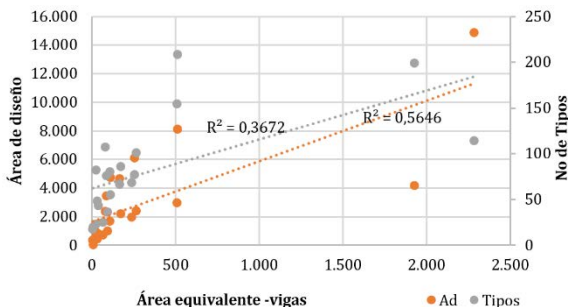


Figura 14. Predictores del área equivalente - vigas

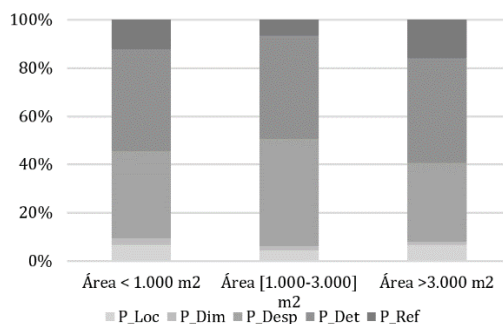


Figura 15. Proporciones de paquetes por área de diseño

La composición de los paquetes por tipología, agrupados por el número de niveles de proyecto, se muestra en la Figura 16. Con la agrupación por áreas, las tipologías de localización y dimensiones se mantienen similares en los tres casos, y su incidencia total en el área equivalente de los proyectos es baja. El área equivalente de los paquetes de despiece es comparable en los proyectos de niveles 1-2 y 3-4, mientras que, para el grupo de niveles 4-5, se observa una apreciable reducción. La tipología de detalle en los tres grupos se mantiene en un rango similar, pero se observa una mayor relevancia del área de los paquetes de referencia para el grupo de proyectos de niveles 5-6.

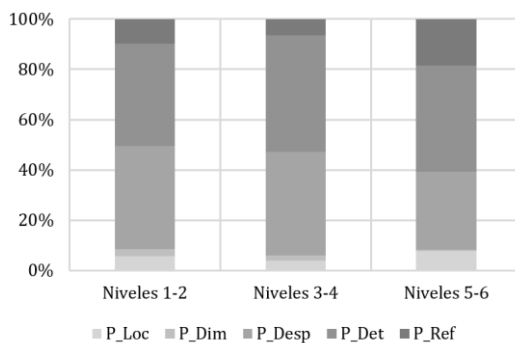


Figura 16. Proporciones de paquetes por niveles construidos

La composición promedio de los paquetes de información, por familia de objetos, muestra la preponderancia de los paquetes de la familia vigas con 59%, seguido por los

de tipo columnas con 40% y los de cimentación con 10% del total de los paquetes de información por familias. En la Figura 17, cuando se desagrega el análisis por área de diseño, se puede observar que el porcentaje de área equivalente de información sobre cimentación es alrededor de 18%, para proyectos con áreas menores a 3.000 m², mientras que se reduce a menos del 10% cuando el área es mayor a 3.000 m². El porcentaje de columnas es alrededor del 30% para estructuras con áreas menores a 1.000 m² y se incrementa casi al 40% en proyectos con áreas mayores a 1.000 m².

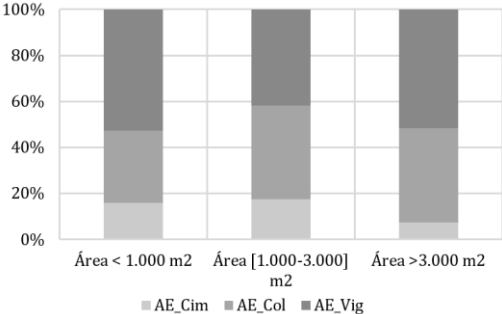


Figura 17. Proporciones de área equivalente de objetos por área de diseño

Cuando se analizó la información desagregada por niveles de construcción (Figura 18), se encontró que la diferencia proporcional en área equivalente de cimentación se encuentra entre estructuras de 2 o menos niveles y estructuras de más de 2 niveles. De 20% de participación en el primer grupo, pasa a casi 10% en estructuras de más de 2 pisos. Mientras que, en el porcentaje de área equivalente a vigas, en estructuras menos de 4 pisos, se mantiene una participación aproximada de 40% y, en estructuras más de 4 pisos, aumenta a casi el 60%.

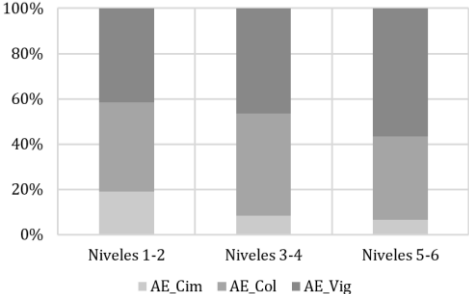


Figura 18. Proporciones de área equivalente de objetos por niveles construidos

8. Conclusiones

La presente investigación validó, a través de los resultados obtenidos y del juicio de expertos, la pertinencia y significado de paquetes de información y objetos de información, como conceptos de medición cuantitativa de información de diseño detallado.

La complejidad de los proyectos de estructura aporticada en la normativa colombiana, y desde el punto de vista del cálculo y diseño estructural, se categoriza teniendo en cuenta, entre otros, parámetros tales como el área de diseño y los niveles de construcción de la estructura. Este estudio encontró evidencia que concuerda con este criterio de categorización estructural de los proyectos y, por tanto, estos mismos parámetros sirvieron para analizar la información representada gráficamente en los diseños detallados.

En términos de complejidad se encontró evidencia que demuestra que el área de diseño tiene mayor incidencia que el número de niveles de la estructura, en relación con los objetos de información y el número de tipos de elementos estructurales. Sin embargo, se observó que el aumento del número de objetos incrementa la posibilidad de agrupar información, dado que a medida que se incrementa el área de diseño, o el número de niveles de la estructura, la relación área de diseño y tipos [Ad/T] se estabiliza más rápidamente que la relación área de diseño y objetos [Ad/O]. Además, se encontró que el incremento en el número de niveles de la estructura tiene mayor incidencia que el área de diseño en el área dibujada en planos -área neta y/o área equivalente; sin embargo, a partir de edificaciones con cuatro niveles de altura, los índices de área equivalente disminuyen.

Con respecto a la información generada en planos, se observó consistentemente que el porcentaje de área efectiva de dibujo, o área neta, en el conjunto de planos de diseño, se mantiene constante para todos los niveles de complejidad y representa aproximadamente el 50% del área útil de dibujo. Con relación al área equivalente, se encontró que, a menor complejidad de la estructura, se presenta una mayor ineficiencia en la información transmitida, con un 14% del área equivalente con relación al área útil de los planos, y que, a medida que aumenta la complejidad, en términos de área de diseño o niveles, la eficiencia de uso del espacio equivalente de papel se incrementa hasta alcanzar el 50% de aprovechamiento del espacio útil.

En relación con los resultados de los paquetes de información, se encontró que el número total de paquetes guarda una proporción aproximada 1:2, con relación al número de tipos en estructuras hasta de 3.000m² y cuatro niveles de altura; a partir de este nivel la proporción tiende a duplicarse, teniendo mayor incidencia el área de diseño que el número de niveles de la estructura. La relación de paquetes y objetos es menor para estructuras de hasta 3.000 m² y cuatro niveles de altura; a partir de este grado de complejidad, la razón Paquetes/Objeto se incrementa, con mayor cuando se incrementa el número de niveles de la estructura.

En términos de composición de paquetes de información por tipologías, se observó que el número de paquetes de despiece y detalle se mantienen aproximadamente constantes para todos los casos, mientras que se encontró una variación sustancial en el número de paquetes de referencia, especialmente en proyectos con área mayor a 3.000m². La composición de paquetes de información, por familias de objetos, muestra la preponderancia general de los paquetes de la familia vigas, con 59%, seguido por los de tipo columnas con 40% y los de cimentación con 10% del total de los paquetes de información por familias. Estos índices son una primera referencia para comparar la información generada en diseño detallado.

Los futuros estudios sobre estos índices de información se deben centrar en estandarizar la información en el medio colombiano, ya sea por tipología de proyectos o por zona geográfica, para que sirva de referencia en la evaluación de la información de proyectos detallados.

Referencias

- [1] Cheng, Y. (2014). [An exploration into cost-influencing factors on construction projects](#). International Journal of Project Management 32, pp. 850-860
- [2] Flyvbjerg, B. et al. (2003). [How common and how large are cost overruns in transport infrastructure projects](#). Transport Reviews 23(1), pp. 71-88.
- [3] Reiffi, H. & Emmit, S. (2013). [Perceptions of lean design management](#). Architectural Engineering and Design Management 9(3), pp. 195-208.

- [4] Doloi, H. (2013). [Cost Overruns and Failure in Project Management: Understanding the Roles of Key Stakeholders in Construction Projects](#). *Journal of Construction Engineering and Management* 139(3), pp. 267-279.
- [5] Tilley, P. (2005). [Lean Design Management – A new paradigm for managing the design and documentation process to improve quality?](#) In Proceedings 13th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Congress (pp. 283-295). Sidney, Australia.
- [6] Williams, C. & Johnson, P. (2015). [Inadequate Design Management Compared with Unprecedented Technical Issues as Causes for Engineering Failure](#). *Journal of Performance Constructed Facilities* 29(1), pp. 48-65.
- [7] Krus, P. (2013). [Information Entropy in the Design Process](#). In proceedings of the 4th International Conference on Research into Design (pp. 101-112). Chennai, India.
- [8] Li, Y. & Taylor, T. (2011). [The impact of Design Rework on Construction Project Performance](#). In 29th International Conference of the System Dynamics Society. Washington, USA.
- [9] Mendonca, L. & McDermott, P. (2000). [Lean Design Management Applied to Concrete Structures for Retaining Aqueous Liquids: A Redesign process Model to Portuguese Design Companies](#). In 8th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Brighton, UK.
- [10] Koskela, P. & Leinonen, J. (2002). [Design management in building construction: from theory to practice](#). *Journal of Construction Research* 3(1), pp. 1-16
- [11] Otter, A. & Emmitt, S. (2008). [Design Team Communication and Design Task Complexity: The Preference for Dialogues](#). *Architectural Engineering and Design Management* 4(2), pp. 121-129.
- [12] Knotten, V. et al. (2015). [Design Management in the building process – A review of current literature](#). *Procedia Economics and Finance* 21, pp. 120–127.
- [13] Baldwin, A. et al. (1998). [Planning building design by simulating information flow](#). *Automation in Construction* 8, pp. 149-163.
- [14] Ballard, G. & Koskela, L. (1998). [On the agenda of design management research](#). In 6th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Guarujá, Brazil.
- [15] Tribelsky, E. & Sacks, R. (2010). [Measuring information flow in the detailed design of construction projects](#). *Research in Engineering Design* 21(3), pp. 189-206
- [16] Love, P. et al. (2014). [Estimating Construction Contingency: Accommodating the Potential for Cost Overruns in Road Construction Projects](#). *Journal of Infrastructure System* 21(2), pp. 112-123.
- [17] Alviria, R. (2014). [Una teoría unificada de la complejidad](#). Madrid: Alviria.

14. Validación de rendimiento y dinámica de vuelo de una aeronave no tripulada multipropósito

Pedro Jiménez

Eliana Zuluaga

Andrés Téllez

Universidad de San Buenaventura. Bogotá, Colombia

1. Introducción

Los sistemas aéreos no-tripulados tienen el potencial de reducir los costos e incrementar la seguridad de las operaciones aéreas. Por sus características de pequeñas dimensiones, alta versatilidad y flexibilidad de diseño en comparación con sistemas aéreos tripulados, se pueden utilizar para realizar vigilancia de terrenos, búsqueda y rescate, agricultura de precisión, misiones de investigación científica, entre otras, especialmente en ambientes peligrosos o de difícil acceso [1]. Actualmente, el estudio de estas aeronaves se ha incrementado con la implementación de nuevas aplicaciones para facilitar diversas tareas que deberían realizar seres humanos. Esto se debe al mejoramiento de sus capacidades, por lo que es importante caracterizar su comportamiento en vuelo para que, al momento de cumplir el perfil de misión, lo hagan de lo más eficiente posible, usando la carga útil de forma efectiva en el tiempo y en el espacio [2], consumiendo la menor cantidad de energía en los sistemas y garantizando una operación segura.

Para predecir el comportamiento en vuelo de estas aeronaves, en ocasiones, durante las etapas tempranas de diseño, se usan modelos empíricos y matemáticos propuestos. Pero, por lo general, presentan simplificaciones debido a que representar condiciones reales de operación resulta complicado de analizar, por la alta variabilidad de los parámetros atmosféricos y otros efectos que generalmente se idealizan.

En este estudio se decidió usar la aeronave USB-Aero como referente de aeronave no-tripulada multipropósito, debido a que se ha utilizado en labores de investigación aeronáutica y en tareas de agricultura de precisión por parte de la Universidad de San Buenaventura en Bogotá. La USB-Aero (ver Figura 1) es de configuración ala fija, cola en *T* y motor tipo *pusher*, se puede lanzar manualmente y no requiere pista de aterrizaje; además, su geometría sigue el modelo Skywalker 3DRAero. Debido a su configuración con piloto automático, se puede controlar tanto manual como automáticamente. El motor es brushless de 1000 vatios y obtiene la energía de dos baterías LiPo. La estructura interna es capaz de soportar un módulo de carga paga removible, lo cual permite cambiar la configuración dependiendo de las características de la misión.



Figura 1. Aeronave USB-Aero

El principal material de la aeronave es poliestireno expandido, sin embargo, su estructura externa se encuentra fortalecida con plástico reforzado de kevlar y carbono; por lo tanto, se puede utilizar en terrenos difíciles. Los sensores pueden pesar hasta 800 gramos para conseguir una autonomía máxima de 50 minutos a 340 metros sobre el nivel

del mar [3]. La USB-Aero cuenta con un piloto automático conocido como Ardupilot Mega 2.6 (APM), un sistema de control de código abierto avanzado que se basa en una unidad inercial de medición (IMU). Además, se destaca por su diseño *todo en uno*, compatible con aeronaves configuradas en ocho canales. El hardware incluye sensores de presión barométrica para determinar la altitud, girsóscopos, acelerómetros, magnetómetros, GPS y sensores de voltaje para medir el estado de la batería.

Por otro lado, el APM utiliza un sistema informático, llamado Mission Planner, para controlar la aeronave, que funciona de manera que el sistema de navegación incorporado en el piloto automático calcula la posición actual y envía los datos al sistema de gestión de vuelo, el cual regresa las correcciones pertinentes de rumbo, altitud y demás. Por último, es importante destacar que el registro de datos se hace mediante una memoria de 4Mb. De esta aeronave se valida el rendimiento de vuelo en sus etapas principales de operación, y su estabilidad estática longitudinal como parte del estudio de dinámica de vuelo, a partir de cálculos por medio de ecuaciones teóricas y de vuelos experimentales, los cuales permiten la adquisición de datos de telemetría a través de sensores del piloto automático.

El rendimiento de vuelo permite evaluar el comportamiento de la aeronave en las diferentes fases de vuelo: despegue, ascenso, crucero, descenso y aterrizaje, en función de sus características aerodinámicas, su geometría y la configuración de cada uno de sus componentes, bajo condiciones atmosféricas predeterminadas. El presente estudio tiene por objeto determinar los parámetros críticos de rendimiento en las etapas de crucero, ascenso y descenso. No se utiliza la etapa despegue debido a que la aeronave se lanza manualmente, y el proceso genera variabilidad en las mediciones de los sensores. Tampoco la de aterrizaje, porque el método de *belly-landing* genera un contacto directo entre el terreno y la parte inferior de la aeronave por ausencia de tren de aterrizaje.

Por otro lado, la dinámica de vuelo es una rama de la ingeniería aeronáutica encargada de analizar el comportamiento de respuesta en aeronaves al aplicarles estas perturbaciones en vuelo o señales de entradas sobre las superficies de control. Es necesario caracterizar las fuerzas aerodinámicas y de propulsión y los momentos que actúan en la aeronave, lo mismo que la dependencia de estas fuerzas y los momentos con las respectivas variables de vuelo, incluyendo la velocidad respecto al viento y la orientación del vehículo, para poder entender la respuesta de las aeronaves [4].

La estabilidad de una aeronave se puede describir estática o dinámicamente, donde en la primera se analiza su tendencia a volver al estado inicial cuando responde a una perturbación, en otras palabras, al restablecimiento del equilibrio. La estabilidad estática en los diferentes ejes se debe estudiar de manera individual y hace parte de las primeras consideraciones cuando se diseña un avión [5]. El presente análisis de dinámica de vuelo tiene como punto central de estudio la estabilidad longitudinal estática de la aeronave, haciendo referencia al movimiento del avión sobre su eje longitudinal, el cual depende de contribuciones de los componentes ala, fuselaje y empenaje. Además, la característica más evidente en la estabilidad longitudinal es el cabeceo, causado por cualquier movimiento en el elevador ubicado en el estabilizador horizontal.

Además de las condiciones geométricas generales de la aeronave, que involucran el análisis de estabilidad estática longitudinal, también es importante indicar que el peso y balance de la aeronave que se va a analizar se definen durante la condición de vuelo establecida, en este caso crucero, porque la ubicación del centro de gravedad puede variar significativamente la estabilidad estática volviéndola inestable, muy estable, o estar en la mejor condición de vuelo y maniobrabilidad, que es el punto neutro [6].

2. Metodología

Para la validación del rendimiento y la dinámica de vuelo de la USB-Aero, se dividió el estudio en una fase experimental y en una fase teórica. En la primera se decide ejecutar dos patrones de vuelo experimentales planeados para la adquisición de las variables de estudio por medio de sensores, y en la segunda se desarrolla el cálculo de cada una de las variables a partir de modelos matemáticos.

La aplicación de una metodología para el diseño de experimentos resulta ser un acercamiento sistemático para investigar algún sistema o proceso [7], que se puede utilizar para encontrar respuestas a situaciones en las que se requiere identificar el factor que contribuye a generar un problema, qué tan bien se comporta un sistema o proceso bajo la presencia de ruido o incluso para conocer cuál sería la mejor configuración de los factores para minimizar la variación en una respuesta de salida.

Al realizar un experimento con una aeronave no-tripulada en vuelo, surgen factores que no se pueden controlar y que podrían influir significativamente en las mediciones y generar una alta desviación de las respuestas de salida entre cada una de las réplicas del experimento. Por ejemplo, las condiciones atmosféricas son por excelencia el error dinámico e impredecible de los experimentos, al igual que factores como fatiga estructural, estado del mantenimiento de la aeronave, pequeñas variaciones por las vibraciones del motor y la técnica del piloto, los cuales generan variabilidad en las pruebas [8]. Cuando se encuentran factores de este tipo, pero que pueden medirse, se debe hacer un análisis para determinar el error producto de su influencia.

Previo al diseño de un plan de vuelo que permita adquirir correctamente la información de rendimiento y dinámica de vuelo de la aeronave, hay que identificar el lugar en que se realizará el experimento, qué parámetros a la entrada del sistema se pueden definir y qué salidas son las que necesitan analizar en función del tiempo. Además, se debe tener claridad de los factores que se pueden o no controlar, para conocer las posibles fuentes de error que afectan los resultados de salida.

2.1 Lugar de estudio

Los vuelos experimentales con USB-Aero se realizaron en el municipio de Tenjo, Cundinamarca, Colombia. El lugar de pruebas, con coordenadas $4^{\circ}49'25,16''N$ y $74^{\circ}09'22,17''$, cuenta con una pista de vuelo (Figura 2) a una elevación de 2570 metros sobre el nivel del mar, que tiene una extensión de 300 m y un ancho de 30 metros, suficiente para la operación de aeronaves no-tripuladas controladas remotamente y de pequeñas dimensiones. La pista tiene un rumbo de 314 grados y 134 grados respecto al norte magnético. El lugar se caracteriza por tener temperaturas promedio entre los $10^{\circ}C$ y los $15^{\circ}C$, con velocidades de viento promedio de 4 m/s con dirección predominante de 300 grados con respecto al norte. Estos datos fueron obtenidos bajo mediciones realizadas durante los experimentos.



Figura 2. Pista de vuelo del lugar de estudio

2.2 Determinación de parámetros

Para el análisis de rendimiento de vuelo, el objetivo fue validar los parámetros críticos:

- Tasas [m/s], velocidades [m/s] y ángulos [°] durante el ascenso
- Coeficiente de sustentación máximo y en crucero
- Velocidad de crucero y de pérdida [m/s]
- Relación empuje - peso (T/W) en cada etapa
- Eficiencia aerodinámica de la aeronave (L/D)
- Factor de carga de la aeronave durante banqueos

Para ello, desde los sensores del piloto automático APM 2.5 se adquiere:

- Tiempo [s]
- Altura [m]
- Velocidad [m/s] respecto al aire, respecto a la tierra, del viento y vertical
- Dirección del viento [°]
- Voltaje [V] y capacidad disponible de la batería [mAh]
- Empuje [N]
- Rumbo [°]
- Ángulos de banqueo y de cabeceo [°]
- Condiciones atmosféricas locales: densidad [kg/m³], presión [Pa], temperatura [°C]

Debido a que el objeto del análisis de dinámica de vuelo es determinar la estabilidad estática longitudinal, se requiere validar los siguientes parámetros:

- Punto neutro de la aeronave [%]
- $dC_m/d\alpha$ [1/°]
- dC_L/dC_m

Para ello, en el vuelo experimental se requiere adquirir información de:

- Ángulo de cabeceo [°]
- Tasa de cabeceo [rad/s]
- Altura [m]
- Velocidad [m/s] respecto al aire, respecto a la tierra, del viento y vertical
- Valores sin procesar de la señal PWM del servo del elevador (ángulo de deflexión)

2.3 Generación del vuelo experimental

Para generar el plan de vuelo se utilizó el software Mission Planner (ver Figura 3) que permite programar la ruta deseada a partir de coordenadas de latitud, longitud y altitud, junto con algunos comandos pre-establecidos tales como ascensos en giro o descensos para volver a la base donde se inicia la misión. Para el experimento, cuyo objetivo es evaluar el rendimiento de vuelo, en las Figuras 4 y 5 se muestra el patrón de vuelo planteado.

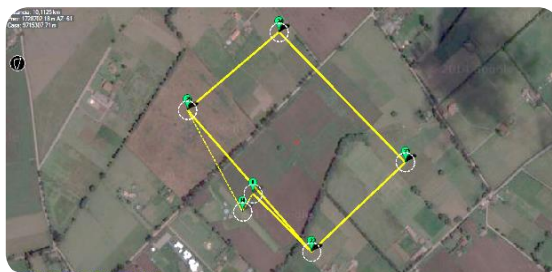


Figura 3. Patrón de vuelo programado en Mission Planner

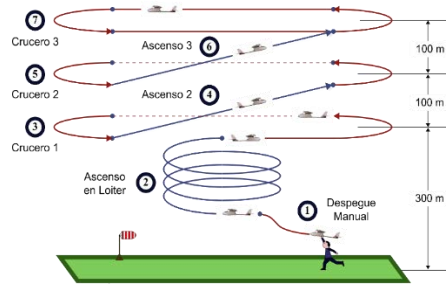


Figura 4. Patrón de rendimiento de vuelo durante ascenso

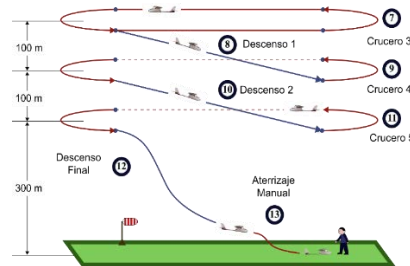


Figura 5. Patrón de rendimiento de vuelo durante descenso

Este patrón de vuelo tiene por objeto evaluar el comportamiento de la aeronave durante las fases de ascenso, crucero y descenso. Se plantea desarrollar varias réplicas del patrón para cada fase a tres alturas diferentes en intervalos de 100 metros, y de esta forma modificar indirectamente otras variables no-controlables tales como presión, temperatura y densidad del aire. Inicialmente, la aeronave se despegue en modo manual hasta alcanzar una altura de 100 metros sobre el terreno, luego se acciona el modo automático para iniciar el experimento, el cual consta de cinco etapas de crucero, tres de ascenso y tres de descenso.

De la etapa de crucero se pretende obtener la mayor cantidad de datos de telemetría, porque se definieron tres recorridos a tres diferentes alturas: a los 500 metros se decidió mantener un vuelo en crucero más largo, en comparación con los realizados a 300 y 400 metros. De igual manera, aprovechando la variación de alturas entre cada fase de crucero, se decide evaluar tres ascensos y tres descensos. Uno de los ascensos se define para ser evaluado a través de un *loiter* en forma de espiral con radio constante, a diferencia de los otros dos que se realizan en trayectoria recta. Lo mismo sucede para los descensos: los dos primeros se establecen en trayectorias rectas y el último se condiciona al comando Return to Launch (RTL) del programa, el cual debe llevar la aeronave de vuelta a los 100 metros desde una altura de 300 metros sobre el terreno, para reactivar el modo manual.

La pista seleccionada para las pruebas por lo general presenta vientos en direcciones cercanas a su rumbo para ambas cabeceras. Por ello, para las etapas de crucero se selecciona un patrón estándar para todas las alturas, el cual es de forma rectangular con trayectos de 500 metros en el sentido paralelo a la pista, con el fin de evitar la mayor cantidad de vientos cruzados durante el experimento, y trayectos de 350 metros perpendiculares a la pista para evaluar los parámetros bajo condiciones perturbadoras por vientos laterales.

Para el experimento que tiene por objeto adquirir la información para dinámica de vuelo, el patrón es más sencillo que el de rendimiento, porque la condición que se requiere analizar se puede ejecutar a una altura constante. Para ello, manteniendo la forma de patrón rectangular, se pretende realizar perturbaciones manuales en la aeronave con deflexión de las superficies de control en un rango de $\pm 5^\circ$. Según Morelli y Klein [9], para

realizar experimentos que pretendan identificar el sistema dinámico de la aeronave, se recomienda que los patrones para ejecutar las maniobras sean largos, para que la aeronave tenga el espacio y tiempo suficiente para auto-estabilizarse y responder por completo a cada perturbación, y de esta forma obtener la mayor cantidad de información.

Para establecer la maniobra a realizar se definen condiciones constantes (Ver Figura 6) para el ángulo de ataque de *trim*, la velocidad de vuelo, la altura de la maniobra y el nivel de potencia del motor. Además, se define el tiempo de la maniobra, las deflexiones de prueba en las superficies de control, la forma de perturbación y su amplitud. Morelli y Klein también recomiendan que las maniobras tengan varias réplicas y por lo menos dos segundos de vuelo estable para encender el sistema de adquisición de datos. De la misma manera, afirman que la aeronave debe ser perturbada por un tiempo equivalente a cinco veces el periodo dominante del modo dinámico a evaluar. Esto se puede traducir en tiempos de maniobra de entre 10 y 20 segundos, contando con cinco segundos extras para la respuesta libre de la aeronave, con el fin de asegurar que el sistema de adquisición lea la respuesta completa.

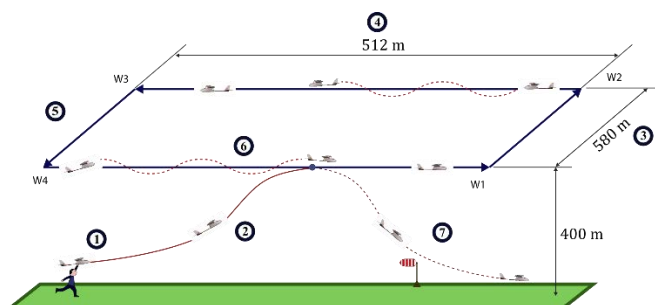


Figura 6. Patrón de dinámica de vuelo

2.4 Preparación de la aeronave

Previo a la ejecución del vuelo experimental, la aeronave USB-Aero se somete a una lista de chequeo para garantizar su condición de aeronavegabilidad, verificando la correcta ubicación del centro de gravedad, la integridad estructural de sus partes y la conexión acertada de cada uno de sus componentes electrónicos. Adicionalmente, luego de cargar el plan de vuelo al piloto automático, se verifica que los sensores estén registrando mediciones coherentes, tomando como referencia la elevación del terreno conocida, los registros de velocidad del aire y la velocidad respecto a la tierra. Este procedimiento de preparación es el siguiente:

1. Verificar integridad estructural
2. Verificar sistemas electrónicos
3. Verificar sistema propulsivo
4. Ensamblar aeronave
5. Realizar y verificar conexiones
6. Verificar peso y balance
7. Configurar piloto automático
8. Configurar sistema de comunicaciones
9. Hacer pruebas de motor

2.5 Obtención de la telemetría

A partir del vuelo experimental, se plantea una metodología para extraer la información de las mediciones hechas por cada uno de los sensores del piloto automático APM 2.5, tal como se muestra en el diagrama de decisión de la Figura 7.

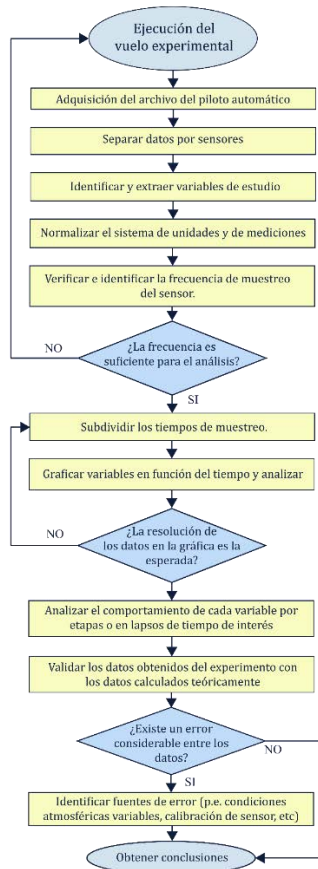


Figura 7. Metodología para obtención de telemetría

Inicialmente y luego de adquirir el documento de telemetría, se deben extraer las variables de interés en el estudio y separarlas por sensores, de acuerdo con su frecuencia de muestreo. A continuación, se debe normalizar el sistema de medición del tiempo para generar un orden secuencial en segundos, iniciando desde cero hasta el final de la misión.

El objetivo es hacer un tratamiento detallado de la información, principalmente para identificar si la frecuencia de muestreo tiene la resolución necesaria para confiar en la veracidad de los datos, además, para validar qué tan cercanos están los modelos teóricos de rendimiento y dinámica de vuelo de un comportamiento bajo condiciones reales. Al final se podrá concluir si el experimento es adecuado o si requiere modificaciones para futuras investigaciones.

3. Modelos teóricos

3.1 Datos de la aeronave

Las características geométricas obtenidas del levantamiento dimensional de la aeronave USB-Aero, necesarias para los cálculos aerodinámicos y el rendimiento de vuelo, se muestran en la Tabla 1. Todos los valores de longitudes y ángulos se obtuvieron mediante medición directa sobre la aeronave y los de superficie a partir del modelo 3D hecho en CAD. Igualmente, se verificaron en el diagrama del sistema coordenado de estaciones, presentado por Herrera, Monroy y Rodríguez [10] en su proyecto de grado sobre estabilidad y control de ésta misma aeronave.

Tabla 1. Dimensiones de la aeronave

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Fuselaje			
Longitud Total	l_{fT}	1,28	m
Longitud (Sin <i>Tail-boom</i>)	l_f	0,6	m
Diámetro Máximo	d_f	0,188	m
Área Húmeda	$S_{f_{wet}}$	0,274	m ²
Ala (Perfil NACA 4412)			
Envergadura	b	1,84	m
Cuerda en la Punta	c_t	0,23	m
Cuerda en la Raíz	c_r	0,25	m
Cuerda Media Aerodinámica	\bar{c}	0,24	m
Flechamiento en el L.E.	Λ_{LE}	1,25	deg.
Área Proyectada	S	0,44	m ²
Relación de Aspecto	AR	7,67	-
Ángulo de Incidencia	i_w	2	deg.
Estabilizador Horizontal (Perfil NACA 0012)			
Envergadura	b_H	0,541	m
Cuerda en la Punta	c_{tH}	0,135	m
Cuerda en la Raíz	c_{rH}	0,18	m
Cuerda Media Aerodinámica	\bar{c}_H	0,16	m
Flechamiento en el L.E.	Λ_{LE}	9,43	deg.
Estabilizador Vertical (Perfil NACA 0008)			
Longitud	b_V	0,204	m
Cuerda en la Punta	c_{tV}	0,15	m
Cuerda en la Raíz	c_{rV}	0,22	m
Cuerda Media Aerodinámica	\bar{c}_V	0,19	m
Flechamiento en el L.E.	Λ_{LE}	35	deg.

Además, a partir del estudio de peso y balance de la aeronave, se determina su peso máximo de despegue, junto con la ubicación de su centro de gravedad medido desde el borde de ataque del ala y como porcentaje en función de la cuerda media aerodinámica de la misma. Los resultados se presentan en la Tabla 2. Bajo esta configuración de peso se realizan todos los cálculos teóricos y el vuelo experimental para la validación de los parámetros críticos de rendimiento y los de estabilidad estática longitudinal.

Tabla 2. Peso y Balance de la aeronave

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Peso Máximo de Despegue	MTOW	2,9	kg
		28,4	N
Ubicación del Centro de Gravedad	x_{cg}	0,093	m
	x_{cg}/\bar{c}	38,7	%

3.2 Rendimiento de vuelo

Para el cálculo de los parámetros críticos de rendimiento, previamente se deben considerar las características aerodinámicas de la aeronave. Para esto, se hace uso del programa XFLR5 [11] (Figura 8), en el que se modelan el ala y los estabilizadores para simularlos en condición de crucero en un rango de ángulos de ataque. Este programa se fundamenta en modelos teóricos el Prandtl, de Lifting Line Theory (LLT), para simular el ala en tres dimensiones, y el método numérico de Vortex Lattice Method (VLT) para simular la aeronave en condiciones viscosas [11].

De este estudio se determinan principalmente la pendiente de sustentación del ala ($dC_L/d\alpha$), el coeficiente de sustentación máximo (C_{Lmax}), el coeficiente de resistencia

parásita de la aeronave (C_{do}) y la eficiencia de sustentación (k), que permiten caracterizar la resistencia inducida bajo el modelo polar de resistencia de la ecuación (1).

$$C_D = C_{do} + k C_L^2 \quad (1)$$

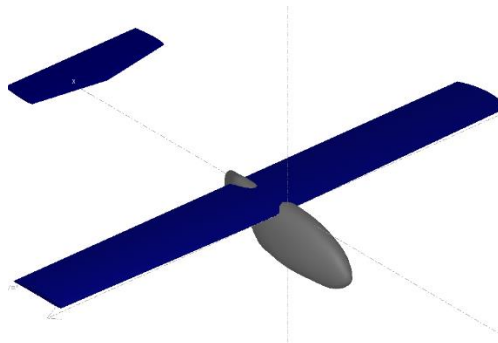


Figura 8. Aeronave USB-Aero simulada en XFLR5

Para determinar las velocidades de pérdida en crucero y velocidad máxima, se recurre al diagrama de carga V - n con ráfagas para establecer qué velocidades de operación cumple la aeronave y su factor de carga límite correspondiente, para que no exista daño en su estructura [13]. Para ello, cada velocidad se determina bajo la ecuación (2).

$$V_x = \sqrt{\frac{2nW}{\rho S C_{Lx}}} \quad (2)$$

Donde el subíndice x representa la condición de vuelo, por ejemplo, la velocidad de pérdida V_S se halla con el coeficiente de sustentación C_{Lmax} a un factor de carga $n=1$ y la velocidad de máxima maniobra V_A con el factor máximo de carga, recomendado por la normativa australiana [12], de $3 < n < 3.8$ al coeficiente de sustentación máximo. Basta con conocer los factores de carga positivos y negativos, junto con los coeficientes de sustentación máximos positivos y negativos, para poder determinar todas las velocidades. La velocidad de crucero se determina con el coeficiente de sustentación correspondiente a la incidencia del ala, que sería el mismo ángulo de ataque para un vuelo recto y nivelado. Por otra parte, la velocidad límite de operación corresponde a 1,5 veces la velocidad de crucero.

Para el diagrama de ráfagas se consideran velocidades de perturbaciones verticales en la aeronave de ± 50 ft/s y ± 25 ft/s, se halla la relación de masa de la aeronave μ_g y el factor de reducción de ráfaga K_g y se usa la ecuación (3) para expresar el factor de carga en términos de la velocidad de vuelo, la cual usa la pendiente de sustentación del ala como término que involucra la variación del ángulo de ataque debido a la ráfaga vertical.

$$n(V) = 1 + \frac{K_g U_{de} C_{L\alpha} \rho S}{2W} V \quad (3)$$

Al final, se realiza una combinación de los diagramas de maniobras y de ráfagas para obtener los factores de carga límites y bajo un diseño estructural se multiplicaría por el factor de seguridad aeronáutico de 1,5 para obtener la carga última [13]. También resulta fundamental evaluar el empuje requerido por la aeronave para vencer la resistencia al avance durante la etapa de crucero. De este análisis se puede determinar el empuje mínimo requerido, la velocidad de la eficiencia máxima de la aeronave, la potencia mínima requerida y los efectos de la resistencia inducida y parásita durante el vuelo [14], bajo el modelo que se presenta en la ecuación (4).

$$D = \frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 S C_{do} + \frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 S k C_L^2 \quad (4)$$

La velocidad durante el vuelo en etapa de crucero se da en función de los parámetros críticos que describen el rendimiento de una aeronave, la relación empuje-peso (T/W), la carga alar (W/S) y el polar de resistencia anteriormente nombrado. La expresión general para esta velocidad está dada por la ecuación (5).

$$V_{\infty} = \left[\frac{(T_R/W)(W/S) \mp (W/S) \sqrt{(T_R/W)^2 - 4C_{do}k}}{\rho_{\infty} C_{do}} \right]^{1/2} \quad (5)$$

Donde el discriminante dentro de la raíz permite conocer el empuje mínimo requerido cuando es igual a cero $(T_R/W)^2 = 4C_{do}k$. La mejor manera de visualizar estos resultados es por medio de la curva de empuje en función de la velocidad que se muestra en la Figura 9, en la que se puede identificar el punto en el cual el empuje es el mínimo requerido, para el que la eficiencia de la aeronave será la máxima durante crucero, porque volar a la velocidad correspondiente a esa condición garantiza que se está generando la mayor sustentación para la menor cantidad de resistencia aerodinámica.

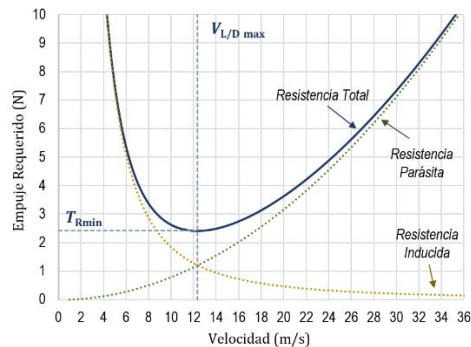


Figura 9. Curva de Empuje requerido vs. Velocidad de vuelo

Para un avión propulsado por hélice resulta importante evaluar la potencia requerida en lugar del empuje. Por ello, basta con multiplicar el empuje requerido por la velocidad para dejarlo en términos de energía por unidad de tiempo. En la Figura 9 se evidencia que la curva de empuje está dada por la suma de la contribución de la resistencia parásita y la resistencia inducida debida a la sustentación. El punto de corte entre estas dos contribuciones corresponde a la condición $C_{do} = k C_L^2$, por tal motivo, allí se encuentra la velocidad de la eficiencia aerodinámica máxima que está dada por la ecuación (6).

$$V_{(T_R)min} = V_{(L/D)max} = \left(\frac{2}{\rho_{\infty}} \sqrt{\frac{k}{C_{do}}} \frac{W}{S} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Otra de las fases de vuelo de interés es el ascenso. Del rendimiento de la aeronave en ascenso depende qué tan rápido va a ascender para la menor distancia horizontal o para la menor cantidad de tiempo, dependiendo del requerimiento de misión. El ángulo de ascenso está representado por θ [°] y se forma entre la dirección del viento relativo a la aeronave V_A y la horizontal, como se muestra en la Figura 10.

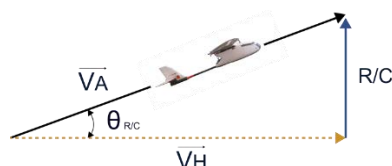


Figura 10. Representación del ascenso de una aeronave

El rendimiento de esta maniobra en vuelo se puede determinar a partir de los parámetros críticos T/W , W/S y C_{do} . Por lo tanto, la tasa de ascenso ($R/C = V_A \sin\theta$) se puede expresar con la ecuación (7). La tasa de ascenso depende entonces del exceso de potencia de la aeronave en combinación con su peso. A mayor empuje, menor es la resistencia aerodinámica, y a menor peso, mejor es el rendimiento en ascenso.

$$R/C = V_A \left[\frac{T}{W} - \frac{1}{2} \rho_{\infty} V_A^2 \left(\frac{W}{S} \right)^{-1} C_{do} - \frac{W}{S} \frac{2k}{\rho_{\infty} V_A^2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

Otra de las maniobras a evaluar es el giro nivelado durante las etapas de crucero. El punto de interés en estos virajes, más allá de la tasa de giro o el radio de giro, es el factor de carga generado n , dado en función del inverso del coseno del ángulo de banqueo ϕ [°] ($n=1/\cos \phi$). Con la experimentación se pretende validar que el factor de carga en banqueos no supere el factor de carga máximo, que se obtiene a partir de la ecuación (8).

$$n_{max} = \left[\frac{0,5 \rho_{\infty} V_{\infty}^2}{k (W/S)} \left(\left(\frac{T}{W} \right)_{max} - 0,5 \rho_{\infty} V_{\infty}^2 \frac{C_{do}}{W/S} \right) \right]^{1/2} \quad (8)$$

3.3 Dinámica de vuelo

El estado de equilibrio de una aeronave se puede definir de manera estable, inestable y neutralmente estable, como se representa en la Figura 11. El estado de estabilidad positiva supone que la aeronave regresa al equilibrio original después de una perturbación, gracias a la acción de fuerzas y momentos que hacen que regrese a su posición original. Sin embargo, en una condición de inestabilidad o estabilidad negativa, la aeronave cambiará su estado inicial al tener una perturbación de cualquier tipo, porque se generan fuerzas y momentos que hacen que pierda su posición inicial. Por último, cuando se tiene una condición de estabilidad neutra, la aeronave no puede desarrollar las fuerzas restauradoras, por lo tanto, no vuelve a su posición inicial. Cabe destacar que cuando la aeronave es neutralmente estable, no vuelve al equilibrio original, pero sí encuentra uno nuevo. El análisis de estabilidad longitudinal es el estudio de la variación del momento de cabeceo respecto a la variación del ángulo de ataque, donde esta relación debe ser menor a cero para que no se genere una reacción desestabilizadora. También se puede expresar como la variación del coeficiente de momento en relación con la variación del ángulo de ataque, diferencia que debe tener valores negativos para que la aeronave sea estáticamente estable [15].

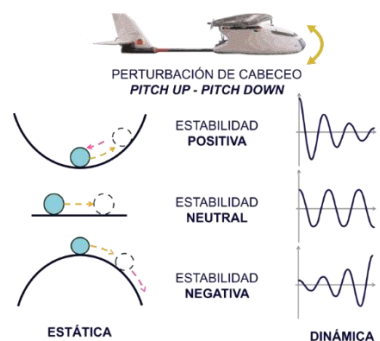


Figura 11. Tipos de estabilidad en una aeronave

Para analizar longitudinalmente una aeronave en vuelo estable se consideran los ángulos de ataque menores al de pérdida, además, se tiene en cuenta que en este caso el peso es igual a la fuerza de sustentación $L=W$ y el empuje es igual a la fuerza de arrastre generada $D=T$. Además, según Pamadi [15], es necesario hacer las siguientes suposiciones para poder separar el eje longitudinal de los demás:

1. La aeronave tiene un plano vertical de simetría, lo que implica tener una geometría y distribución de masas simétricas con respecto a dicho plano.
2. La deflexión del elevador no genera una fuerza lateral, momento de alabeo o momento de guiñada. Así mismo, la deflexión del timón de cola y de los alerones no produce fuerza de sustentación o momento de cabeceo.
3. Las fuerzas aerodinámicas y los momentos varían linealmente con las variables de aerodinámica y de control, respectivamente.
4. El total de las fuerzas y momentos actuando en la aeronave es igual a la suma de las fuerzas y momentos en los componentes individuales, tales como fuselaje y superficies de ala y empenaje.

Según Pamadi, la condición de equilibrio para el eje longitudinal del avión se llama condición de *trim*. Para el *trim* longitudinal el momento de cabeceo alrededor del centro de gravedad es cero, por esto es que un avión debe tener la capacidad de alcanzar la compensación, cuando se encuentre dentro del rango de ángulos de ataque permitidos. En la Figura 12 se pueden ver las fuerzas de sustentación del ala, sustentación del estabilizador horizontal y el peso, además de los momentos generados en los centros aerodinámicos del ala y el estabilizador horizontal, actuando en una aeronave.

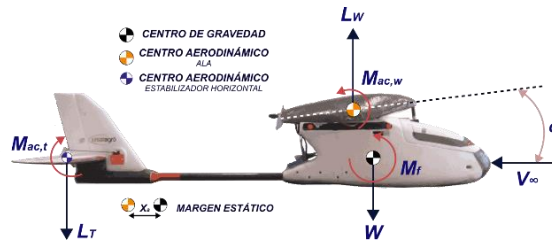


Figura 112. Fuerzas y momentos en vuelo recto y nivelado

Con base en los datos geométricos de la aeronave se procede a analizar cada uno de los componentes que influyen en la estabilidad longitudinal estática. Por eso, sumando las contribuciones al momento de cabeceo de la aeronave respecto al centro de gravedad, se tiene la ecuación (9).

$$\frac{dC_m}{dC_L} = \bar{x}_{cg} - \bar{x}_{ac} + \left(\frac{dC_m}{dC_L}\right)_f - \frac{a_t}{a_w} \left(1 - \frac{d\epsilon}{d\alpha}\right) \bar{V}_1 \eta_t \quad (9)$$

Como primera medida, la contribución del fuselaje a la estabilidad longitudinal estática se da por la distribución de presiones a lo largo del cuerpo que, acompañada de un ángulo de ataque, produce una fuerza neta igual a cero y un momento desestabilizador por naturaleza; esto quiere decir que la sustentación y el arrastre son iguales a cero, pero el momento de cabeceo en el fuselaje no. La contribución del fuselaje a la estabilidad estática longitudinal es importante y, al tener un fuselaje con geometría simétrica, varía linealmente con el ángulo de ataque, dada por la ecuación (10).

$$C_{mf} = C_{m0,f} + \left(\frac{\partial C_m}{\partial \alpha}\right)_f \cdot \alpha \quad (10)$$

También se deben tener en cuenta las ecuaciones (11) y (12).

$$C_{m0,f} = \frac{k_2 - k_1}{36.5 S \bar{c}} \int_0^{l_f} b_f^2 (\alpha_{ow} + i_{cl,B}) dx \quad (11)$$

$$\left(\frac{\partial C_m}{\partial \alpha}\right)_f = \frac{\pi}{2S \bar{c}} \sum_{i=1}^{n=l_f} b_{fi}^2 * \left(1 + \frac{\partial \epsilon_u}{\partial \alpha}\right)_i \cdot \Delta x_i \quad (12)$$

Donde $(k_2 - k_1)$ es la constante de masa aparente, directamente proporcional a la relación de la longitud del fuselaje con respecto al ancho promedio del mismo. Así que, para analizar las diferentes variables del fuselaje, se debe dividir en secciones y determinar la variación del *upwash* o *downwash*, según corresponda, con respecto al ángulo local de taque de cada una $\left(\frac{\partial \epsilon_u}{\partial \alpha}\right)$. Los valores calculados para las secciones delanteras y traseras del fuselaje corresponden a los valores teóricos, en los que, el *upwash* $\frac{\partial \epsilon_u}{\partial \alpha} > 0$ y el *downwash* $\frac{\partial \epsilon_u}{\partial \alpha} < 0$. Además, hay que determinar la variación del coeficiente de sustentación respecto al ángulo de ataque del ala ($C_{L\alpha W}$). Por último, para obtener la contribución del fuselaje hay que calcular el ángulo de incidencia ($i_{cl B}$).

En segundo lugar, la naturaleza de la contribución de las alas depende de la distancia relativa entre el centro aerodinámico del ala y el centro de gravedad de la aeronave, y será estabilizante porque el centro de gravedad está por delante del centro aerodinámico. Para la contribución del ala es necesario tener en cuenta el ángulo de incidencia, que se puede expresar con la ecuación (13).

$$C_{m,w} = C_{mac,w} + C_{L,w} \bar{x}_a \quad (13)$$

Donde \bar{x}_a denota el margen estático de la aeronave y se calcula teniendo en cuenta el centro de gravedad de la aeronave y el centro aerodinámico ubicado al 25% de la cuerda; así mismo, $C_{mac,w}$ es un valor tan cercano a cero que se puede asumir como éste al tratarse de una aeronave cuyo Reynolds es pequeño. Además, se utiliza la ecuación (14).

$$C_{L,w} = C_{LO} + C_{L\alpha exp} \cdot \alpha \quad (14)$$

En la que se obtiene un valor del coeficiente de sustentación cuando el ángulo de ataque es de cero, mediante la ecuación (15).

$$C_{LO} = C_{LC_{L\alpha exp}} * (\alpha - \alpha_{L=0}) \quad (15)$$

Sin embargo, para calcular $C_{L\alpha exp}$ se requiere un valor de referencia en la sección del fuselaje, que, para velocidades subsónicas, se puede determinar con la ecuación (16).

$$C_{L\alpha exp} = \frac{2\pi AR_{exp}}{2 + \sqrt{\frac{AR_{exp}^2 \beta^2}{k^2} \left(1 + \frac{\tan^2 \Lambda_{c/2}}{\beta^2}\right) + 4}} \quad (16)$$

Por otro lado, el *downwash* del ala afecta la contribución del estabilizador horizontal, lo que depende de la forma del ala, la relación de aspecto y la distancia entre centros aerodinámicos del ala y del estabilizador horizontal. El *downwash* del fuselaje se puede despreciar porque es muy pequeño. Sin embargo, al ser tan importante la corriente de aguas abajo, es necesario hallarla con la ecuación (17).

$$\frac{d\epsilon}{d\alpha} = 4.44 * \left[K_A * K_\lambda * K_H * \left(\cos \frac{\Lambda_c}{4} \right)^{0.5} \right]^{1.19} \quad (17)$$

Posteriormente, con la ecuación (18), se calcula el ángulo del *downwash* generado.

$$\epsilon = \frac{d\epsilon}{d\alpha} \cdot \alpha_w \quad (18)$$

Esto es necesario porque la contribución del estabilizador horizontal influye en la estabilidad longitudinal estática, la cual se expresa con la ecuación (19).

$$C_{mT} = -C_{LT} \cdot V_{HT} \cdot \eta_T \quad (19)$$

Uno de los parámetros importantes en el análisis es el valor de la pendiente de sustentación del estabilizador horizontal, en la que se debe tener en cuenta la relación de aspecto y al ángulo de flechamiento promedio, que se calcula con la ecuación (20).

$$a_T = \frac{2 \cdot \pi \cdot AR_{HT}}{2 + \sqrt{\frac{AR_{HT}^2 \cdot \beta^2}{K^2} \cdot \left(1 + \frac{\tan^2 \Lambda_C}{\beta^4}\right) + 4}} \quad (20)$$

Posteriormente, con la ecuación (21) se calcula el valor de la variación del coeficiente de sustentación del estabilizador horizontal con respecto al coeficiente de sustentación de la aeronave.

$$\frac{dC_{LT}}{dC_L} = \frac{a_T}{a_w} \cdot \left(1 - \frac{d\epsilon}{d\alpha}\right) \quad (21)$$

Para hallar el coeficiente de sustentación del estabilizador horizontal, se tiene en cuenta que el coeficiente de sustentación del ala es aproximadamente igual a la multiplicación de la pendiente del ala y el ángulo de ataque, que, asumiendo la dirección del viento relativo paralela a la cuerda del ala, corresponde al mismo valor del ángulo de incidencia que se calcula con la ecuación (22).

$$C_{LT} = \frac{dC_{LT}}{dC_L} \cdot C_L = \frac{dC_{LT}}{dC_L} \cdot \alpha_w \cdot a_w \quad (22)$$

El nivel de estabilidad estática longitudinal depende de la ubicación del centro de gravedad, lo que quiere decir que el movimiento en el centro de gravedad ocasionado por el cambio de las fuerzas, tiene alta influencia en la estabilidad de la aeronave. El cálculo total de la estabilidad longitudinal se realiza con la ecuación (23).

$$C_{mcg} = C_L \cdot \bar{x}_a + C_{mf} - C_{LT} \cdot V_{HT} \cdot \eta_T \quad (23)$$

Sin embargo, para calcular el margen estático de la aeronave, en primera instancia hay que encontrar el valor del coeficiente de momento con respecto al coeficiente de sustentación del fuselaje (ecuación 24).

$$H_N = N_0 - \bar{x}_{CG} = -\frac{dC_m}{dC_L} \quad (24)$$

Donde N_0 es el punto neutral de control longitudinal y representa la posición del centro de gravedad cuando $\frac{dC_m}{dC_L}$ es cero o cuando la aeronave es neutralmente estable (ecuación 25).

$$N_0 = \bar{x}_{ac} - \left(\frac{dC_m}{dC_L}\right)_f + \frac{a_T}{a_w} \cdot \left(1 - \frac{d\epsilon}{d\alpha}\right) \cdot V_{HT} \cdot \eta_T \quad (25)$$

El control longitudinal se puede evidenciar en el coeficiente de sustentación hallado en la condición de vuelo correspondiente, que debe ser menor al coeficiente de sustentación máximo para que la aeronave sea controlable, según la ecuación (26).

$$C_L = \frac{-C_{mf} + a_T \cdot (\alpha_w \cdot i_w + i_T - \epsilon) \cdot V_{HT} \cdot \eta_T}{\bar{x}_{cg} - \bar{x}_{ac}} \quad (26)$$

En el diagrama *trim* se pueden ver las variaciones esquemáticas de C_m con respecto a C_L y de $\frac{dC_m}{dC_L}$ con respecto a la posición del centro de gravedad. Para obtenerlo se utilizan las ecuaciones (27) y (28).

$$C_{m0} = C_{mac} + C_{mof} - a_T \cdot V_{HT} \cdot \eta_T \cdot (\alpha_{L=0} - i_w + i_T) \quad (27)$$

$$C_m = C_{m0} + \frac{dC_m}{dC_L} * C_L \quad (28)$$

Teniendo en cuenta el resultado de la ecuación (29).

$$\frac{dC_m}{dC_L} = -N_0 + \bar{x}_{cg} \quad (29)$$

Por último, hay tener en cuenta que el avión debe ser compensable en maniobras diferentes a crucero, por ejemplo, una aproximación en la cual el ángulo de ataque se incrementa significativamente. Por eso se requiere una deflexión negativa del elevador, para compensar el avión mientras vuela con un coeficiente de sustentación mayor al desarrollado durante la etapa de crucero. En esta condición de vuelo la velocidad se reduce y el ángulo de ataque se debe aumentar para sustentar el avión. Por el contrario, para compensar el avión mientras vuela a una velocidad mayor que la de crucero y a un ángulo de ataque menor, se necesita una deflexión positiva del elevador [16].

4. Resultados y discusión

A continuación, se presenta la información obtenida de los experimentos para cada área de estudio y se contrasta con el fundamento teórico. Los resultados se obtuvieron bajo las condiciones atmosféricas locales de la Tabla 3, que son el punto de partida para que los modelos matemáticos se ajusten a las condiciones locales del experimento.

Tabla 3. Condiciones atmosféricas durante el experimento

Variable	Altitud (m.s.n.m.)			
	2570	2870	2970	3070
Presión (Pa)	74028	71275	70376	69487
Temperatura (°C)	14,3	12,3	11,7	11,04
Densidad (kg/m ³)	0,897	0,869	0,861	0,8517
Viscosidad Dinámica (Pa*s)	18,08E-6	17,98E-6	17,95E-6	17,92E-6

4.1 Rendimiento de Vuelo

A partir de la adquisición de la telemetría del vuelo experimental de rendimiento, se identificó que cada una de las variables medidas presenta una frecuencia de muestreo diferente, de acuerdo con el sensor utilizado. Esta frecuencia afecta la resolución de la información e influye en su veracidad al momento de aplicar métodos estadísticos. Como parte de la metodología expuesta, se separa cada variable para identificar su frecuencia de muestreo. Los resultados promedios, máximos y mínimos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Frecuencias de muestreo de las variables

Parámetro	f_{Sp} [hz]	f_{SM} [hz]	f_{Sm} [hz]
Velocidades			
Ángulos (cabeceo/rumbo)	8	10	4
Dirección del viento			
Empuje			
Capacidad de la Batería			
Voltaje de la Batería	2	3	1
Altura			

El vuelo experimental tuvo una duración de 13 minutos desde que el modo automático fue activado, lo que permitió la adquisición de 6240 datos en promedio por variable para el primer grupo de la Tabla 4 y 1560 datos en promedio por variable para el segundo grupo de la misma tabla. Se destaca que esos datos se seccionan por etapas y se analizan por grupos para mejor claridad, lo que resulta en un extenso análisis y alto número de gráficas que se resumen a continuación.

4.2 Parámetros aerodinámicos iniciales

A partir de la simulación de la aeronave con el software XFLR5 [11], se caracteriza la curva de sustentación y la polar de resistencia aerodinámica entre un rango de número de Reynolds (Re) de 100000 a 500000, bajo las condiciones atmosféricas de la Tabla 3, con el fin de obtener los parámetros críticos de resistencia parásita de la aeronave y la eficiencia de sustentación, que son clave para los cálculos teóricos de rendimiento de vuelo (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados para la sustentación de la aeronave

Parámetro	Símbolo	Valor		Unidad
Máximo Coeficiente de Sustentación	C_{LMAX}	1,4		-
	$\alpha_{C_{LMAX}}$	11		deg.
Etapas de Crucero	C_L	0,44	0,62	-
	α	0	2	deg.
Ángulo de Ataque @ $C_L = 0$	$\alpha_{C_L=0}$	-5		deg.
Pendiente de Sustentación	$dC_L/d\alpha$	0,088		deg ⁻¹
Eficiencia de Sustentación	k	0,043		-

La obtención de la resistencia parásita obtenida de XFLR5 [11] corresponde únicamente a la contribución del ala y los estabilizadores horizontal y vertical. Para adicionar la contribución del fuselaje se utiliza el modelo empírico propuesto por Roskam [17], que tiene en cuenta la longitud del fuselaje, el diámetro máximo equivalente y el coeficiente de fricción basado en su área húmeda. La contribución individual obtenida de cada componente se muestra en la Figura 13, donde la mayor contribución se da por parte del ala y el fuselaje.

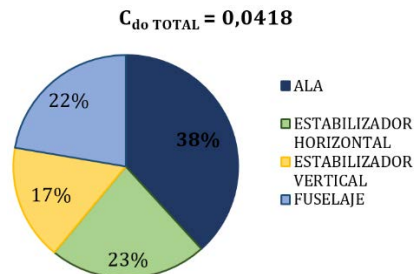


Figura 14. Contribuciones a la resistencia parásita

Por lo tanto, con la ecuación polar (30) se describe la resistencia aerodinámica total de la aeronave. Para la cual, la máxima eficiencia (C_L/C_D) es de 11,8, a 1 grado de ángulo de ataque aproximadamente.

$$C_D = 0,0418 + 0,043 C_L^2 \quad (30)$$

4.3 Altura en función del tiempo

El primer parámetro para determinar la ejecución correcta de la misión en el experimento es la altura de vuelo en función del tiempo. Al graficar esta variable se nota el cambio entre las fases de vuelo y la transición que existe entre las etapas de crucero, las cuales mantienen una altura aproximadamente constante y los ascensos o descensos que se representan como una recta inclinada de pendiente positiva y negativa, respectivamente. En la Figura 14 se muestran estos comportamientos y se hacen las divisiones por etapas, nombrando la maniobra con su inicial y un número, de acuerdo a su orden, por ejemplo, C1 para el primer vuelo de crucero, A1 para el primer ascenso o D1 para el primer descenso.

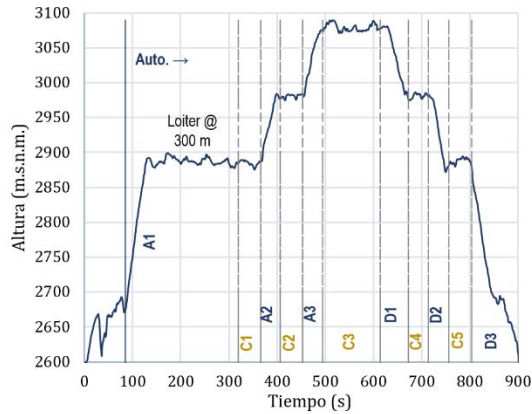


Figura 142. Altura vs. Tiempo – Fases de Vuelo

Es evidente que durante las etapas de crucero se nota un comportamiento oscilante, lo que representa que la aeronave estuvo volando de manera ascendente y descendente, debido a perturbaciones de aire que evitaron que mantuviera una altura constante. El crucero 3 es la muestra representativa con mayor cantidad de datos para analizar, en el que la aeronave se mantuvo en un rango de 10 metros en crucero. A partir de esta información se puede aproximar la maniobra con una línea de tendencia recta y a partir de su pendiente hallar las tasas de desplazamiento vertical. Este sería un método alternativo al análisis directo del parámetro de velocidad vertical que mide el piloto automático.

4.4 Mediciones durante la etapa de crucero

Es importante generar una división de la información de telemetría, no solamente por etapas sino también por la condición de vuelo de la aeronave, es decir, durante el patrón de crucero la aeronave debió realizar unos virajes para cambiar su trayectoria en 90 grados. Estos virajes se deben extraer del análisis estadístico de la etapa de crucero, porque genera mediciones en los sensores que pueden afectar la muestra, tales como variaciones en la velocidad respecto al aire, cambios en el ángulo de ataque y de banqueo y cambios en la sustentación de la aeronave. Por ello, al separar los intervalos de tiempo en que la aeronave estuvo haciendo banqueos y dejar únicamente la información para crucero, se determina el porcentaje de información útil frente al innecesario para cada crucero, como se muestra en la Figura 15.

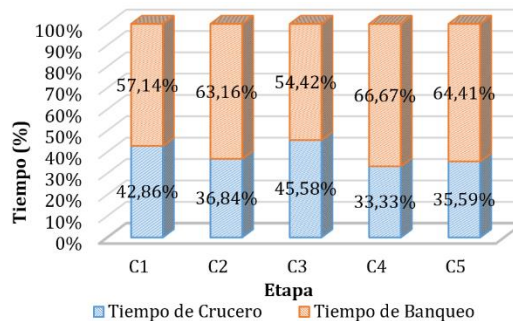


Figura 15. Porcentajes de tiempo de medición durante crucero

La aeronave dedicó parte de los cruceros a realizar banqueos y estabilizaciones para alinearse con el rumbo del trayecto luego de cada giro, lo cual reduce la cantidad de información útil de la muestra. Las condiciones de viento cruzado influyeron para que la aeronave tardará más en recuperar su vuelo recto y nivelado.

4.5 Velocidad y coeficiente de sustentación en crucero

De la variable de velocidad respecto al aire se hallan los valores promedio en crucero del experimento, los cuales se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Velocidades durante el crucero

ETAPA	$V_{p,exp}$ [m/s]	$V_{teórica}$ [m/s]	e (%)
Crucero 1	15,757	15,62	0,88
Crucero 2	15,76		0,89
Crucero 3	16,28		4,2
Crucero 4	15,73		0,7
Crucero 5	15,74		0,77

A partir de la pendiente de sustentación teórica de la aeronave, bajo la condición de vuelo en crucero a 2 grados de ángulo de ataque (incidencia del ala), se determina el coeficiente de sustentación teórico en crucero, y con la ecuación básica de sustentación se despeja la velocidad de vuelo en crucero que la aeronave debería llevar a esa condición. Los resultados teóricos para estas variables se muestran en las Tabla 6 y 7, junto con el error debido a la comparación con los datos experimentales.

Tabla 7. Coeficientes de sustentación en crucero

ETAPA	$C_{L,p,exp}$	$C_{L,teórico}$	e (%)
Crucero 1	0,59	0,616	4,2
Crucero 2	0,57		7,5
Crucero 3	0,58		5,8
Crucero 4	0,57		7,5
Crucero 5	0,56		9,1

4.6 Velocidad de pérdida y coeficiente de sustentación máxima

Para determinar la velocidad de pérdida de la aeronave desde la telemetría, se evalúa el despegue durante el lanzamiento manual. Para ello se identifica el instante preciso en el que el operario suelta la aeronave, a partir de la gráfica de altura en función del tiempo. Como se muestra en la Figura 16, la velocidad de pérdida es de 11,31 m/s, que corresponde a un coeficiente de sustentación máximo de 1,24. De acuerdo con la teoría, con el coeficiente de sustentación máximo encontrado en XFLR5 [11], de 1,4 con las condiciones atmosféricas registradas del experimento, la velocidad de pérdida corresponde a 10,36 m/s.

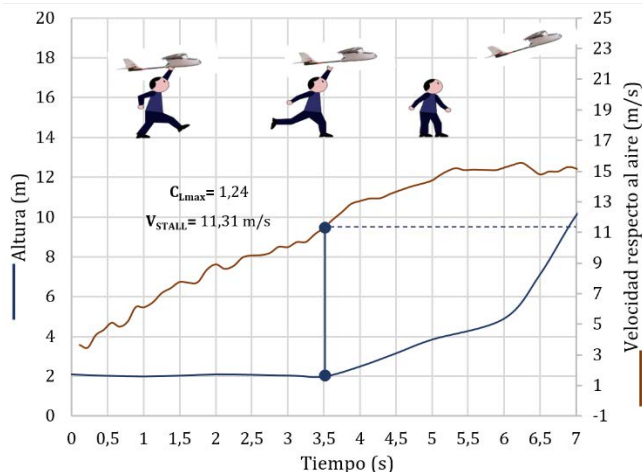


Figura 16. Altura y Velocidad durante el despegue

4.7 Diagrama V-n

Como parte de la validación teórica se presenta el diagrama V-n de maniobras y de ráfagas, donde se resumen las velocidades operativas de la aeronave en estudio, junto con la zona de pérdida donde no podría maniobrar y los límites en los cuales la integridad de su estructura podría verse afectada. Este diagrama se presenta en la Figura 17 y tiene en cuenta ráfagas de 15,24 m/s y 7,62 m/s, según la normativa de aeronaves no-tripuladas nombrada en los modelos teóricos, que genera un factor de carga límite de $n=7$. El valor de cada velocidad se presenta en la Tabla 8.

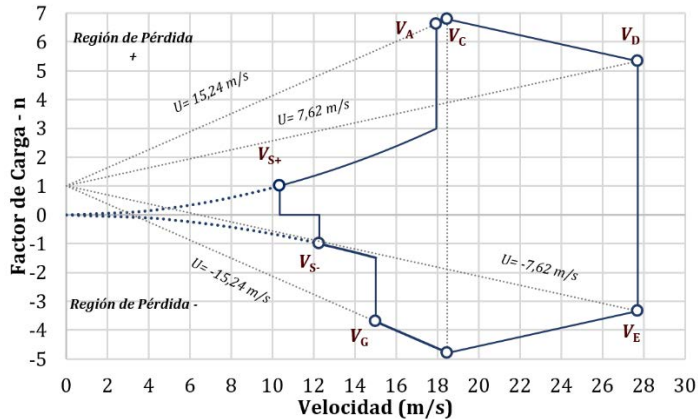


Figura 17. Diagrama V-n con ráfagas

Tabla 8. Velocidades del diagrama V-n

Velocidad	Velocidad [m/s]
V_A	17,95
V_C	15 - 22
V_D	27,72
V_G	15,02
V_{S+}	10,36
V_{S-}	12,26

4.8 Etapa de ascenso

Los ascensos que se desarrollaron durante el experimento se muestran en la Figura 18, a excepción del *loiter*. La trayectoria que describen no es completamente recta, pero su comportamiento se puede aproximar por una tendencia lineal, cuya pendiente es la tasa de ascenso.

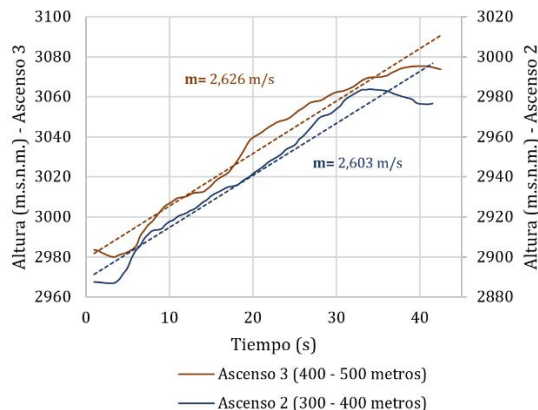


Figura 18. Altura vs. Tiempo durante A2 y A3

Para el segundo ascenso del experimento se obtuvo una tasa de 2,603 m/s y para el tercer ascenso una tasa de 2,626 m/s, a partir de la regresión. Si se mide directamente del parámetro de velocidad vertical, lo cual es el método de mayor veracidad, al encontrar el valor promedio para el segundo ascenso la tasa corresponde a 2,43 m/s y para el tercero a 2,22 m/s.

Luego de analizar el parámetro de velocidad respecto al aire en estas etapas, que en promedio es de 16,15 m/s, y conociendo la tasa de ascenso, se resuelve el triángulo de velocidades de la Figura 10 para encontrar el ángulo durante el ascenso, el cual es de 11,25 grados para la segunda maniobra y 8,03 para la tercera. Teóricamente, como la distancia horizontal es de 500 metros y la vertical de 100 metros, este valor corresponde a 11,31 grados, por lo cual el ascenso 2 tiene mejor control y menos presencia de perturbaciones que el 3, para mantener un valor más cercano. Además, de acuerdo al ángulo de 11,31 grados, el valor de la tasa de ascenso debe ser de 3,14 m/s, que difiere en un 23% de la tasa registrada durante el segundo ascenso y en un 29,3% de la tasa para el tercero. Para el caso del ascenso en *loiter* se registró la mayor tasa de ascenso del experimento, con un valor de 4,82 m/s.

4.9 Empuje y potencia requeridos

El empuje requerido por la aeronave varía de acuerdo con la resistencia aerodinámica debida a la sustentación del ala y la resistencia parásita debida a la forma del cuerpo, a la fricción resultado de los efectos viscosos del aire y a la interferencia entre los componentes de la aeronave [18].

Del diagrama de empuje requerido en función de la velocidad para la aeronave (ver Figura 19), se determina que el mínimo empuje requerido es de 2,41 N, que se da a la eficiencia máxima de 11,8 cuando se vuela a una velocidad respecto al aire de 12,35 m/s. Este valor es muy cercano a la velocidad de pérdida por lo cual resulta arriesgado volar a la condición de la mayor eficiencia aerodinámica. Como se describe en los modelos teóricos, para una aeronave propulsada por hélice resulta mejor evaluar la potencia en lugar del empuje. Cuando se caracteriza la potencia de la USB-Aero resulta que la velocidad para la mínima potencia requerida, correspondiente a la máxima eficiencia $C_L^{3/2}/C_D$, es de 9,38 m/s, un valor menor a la velocidad de pérdida con una potencia de 26,14 W. Por lo cual, teóricamente esta condición de vuelo no es posible de alcanzar.

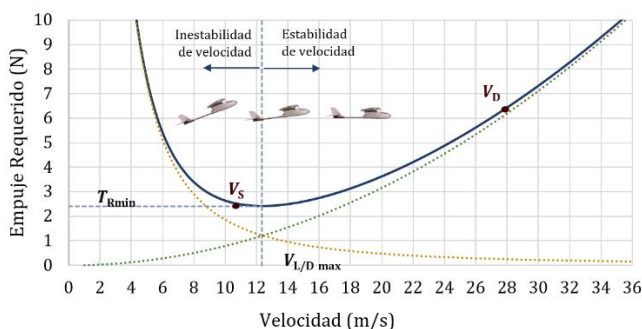


Figura 193. Empuje requerido vs. Velocidad

4.10 Empuje disponible y relación T/W

Cuando se analiza el rendimiento de vuelo de una aeronave, es fundamental evaluar el comportamiento del parámetro de empuje del motor. La fuerza que ejerce la planta motriz para vencer la componente de resistencia aerodinámica varía de acuerdo al ángulo de ataque y a la de altura de la aeronave en la etapa de vuelo en la que se encuentre. De

acuerdo con Hepperle [19], se debe establecer una cadena de eficiencia debido a que la energía, almacenada inicialmente, se debe transformar en potencia propulsiva y esto involucra varios pasos de conversión, que se ven afectados por pérdidas que se expresan por eficiencias individuales. Para el caso de la propulsión eléctrica del presente estudio, la cadena inicia con el almacenamiento en la batería hasta que la rotación de la hélice brinde la energía de salida. La cadena de eficiencias se muestra en la Figura 20, donde se destaca la eficiencia global del sistema.



Figura 20. Cadena de eficiencias del sistema propulsivo

Con base en la telemetría del experimento, a partir de las 860 revoluciones por voltio que entrega el motor usado durante las pruebas, se filtra la variable de voltaje de la batería para las diferentes etapas de estudio, se halla el voltaje promedio por maniobra y se caracteriza el valor teórico de revoluciones por minuto de la hélice para cada una de ellas. El rango de revoluciones por minuto teórico está entre 12831 r.p.m. y 13313 r.p.m. y el voltaje entregado supera los 14.8 voltios, por lo cual, se requiere traducir esta información a términos de empuje. La hélice APC 11x8 usada por la aeronave cuenta con valores de empuje dinámicos a nivel del mar, dados por coeficientes aerodinámicos adimensionales de potencia, de empuje y la relación de avance; todos ellos dependen de las revoluciones por segundo, el diámetro de la hélice y la velocidad de vuelo de la aeronave [20]. Por esto es que se decide caracterizar el empuje dinámico entre un rango de 9000 r.p.m. a 14000 r.p.m. y graficarlo como se muestra en la Figura 21, para el intervalo de velocidades de operación de la aeronave en estudio.

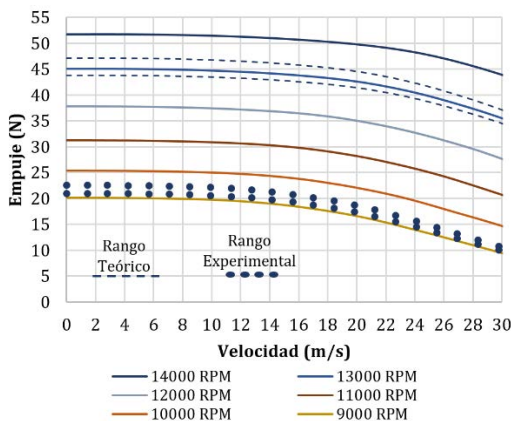


Figura 21. Empuje en función de la velocidad para rango de RPM con la hélice APC 11X8

Con el objetivo de conocer el valor de empuje correspondiente a cada una de las revoluciones por minuto teóricas cuando la velocidad de la aeronave es cero, se decide implementar una técnica de interpolación lineal entre los valores de empuje estático dentro del rango de 12000 r.p.m. a 14000 r.p.m. Luego, se determina la eficiencia del sistema propulsivo (67,4%) y cada empuje obtenido se reduce en una proporción de 0,326, que representa las pérdidas en condiciones de nivel del mar. Para terminar con la obtención del empuje estático, conociendo que la densidad a nivel del mar es de 1,225 kg/m³ y que la densidad presente en el experimento fue de 0,87 kg/m³, se corrigen los datos de empuje con una disminución del 29,1%.

El rango real de revoluciones por minuto para el experimento, teniendo en cuenta la eficiencia y la densidad real de operación, se representa en la Figura 21 con la línea de

círculos y se compara con el rango teórico representado por la línea punteada. Se logra identificar que las condiciones de operación reales reducen el empuje calculado en más de la mitad. Como cada una de las etapas se realizó a velocidades de operación diferentes mayores a cero, es correcto determinar el empuje experimental que corresponde a cada una de ellas, porque el empuje estático solamente es un referente, para luego encontrar la relación empuje-peso de cada etapa. Los valores de empuje experimental hallados a partir de este método, corresponden al 100% de empuje de acuerdo con la escala que ofrece la telemetría. Por lo tanto, el 100% difiere entre etapas de acuerdo a la velocidad de operación y al voltaje que entrega la batería, el cual va disminuyendo a medida que se descarga. En promedio, la planta motriz estuvo generando 6,53 N durante las etapas de crucero, 9,33 N durante las de ascenso y 1,85 N durante las etapas de descenso.

Para visualizar mejor esta información, el empuje disponible de la aeronave se expresa en términos de la relación empuje-peso para cada una de las etapas, como se muestra en la Figura 22. Es evidente que las mayores relaciones de empuje-peso se dan durante los ascensos y las menores durante los descensos, mientras que en etapa de crucero se mantiene en un valor promedio de 0,23.

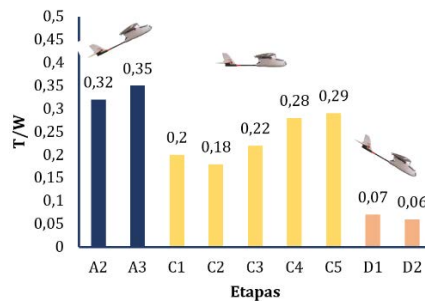


Figura 224. Relación Empuje-Peso para cada Etapa

4.11 Factor de carga en banqueo

Para determinar el factor de carga de la aeronave durante el banqueo, se requiere analizar el parámetro de ángulo de banqueo en función del tiempo. Durante los trayectos de crucero se presentan algunas variaciones en este ángulo debido a las perturbaciones del viento, pero la muestra representativa que se analiza es la correspondiente a cada uno de los giros efectuados para cambiar el rumbo y dar continuidad al patrón rectangular. De la información obtenida en la telemetría, también se identifica el ángulo de banqueo máximo, que es el parámetro crítico que debe ser comparado con su equivalente teórico, porque representa el máximo factor de carga que debería soportar la aeronave a nivel estructural. En la Tabla 9 se muestran los resultados promedio y máximos para este factor con sus respectivos ángulos de inclinación.

Tabla 9. Ángulos de banqueo y factor de carga

Banqueos	ϕ_p (°)	n_b	ϕ (°) (max)	$n_{b_{max}}$
C1	24,02	1,095	52,64	1,65
C2	23,81	1,093	49,36	1,53
C3	22,99	1,086	55,63	1,77
C4	21,06	1,072	54,21	1,71
C5	24,59	1,099	52,38	1,64

En los giros, el máximo factor de carga registrado fue de 1,77. Los factores de carga más altos se presentan cuando la aeronave realiza los banqueos hacia la izquierda para iniciar los giros de 90 grados, luego, mientras trata de volver a su trayectoria recta, el factor de

carga disminuye secuencialmente hasta mantenerse en valores bajos, en un rango de ± 10 grados. Como el objetivo es identificar el valor crítico, se toma toda la información del vuelo, tanto manual como automática, y se identifica que, previo al ascenso en *loiter*, el piloto automático vira el avión a un ángulo de 75,72 grados, lo que genera un factor de carga de 4,05, convirtiéndose en el mayor del experimento.

Al analizar teóricamente la ecuación del factor de carga máximo en banqueo, se obtiene un resultado de $n=4,12$ a una velocidad de 16 m/s y con un T/W máximo de 0,5, lo que indica que la aeronave estuvo en una condición de posible fatiga estructural.

4.12 Dinámica de Vuelo

Teniendo como referencia la geometría del fuselaje de la aeronave y cada una de las secciones que se estudió, como se muestra en la Figura 23, se obtiene un resultado para la constante de masa aparente representado en la ecuación (31).

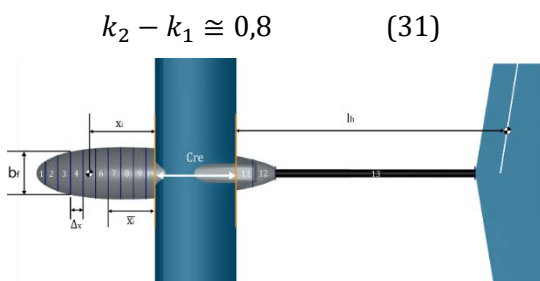


Figura 23. Secciones del fuselaje

Después de obtener la constante de masa aparente, se divide el fuselaje en 13 secciones: 10 por delante del borde de ataque y 3 por detrás del borde de fuga, como se muestra en la Figura 23. Para la sección del fuselaje que comprende el ala, se asume que no contribuye al momento de cabeceo, dado que su ángulo local de ataque es constante y a que $(\partial \epsilon_u / \partial \alpha)$ es igual a cero. Posteriormente, se analiza cada sección del fuselaje por separado para determinar los valores de: 1) ancho del fuselaje (b_f), 2) distancia del borde de ataque del ala al inicio de cada sección (\bar{X}_i), 3) efecto de aguas arriba o aguas abajo ($\partial \epsilon_u / \partial \alpha i$), 4) distancia del borde de ataque al centroide de cada sección (X_i), 5) efecto de aguas arriba o aguas abajo corregido $(\partial \epsilon_u / \partial \alpha i)_{corregido}$ y 6) el ángulo de incidencia ($i_{CL,b}$). Los valores calculados para secciones delanteras y traseras del fuselaje corresponden a los valores teóricos, con los que se determina que para la corriente aguas arriba $\frac{\partial \epsilon_u}{\partial \alpha} > 0$ y para la corriente aguas abajo $\frac{\partial \epsilon_u}{\partial \alpha} < 0$. A partir de los valores encontrados para cada sección, se calculó el valor de $Cm_{\alpha f}$ y el de Cm_{0f} con las ecuaciones (31) y (32).

$$Cm_{0f} = 0,002048 \quad (31)$$

$$Cm_{\alpha f} = 0,1507 \text{ 1/rad} \quad (32)$$

Para hallar la contribución total del fuselaje a la estabilidad longitudinal estática se aplica la ecuación (33).

$$Cm_f = 0,002048 + 0,1507 \cdot \alpha \quad (33)$$

La ecuación (33) se expresa en términos del ángulo de ataque, porque éste varía en el vuelo y no puede ser constante por perturbaciones causadas debido a ráfagas de viento o movimientos en el elevador. Para una etapa de vuelo recto y nivelado, con un ángulo de ataque de 0 grados, la aeronave cuenta con un ángulo de incidencia en las alas de 2 grados, entonces, la contribución total del fuselaje a la estabilidad longitudinal estática es de

0,007308. Sin embargo, si el ángulo varía, también lo hará la contribución, alcanzando un valor máximo de 0,00999 a los 3 grados.

Para la contribución de las alas hay que tener en cuenta parámetros como que la relación de aspecto expuesta es de 7,27, además, al tener una velocidad de crucero de 17m/s, el Mach experimentado por la aeronave es de 0,050. Así, el coeficiente de sustentación para el ala expuesta es $C_{L\alpha exp} = 0.080 \text{ deg}^{-1}$ y el coeficiente de sustentación cuando el ángulo de ataque es 0 grados es $C_{L0} = 0.403$; por su parte, el coeficiente de sustentación para el ala es $C_{L,w} = 0.564$ y el margen estático de la aeronave encontrado es $\bar{x}_\alpha = 0,137$. Una vez obtenidos estos parámetros, se puede decir que la contribución del ala a la estabilidad longitudinal de la aeronave resulta de la ecuación (34).

$$C_{m,w} = 0,0776 \quad (34)$$

Del mismo modo, para la contribución del estabilizador horizontal la relación de aspecto será de 3.443, la pendiente de sustentación de $a_T = 3,603 \text{ rad}^{-1}$, el efecto de aguas abajo influyente de $d\epsilon/d\alpha = 0.3084$ y el ángulo será de $\epsilon = 0,6168 \text{ deg}$. Posteriormente, se calcula el valor de la variación del coeficiente de sustentación del estabilizador horizontal con respecto al coeficiente de sustentación de la aeronave $dC_{LT}/dC_L = 0.5428$ y el coeficiente de sustentación del estabilizador horizontal es $C_{LT} = 0.0869$, además, el coeficiente de arrastre parásito tiene un valor de $C_{Dow} = 0,016$. Por otra parte, el coeficiente volumétrico del estabilizador horizontal es de $V_{HT} = 0.652$ y la relación entre las presiones dinámicas del estabilizador y del ala se usan para calcular la presión dinámica en el estabilizador horizontal, siendo de $\eta_T = 0.9167$. Con estos datos, se observa que el coeficiente de momento de la cola, que afecta la estabilidad longitudinal estática, resulta de la ecuación (35).

$$C_{mT} = -0.052 \quad (35)$$

Por último, para el cálculo de la estabilidad estática longitudinal, hay que hallar el coeficiente de momento con respecto al coeficiente de sustentación del fuselaje, $(dC_m/dC_L)_f = 0.033$, y también esa misma relación para el avión $dC_m/dC_L = -0,1539$. Con un punto neutro de $N_O = 0,541475$, el margen estático de la aeronave es de $H_N = 0,1539$, y al ser este un valor positivo indica que la aeronave es estable. Con base en estos valores se calcula el coeficiente de momento total con respecto al centro de gravedad, teniendo en cuenta la condición de crucero donde aeronave volaría con un ángulo de ataque de 2 grados (ecuación (36)).

$$C_{mcg} = 0,0329 \quad (36)$$

También se puede determinar que dado que el coeficiente de sustentación $C_L = 1,418$ es mayor a 1.4 (el máximo coeficiente de sustentación), la aeronave no es controlable. El resultado de todo el análisis es el diagrama de *trim*, donde se relaciona el coeficiente de momento de la aeronave con respecto al ángulo de ataque de esta misma. Además, se evalúan diferentes posiciones para el centro de gravedad para determinar la estabilidad de la aeronave mediante la gráfica.

Como se observa en la Figura 24, x_{cg1} es la posición más delantera para el centro de gravedad, la cual corresponde al coeficiente de sustentación cuando el coeficiente de momento es igual a cero, x_{cg2} es la posición del centro de gravedad en el 30% de la cuerda del perfil alar y x_{cg3} es la posición del centro de gravedad cuando el coeficiente de sustentación es el máximo, en esta última condición, a pesar de tener una aeronave estable, se encuentra el límite para la posición del centro de gravedad, que cuando se

excede la aeronave entra a condición de inestabilidad. Además, en el diagrama de *trim* se puede observar una línea recta punteada, la cual representa el punto neutro de la aeronave; es en este momento cuando no hay variación del coeficiente de momento.

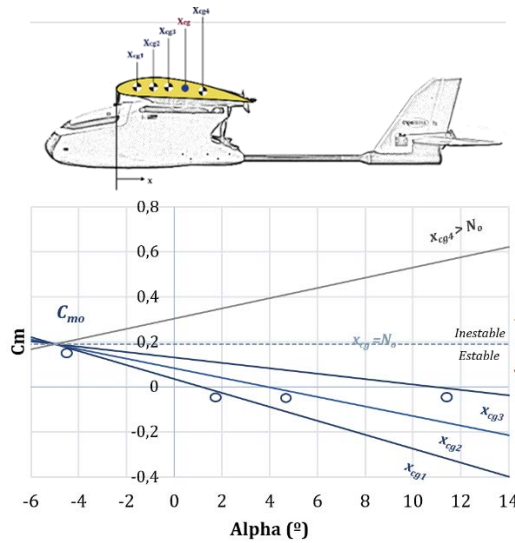


Figura 245. Diagrama de *Trim* – Cm vs. α

Por último, para que la aeronave tenga un coeficiente de momento igual a cero, volando con un centro de gravedad ubicado dentro de los límites permitidos, es necesario tener un ángulo de ataque específico determinado por el punto de corte de cada una de las condiciones mencionadas anteriormente con el eje de las abscisas, este punto de corte se conoce como *trim*, el cual representa una condición de vuelo con un coeficiente de momento igual a cero. Además, la estabilidad de la aeronave fue simulada en XFLR5 [11], ubicando las masas de cada componente como se muestra en la Figura 25, con una condición única de la posición del centro de gravedad al 30% de la cuerda (x_{cg2}).

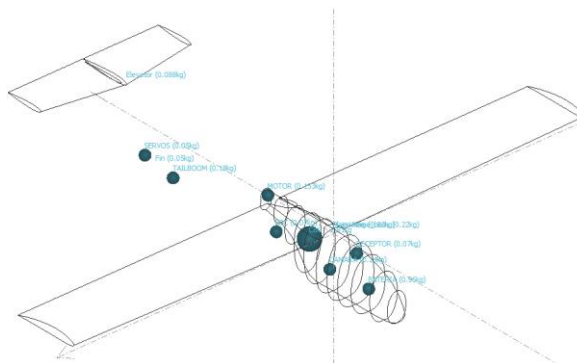


Figura 25. Masas de los componentes en XFLR5

La comparación de los datos con los encontrados previamente de manera teórica se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Comparación de datos a X_{cg2}

Variable	Teórico	XFLR5
$C_{m\alpha}$	-0,0212	-0,02345
$C_{L\alpha,w}$	0,08	0,0898
dC_m/dC_L	-0,241475	-0,2206
N_0	0,541475	0,65225

5. Conclusiones

Las mediciones de velocidad en crucero registradas de la telemetría presentan un error del 1,5 %, comparadas con el valor de velocidad de crucero hallado teóricamente. Lo cual ratifica los datos de coeficiente de sustentación cuando la aeronave vuela a un ángulo de ataque igual a su ángulo de incidencia. Por otra parte, la velocidad de pérdida registrada durante el despegue de la aeronave varía en 8,4% del valor teórico, error que puede estar dado por las condiciones inestables y poco controladas en las que el operario lanzó la aeronave.

Se identifica que en condiciones de operación reales se logra reducir el empuje calculado en más de la mitad. En promedio, el motor produce el 33% de su potencia máxima durante las etapas de crucero, el 48,5% durante las etapas de ascenso y el 9,3% durante los descensos. El motor genera mayor empuje en los momentos en que requiere realizar los ascensos y cuando se encuentra en los trayectos que presentan viento en contra. Para un ascenso, la componente vertical de la sustentación del ala se reduce y la resistencia aerodinámica aumenta, por lo cual, para mantener la aeronave en un ascenso nivelado, porque su peso no está variando y su vector apunta siempre hacia el centro de la tierra, se requiere que el motor compense esa pérdida con un aumento de potencia. En cambio, durante los descensos, el motor tuvo menos intervención, con los valores más bajos registrados: 1,85 N en promedio.

El factor de carga crítico durante el banqueo registrado en la telemetría varía en un porcentaje de 1,7% del calculado teóricamente, por lo cual, la aeronave durante el experimento estuvo volando bajo una condición que pudo afectar su integridad estructural.

Los porcentajes de error para los datos de estabilidad estática longitudinal, obtenidos de manera teórica, comparados con el análisis realizado en XFLR5 [11] fueron los siguientes: coeficiente de momento con respecto al ángulo de ataque ($C_{m\alpha}$), con un error de 9,6%, coeficiente de sustentación respecto al ángulo de ataque del ala ($C_{L\alpha,w}$), con error de 10,9%, margen estático (dC_m/dC_L), con un error de 8,65%, y el punto neutro tuvo un error de 16,9%. Cada uno de estos porcentajes de error se deben, principalmente, a que en XFLR5 no se tiene en cuenta el fuselaje para el análisis. Por otra parte, mediante el diagrama de *trim* de la aeronave, es evidente que la estabilidad longitudinal estática incrementa si el centro de gravedad se encuentra en una posición hacia delante, dentro de los rangos permitidos. Por otra parte, si este centro de gravedad se encuentra hacia atrás, la estabilidad longitudinal estática disminuirá. Finalmente, gracias al margen estático de 0,1539 se puede decir que la aeronave es longitudinalmente estable, porque se trata de un valor positivo, además, teniendo en cuenta el valor del punto neutro y la longitud de la cuerda del ala, se determina la posición más trasera del centro de gravedad, que es de 0,129 m con respecto al borde de ataque del ala.

Las demás conclusiones del proyecto, referentes al análisis experimental de dinámica de vuelo, están en curso ya que aún falta el desarrollo de vuelos experimentales.

Debido a las perturbaciones por ráfagas de viento durante el experimento, fue difícil para la aeronave volar en forma recta y nivelada, lo que influye en los resultados, porque en la mayoría de instantes de tiempo presentó ángulos de ataque mayores o menores y no mantuvo los 2 grados de incidencia. Debido a las perturbaciones del aire, la aeronave no logra mantener altura constante durante crucero, pero por las correcciones del elevador se mantiene oscilando dentro de un rango de alturas de 10 metros. Por otra parte, las longitudes de los trayectos del patrón de crucero resultaron ser cortas para la adquisición

de mediciones, porque la aeronave tardó mucho tiempo en estabilizarse durante los virajes, por lo cual se recomienda aumentar la longitud del patrón de vuelo para un muestreo más efectivo.

Agradecimientos

Este trabajo es resultado de un proceso de investigación en la Universidad de San Buenaventura de Bogotá, Colombia. Fue posible gracias al trabajo de investigación de estudiantes, docentes y egresados del programa de Ingeniería Aeronáutica, que han sido el eje principal del desarrollo, mediante proyectos de grado enfocados al desarrollo de vehículos aéreos no-tripulados. En primer lugar, queremos agradecer a los integrantes del Grupo de Investigación AeroTech y al Semillero de Aeronaves No-Tripuladas (SANT), quienes hicieron posible que este proyecto se hiciera realidad. También queremos expresar nuestra gratitud a la Universidad de San Buenaventura, que hace posible el desarrollo y la financiación de proyectos y laboratorios afines.

Referencias

- [1] Lam, T. (2009). *Aerial Vehicles*. Rijeka: InTech.
- [2] Gundlach, J. (2012). *Designing Unmanned Aircraft Systems: A Comprehensive Approach*. AIAA Education Series. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [3] Jimenez, P. & Agudelo, D. (2015). *Validation and Calibration of a High Resolution Sensor in Unmanned Aerial Vehicles for Producing Images in the IR Range Utilizable in Precision Agriculture*. Florida: AIAA SciTech.
- [4] Caughey, D. (2011). *Introduction to Aircraft Stability and Control- Course Notes for M&AE 5070*. New York: Cornell University.
- [5] Yechout, T. et al. (2003). *Introduction to aircraft flight mechanics*. Virginia: AIAA Education Series. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [6] Herrera, S., Monroy, F. & Rodríguez, L. (2015). *Análisis de Estabilidad y Control del Vehículo Aéreo No Tripulado USB-Agro*. Bogotá: Universidad de San Buenaventura.
- [7] Bordelon, L. (2006). *Design of Experiments Applied to Flight Testing*. In *Mission Systems Engineering*. Educational Notes RTO-EN-SCI-176, NATO.
- [8] Tucker, A. (2012). *Safety, Efficacy, and Efficiency: Design of Experiments in Flight Test*. 56th Annual Symposium of Society of Experimental Test Pilot. Anaheim, USA.
- [9] Klein, V. & Morelli, E. (2006). *Aircraft System Identification: Theory and Practice*. Virginia: AIAA Education Series. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [10] Herrera, S., Monroy, F. & Rodríguez, L. (2015). *Análisis de Estabilidad y Control del Vehículo Aéreo No Tripulado USB-Agro*. Bogotá: Universidad de San Buenaventura.
- [11] García, J. & Roncero, S. (2013). *XFLR5 Manual de iniciación*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- [12] CASA (2000). *Design Standards: Unmanned Aerial Vehicles – Aeroplanes*. Civil Aviation Safety Authority Australia.
- [13] Jimenez, P. (2013). *Structural Design of a Composite Wing Structure*. Germany: Lap Lambert Academic.
- [14] Anderson, J. (1999). *Aircraft Performance and Design*. USA: McGraw Hill.
- [15] Pamadi, B. (2004). *Performance, Stability, Dynamics, and Control of Airplanes*. Virginia: AIAA Education Series. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [16] Agudelo, D. & Jiménez, P. (2013). *Metodología de diseño de aeronaves no tripuladas: Teoría y Fundamentos*. España: Editorial Académica Española.
- [17] Roskam, J. & Lan, C (1997). *Airplane Aerodynamics and Performance*. Kansas: DAR Corporation.
- [18] Gudmundsson, S. (2014). *General Aviation Aircraft Design: Applied Methods and Procedures*. Massachusetts: Elsevier.
- [19] Hepperle, M. (2013). *Electric Flight – Potential and Limitations*. Germany: DLR Center.
- [20] McCormick, B. (1995). *Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics*. New York: Wiley.

15. Sistema de control simulado para mantener la trayectoria de un cohete balístico atmosférico no-teledirigido

Angélica Rincón C.
 Yesid Parra R.
 José Urrego P.

Universidad de San Buenaventura. Bogotá, Colombia.

1. Introducción

Tras la fase de impulso, un cohete sigue una trayectoria determinada de acuerdo con la misión para la que fue diseñado. Pero, en el espacio aéreo en el cual se desplaza el cohete, no siempre se encontrarán las condiciones esperadas para un vuelo normal y sin complicaciones, es decir, es probable que se produzcan condiciones ambientales que entorpezcan la misión. Estas condiciones están ligadas a fenómenos tales como ráfagas o vientos cortantes, que pueden causar el desvío de la trayectoria o rumbo del cohete. Esta desviación se puede evidenciar en grados, por ejemplo, un cohete con aletas estáticas puede desviarse hasta cierto grado en donde las aletas lo logran estabilizar. Pero pueden existir situaciones en las que las desviaciones sean mayores, como cuando superan aproximadamente los 15 grados con respecto al eje de la trayectoria. Si esto sucede, el cohete perderá el control, entrará en pérdida y por consiguiente se precipitará, terminando la misión en un total fracaso, generando atrasos en la investigación u objetivo del lanzamiento, lo mismo que pérdidas de altas sumas de dinero.

Por esto es que este proyecto hace referencia a la simulación de un sistema de control activo para un cohete atmosférico, no-teledirigido, con el objetivo de evitar los problemas mencionados. De acuerdo con las características de los cohetes, poseen 3 ejes de movimiento: guiñada, alabeo y cabeceo. En este caso se escogió el eje de cabeceo, encargado del movimiento de cabeceo del cohete. Como resultado de la simetría de Y y Z, tal como se aprecia en la Figura 1, viendo el cohete desde el eje longitudinal, la función de transferencia que se va a realizar para el control del eje de cabeceo también se puede usar para el control del eje de guiñada.

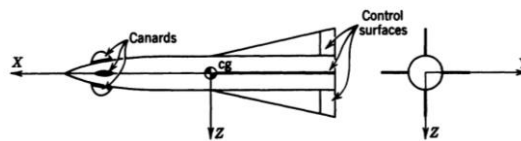


Figura 1. Esquema de un misil aerodinámico y sus ejes

A partir de ecuaciones diferenciales lineales e invariantes en el tiempo, se modeló el sistema de control activo y se generó una función de transferencia que, por medio de *Simulink*® una plataforma de *Matlab*®, se puede modelar y simular sistemas dinámicos. El proceso de simulación en *Simulink*® posee dos fases: la primera se refiere al diseño del modelo de acuerdo con las especificaciones de la planta y la segunda es el análisis del modelo junto con el controlador que estabilizará el sistema en su eje de cabeceo. De acuerdo con los resultados de la simulación se obtuvo diagramas donde se puede observar la respuesta del sistema respecto al tiempo.

2. Análisis dinámico del sistema

Las fuerzas que actúan en un cohete son la sustentación, el arrastre y el empuje. La primera es la resultante de la fuerza aerodinámica y debe ser perpendicular al viento

relativo; el arrastre también es el resultante de la fuerza aerodinámica, pero es paralelo al viento relativo y es producido por la fuerza de presión y la fuerza de fricción que actúan en la superficie; y el empuje es la fuerza generada por la expulsión de gases de la cámara de combustión [1]. La Figura 2 hace referencia a los ejes X, Y, Z y a los movimientos del cohete P, Q y R, que son alabeo, cabeceo y guiñada, respectivamente [2]. Para el periodo de análisis se asume que el cohete balístico tiene una masa constante y es considerado como un cuerpo rígido.

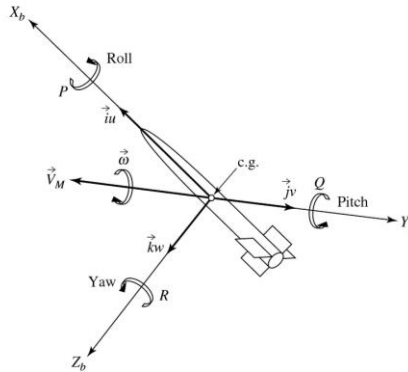


Figura 2. Grados de libertad del cohete [2]

2.1 Desarrollo de las ecuaciones de movimiento

El movimiento del cohete se rige bajo la segunda ley de Newton, que declara que la suma de todas las fuerzas externas que actúan en un cuerpo deben ser igual a la tasa de cambio de su *momentum* (ecuación (1)), y que la suma de los momentos externos que actúan en un cuerpo deben ser igual a la tasa de cambio de su *momentum* angular (ecuación (2)). Las tasas de cambio son tomadas respecto a un espacio inercial [1].

$$\sum F = \frac{d}{dt} (mV_T) \Big|_I \quad (1)$$

$$\sum M = \frac{dH}{dt} \Big|_I \quad (2)$$

Para el análisis se debe asumir que la masa del cohete permanece constante durante el vuelo por ser un cuerpo rígido y la tierra se toma como referencia inercial. De acuerdo con la ecuación (1), se derivan las ecuaciones (3), (4) y (5), que corresponden a las ecuaciones del movimiento lineal en los ejes X, Y y Z.

$$\sum \Delta F_x = m(\dot{U} + WQ - VR) \quad (3)$$

$$\sum \Delta F_y = m(\dot{V} + UR - WP) \quad (4)$$

$$\sum \Delta F_z = m(\dot{W} + VP - UQ) \quad (5)$$

Donde V y W son las componentes de la velocidad lineal y P, Q y R son los componentes de la velocidad angular, que se toman respecto del eje de referencia, que es la tierra. Las ecuaciones (6), (7) y (8), de movimiento angular, se derivan de la ecuación (2).

$$\sum \Delta \ell = \dot{P}I_x - \dot{R}J_{xz} + QR(I_z - I_y) - PQJ_{xz} \quad (6)$$

$$\sum \Delta \mathcal{M} = \dot{Q}I_y + PR(I_x - I_z) - (P^2 - R^2)J_{xz} \quad (7)$$

$$\sum \Delta \aleph = \dot{P}I_z - \dot{P}J_{xz} + PQ(I_y - I_x) + QRJ_{xz} \quad (8)$$

De acuerdo con esto, es necesario determinar seis ecuaciones de movimiento simultáneas para describir completamente el comportamiento del cohete. En algunos

casos se pueden hacer ciertas asunciones para dividir las en dos grupos de tres ecuaciones simultáneas (ecuaciones (9), (10) y (11)). Para estos análisis se debe considerar el cohete en un vuelo recto y sin aceleración, para luego ser distorsionado por la deflexión del elevador. De acuerdo con la Figura 3, la deflexión del elevador en el eje OY genera un momento de cabeceo en este mismo eje y, a causa de esto, se generan cambios en las fuerzas F_x y F_z . Esto no genera momento de rotación ni de guiñada, por lo tanto, no hay cambios en F_y y, por ende, se descartan $P=R=V=0$ y $\sum \Delta F_y$, $\sum \Delta \ell$, y $\sum \Delta \mathcal{R}$.

$$\sum \Delta F_x = m(\dot{U} + WQ) \quad (9)$$

$$\sum \Delta F_z = m(\dot{W} - UQ) \quad (10)$$

$$\sum \Delta \mathcal{M} = m(\dot{W} - UQ) \quad (11)$$

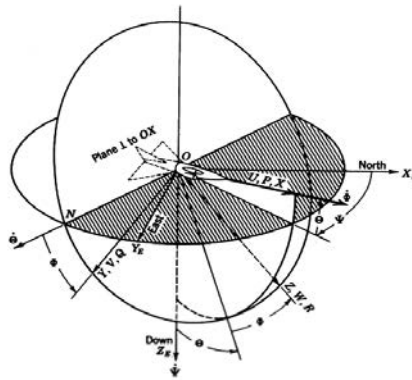


Figura 3. Diagrama de ejes para un cohete

2.2 Ecuaciones de movimiento longitudinal

Es necesario expandir las ecuaciones de fuerzas y momentos aplicados y expresarlas en los cambios de estas mismas a causa de las perturbaciones, para lo que se aplican las ecuaciones (12), (13) y (14).

$$\left(\frac{mU}{sq} \dot{u} - C_{xu} u\right) + \left(-\frac{c}{2U} C_{x\dot{\alpha}} \dot{\alpha} - C_{x\alpha} \alpha\right) + \left[-\frac{c}{2U} C_{xq} \dot{\theta} - C_w(\cos\theta)\theta\right] = C_{Fxa} \quad (12)$$

$$-(C_{zu} u) + \left[\left(\frac{mU}{sq} - \frac{c}{2U} C_{z\dot{\alpha}}\right) \dot{\alpha} - C_{z\alpha} \alpha\right] + \left[\left(-\frac{mU}{sq} - \frac{c}{2U} C_{zq}\right) \dot{\theta} - C_w(\sin\theta)\theta\right] = C_{Fza} \quad (13)$$

$$(-C_{mu} u) + \left(-\frac{c}{2U} C_{m\dot{\alpha}} \dot{\alpha} - C_{m\alpha} \alpha\right) + \left(\frac{I_y}{sqc} \ddot{\theta} - \frac{c}{2U} C_{mq} \dot{\theta}\right) = C_{ma} \quad (14)$$

Estas ecuaciones asumen que:

- Los ejes X y Z recaen en el plano de simetría y el origen del sistema de ejes está en el centro de gravedad del cohete.
- La masa del cohete es constante.
- El cohete se asume como cuerpo rígido.
- La tierra es la referencia inercial.
- Las perturbaciones en el equilibrio son pequeñas.

Para la solución de las ecuaciones de movimiento es necesario obtener inicialmente la solución de la ecuación homogénea: $C_{ma} = C_{Fza} = C_{Fxa} = 0$. Tomando la transformada

de Laplace de la ecuación (6) y despreciando $C_{x\dot{\alpha}}$, C_{xq} y C_{mu} se obtienen las ecuaciones (15), (16) y (17).

$$\left(\frac{mU}{sq} - C_{xu}\right) 'u(s) - C_{x\alpha} ' \alpha(s) - C_w(\cos\theta)\theta(s) = 0 \quad (15)$$

$$-C_{zu} 'u(s) + \left[\left(\frac{mU}{sq} - \frac{c}{2U} C_{z\dot{\alpha}}\right) s - C_{z\alpha}\right] ' \alpha(s) + \left[\left(-\frac{mU}{sq} - \frac{c}{2U} C_{zq}\right) s - C_w(\sin\theta)\right] \theta(s) = 0 \quad (16)$$

$$\left(-\frac{c}{2U} C_{m\dot{\alpha}} s - C_{m\alpha}\right) ' \alpha(s) + \left(\frac{I_y}{sqd} s^2 - \frac{c}{2U} C_{mq} s\right) \theta(s) = 0 \quad (17)$$

2.3 Aproximación de periodo corto

La aproximación de periodo corto se toma cuando se asume una velocidad constante hacia adelante, es decir, cuando $'u=0$, por lo tanto, no existen cambios en las fuerzas que se generan en esta dirección porque no hay cambio de velocidad. Al eliminar la ecuación de movimiento en el eje X de la ecuación (7), se origina las ecuaciones (18) y (19).

$$\left(\frac{mU}{sq} - C_{z\alpha}\right) \alpha(s) + \left(-\frac{mU}{sq} - C_w \sin\theta\right) \theta(s) = C_{z\delta e} \delta_e \quad (18)$$

$$\left(-\frac{d}{2U} C_{m\dot{\alpha}} s - C_{m\alpha}\right) \alpha(s) + \left(\frac{I_y}{sqd} s^2 - \frac{d}{2U} C_{mq} s\right) \theta(s) = C_{m\delta e} \delta_e \quad (19)$$

2.4 Caracterización del cohete

En esta investigación se trabajó con el cohete Ainkka V, construido por la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá. Para este análisis se tomó en cuenta la tercera etapa, que se muestra en las Figuras 4 y 5.

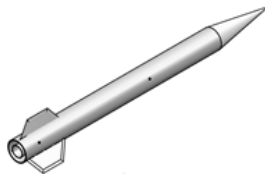


Figura 4. Modelo en Catia V5 del Cohete etapa Ainkka V, tercera etapa.



Figura 5. Modelo físico del Cohete etapa Ainkka V, tercera etapa.

En las Tabla 1 se muestran los parámetros que conforman el diseño del cohete y en la Tabla 2 los parámetros de la aleta. De igual forma, se tomó en cuenta las condiciones del ambiente donde se va a realizar el lanzamiento: base de Marandua, Vichada Colombia, donde la temperatura promedio es de 25°C, un espacio semidesértico y despoblado, perfecto para este tipo de actividades. Para simular el vuelo del cohete fue necesario utilizar Rocksim V9.1.3®, un programa informático que permite diseñar cualquier tipo de cohete y simular su vuelo, para ver qué tan alto y rápido puede volar; esto con el fin de analizar si el modelo va a ser estable y seguro para ponerlo en marcha. Además, evaluar si cumple con los criterios de peso, velocidad y altura deseados [3].

Tabla 1. Dimensiones generales del cohete

Peso total cohete	5,56	Kg
Largo de tubo	0,87	m
Diámetro de tubo	0,082	m
Material del tubo	PVC	-
Largo de ojiva	0,22	m
Material de la ojiva	Madera	-
Largo total	1,09	m
Envergadura	0,2	m

Tabla 2. Dimensiones de la aleta

Cuerda de raíz	0,165	m
Cuerda de punta	0,09	m
Envergadura de aleta	0,06	m
Área	0,0255	m ²
Espesor	0,003	m
Material	Aluminio	Al I050

Para la primera fase en Rocksim V9.1.3®, se realiza el diseño de cada una de las secciones que componen el cohete. Se empieza por la nariz cónica ingresando los valores de la longitud, el diámetro y el material con el que fue construida. Para la sección del cuerpo del cohete se debe tener en cuenta la longitud y el diámetro del tubo, la longitud del bloque del motor donde se ubica el combustible y, finalmente, las dimensiones de las aletas y su localización en el cuerpo del cohete (Figura 6).

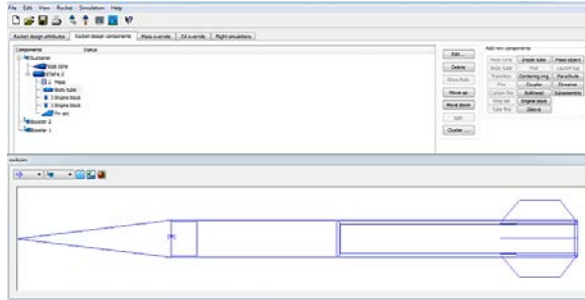


Figura 6. Diseño del cohete en Rocksim

Para cargar el motor en la simulación fue necesario crearlo en la biblioteca de motores, por medio de la interfaz de EngEdit, donde, a partir de la longitud, el diámetro, la masa inicial y la masa del propelente, se genera el empuje promedio, el empuje máximo generado, el tiempo de quemado y el impulso específico (Figura 7).

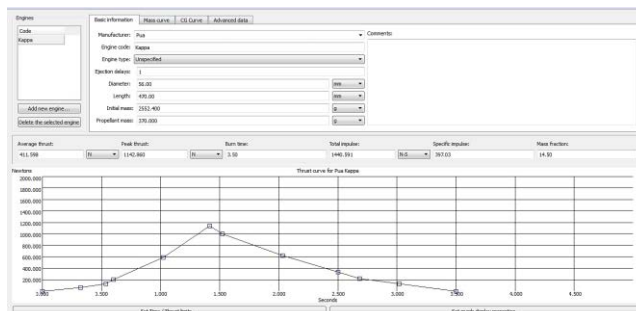


Figura 7. Carga del motor en EngEdit

Después diseñar el cohete y cargar el motor, se declaran las condiciones en las cuales se va hacer la simulación: la temperatura, la densidad y la presión del ambiente, condiciones esenciales para determinar el punto geográfico de lanzamiento del cohete (Figura 8).

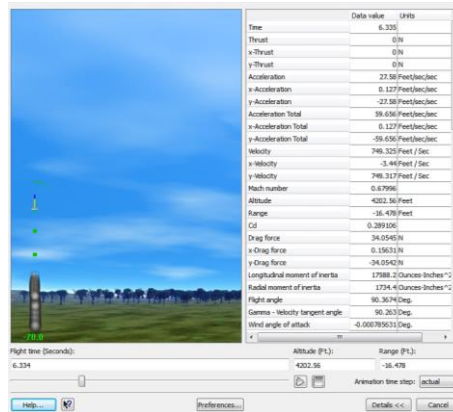


Figura 8. Simulación del vuelo del cohete en Rocksim

Gracias a Rocksim V9.1.3® se encontraron datos tales como la velocidad, el empuje generado, la altura alcanzada, el tiempo de vuelo, el momento de inercia y los centros de gravedad, entre otros datos [11], que son la base para el análisis dinámico y el sistema de control. Además, se obtiene gráficas donde se muestra el comportamiento del cohete desde el punto cero hasta el punto del apogeo. En la Figura 9 se observa que el comportamiento de la altura es directamente proporcional al tiempo y se establece el punto de apogeo a la altura de 2227,92 m para un tiempo de 22,05 segundos.

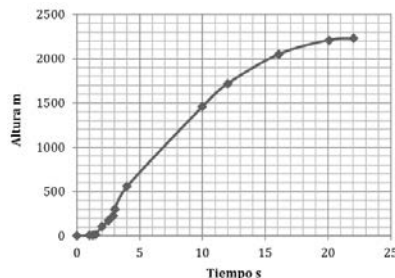


Figura 9. Altura vs Tiempo del cohete Ainkka V

El empuje es parte importante en la caracterización de la capacidad de elevación de un motor cohete, pero, para saber qué tan alto será propulsado, es necesario medir la salida total. Para esto se utiliza el impulso total del motor cohete que reúne el tiempo o duración del empuje y que se define como la integral del empuje sobre la duración operativa del motor [4]. En Rocksim V9.1.3® también se puede realizar la estimación del empuje y el peso, teniendo en cuenta el tiempo y la altura, tal como se observa en las Figuras 10 y 11.

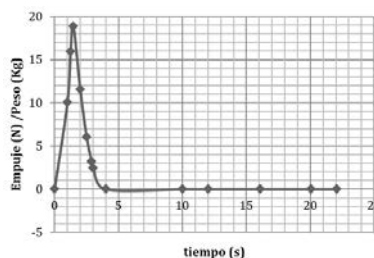


Figura 10. Empuje/peso vs tiempo

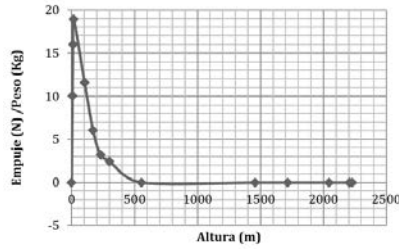


Figura 11.6 Empuje/peso vs altura

El empuje máximo que presenta el cohete Ainkka V es en el tiempo de 1,46 s con 1080,64 N; sin embargo, el combustible tiene un tiempo de quemado rápido haciendo que en el segundo 3,03 se genere el empuje total y, seguidamente, el cohete actúe bajo la inercia que lleva consigo, la cual es elevada, al tiempo alcanza una mayor altura (Figura 12).

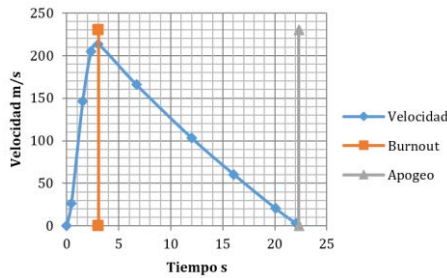


Figura 12. Velocidad vs Tiempo

Se puede apreciar el momento en que se consume todo el combustible (*Burnout*), en un tiempo aproximado de 3,03 segundos. En este punto la velocidad máxima alcanzada por el cohete es de 213 m/s. Desde este punto el cohete empieza a desacelerar a una razón de aproximadamente $-11,038 \text{ m/s}^2$, gracias a la pendiente de una línea recta aproximada desde el punto de velocidad máxima con las coordenadas (3, 213), hasta el punto de velocidad cero con coordenadas (22, 3) (ecuación (20)).

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{3 - 213}{22 - 3} = -11,05 \text{ m/s}^2 \quad (20)$$

Así mismo, en la Figura 12 se aprecia una línea de apogeo, que indica que a los 22 segundos llega a su altura máxima, evidenciando una pérdida en la energía cinética que se obtuvo por el empuje inicial del motor cohete. A partir de los datos arrojados por Rocksim V9.1.3® se estiman algunas condiciones aerodinámicas, teniendo en cuenta los centros de gravedad y de presiones de cada elemento que conforma el cohete [8]. Primero se analizó la parte superior del cohete. Generalmente, la fuerza normal en la nariz (ecuación (21)) es similar para todas las formas, en este caso es una nariz cónica y el valor para la fuerza normal es de 2 [5].

$$(C_{N\alpha})_n = 2 \quad (21)$$

Mientras que la ubicación del centro de presión tiende a variar de acuerdo con la geometría que tenga la nariz, para el caso de la nariz cónica se tiene la ecuación (22).

$$\bar{X}_n = \frac{2}{3}L \quad (22)$$

Luego se analizaron las aletas, donde, según las dimensiones, se obtiene la fuerza que ejercen estas en el cohete con la ecuación (23). Donde n es el número de aletas que, en este caso, son 4.

$$(C_{N\alpha})f = \frac{4n\left(\frac{s}{d}\right)^2}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2l}{a+b}\right)^2}} \quad (23)$$

Además de esto, se debe tener en cuenta que el flujo de aire sobre las aletas está influenciado por el flujo de aire sobre la sección del cuerpo a la que las aletas están unidas. Es por esto que la fuerza para cada aleta se multiplica por un factor de interferencia [5] (ecuación (24)).

$$K_{fb} = 1 + \frac{R}{S+R} \quad (24)$$

Teniendo en cuenta esa fuerza de interferencia, la fuerza que generan las aletas en presencia del cuerpo del cohete está dada por la ecuación (25).

$$(C_{N\alpha})fb = K_{fb}(C_{N\alpha})f \quad (25)$$

La ubicación del centro de presión para las aletas se toma en cuenta desde la raíz de la nariz hasta el valor \bar{X}_f (ecuación (26)).

$$\bar{X}_f = X_f + \Delta X_f \quad (26)$$

$$\bar{X}_f = 92,5\text{cm} + 5,3083 = 97,8083\text{cm}$$

Esto se puede apreciar en la Figura 13, en la que se muestra el modelo de la aleta por medio del programa de diseño Catia V5, que obtiene las características de cada elemento del cohete y especifica el centro de gravedad, donde se intersectan las líneas roja y verde.

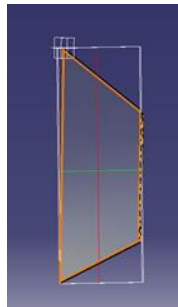


Figura 13. Centro de gravedad por medio de Catia V5

Después de hallar la fuerza normal que actúa en la nariz cónica y en las aletas se halla la fuerza normal total con la ecuación (27) y el centro de presión del cohete con la (28).

$$C_{N\alpha} = (C_{N\alpha})n + (C_{N\alpha})fb \quad (27)$$

$$\bar{X} = \frac{((C_{N\alpha})n \cdot \bar{X}_n) + ((C_{N\alpha})fb \cdot \bar{X}_f)}{C_{N\alpha}} \quad (28)$$

$$\bar{X} = \frac{2(14,666) + 5,7207(97,8083)}{7,7207} = 76,2707\text{cm}$$

Donde se relaciona la fuerza normal total $C_{N\alpha}$ con el centro de presión de la nariz \bar{X}_n , la fuerza total de las aletas $(C_{N\alpha})fb$ y el centro de presión de las mismas \bar{X}_f . Luego se analizó la posición del centro de gravedad del cohete, porque con este valor se determina si el vuelo es seguro y estable (ecuación (29)). De acuerdo con esto, el cohete es estáticamente estable, porque el centro de gravedad se encuentra delante del punto del centro de presión.

$$X_{CG} = \bar{X} - d \quad (29)$$

$$X_{CG} = 76,2707\text{cm} - 8,2\text{cm} = 68,0707\text{cm}$$

3. Estimaciones para la simulación

De acuerdo con los resultados arrojados por Rocksim V9.1.3®, en la simulación se toman en cuenta los valores que se relacionan, tales como la presión dinámica (ecuación (30)), el momento de inercia $I_y = 0,2874 \text{ Kg}m^2$, la velocidad máxima alcanzada $U = 213m/s$ y el empuje del motor sólido del cohete $T = 1180N$.

$$q = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (30)$$

$$q = 29356,01309 \text{ Kg}/m^2$$

Dentro de las estimaciones para encontrar la función de transferencia están las derivadas del cabeceo, la amortiguación, el valor de la pendiente de la fuerza normal, el coeficiente de momento de cabeceo y el coeficiente de deflexión del elevador o aleta [7]. De acuerdo con las especificaciones y según las ecuaciones de movimiento (8), se tienen las ecuaciones (31) y (32).

$$(1,586279 \text{ s} - (-4))\alpha(s) + (-1,58628 \text{ s} - 0,0766628)\theta(s) = -0,26625 \delta e(s) \quad (31)$$

$$(-0,45602)\alpha(s) + (0,004677 \text{ s}^2 - (-1,4893 \times 10^{-5} \text{ s}))\theta(s) = -0,71 \delta e(s) \quad (32)$$

Para solucionar estas ecuaciones se formula la función de transferencia como una división, de modo que el numerador (Tabla 3) es la determinante de la ecuación no-homogénea, ubicando los coeficientes en la columna de la variable a controlar (cabeceo en este caso).

$$\begin{vmatrix} -1,58627941 \text{ s} & 4 & -0,26625298 \\ -0,45602432 & & -0,71 \end{vmatrix}$$

Tabla 3. Constantes del numerador de la función de transferencia

s	1,12625838
N	-2,96141784

Y el denominador es la determinante de la ecuación homogénea (Tabla 4).

$$\begin{vmatrix} 1,58627941 \text{ s} & 4 & -1,58627941 \text{ s} & -0,076662821 \\ -0,45602432 & & 0,00467716 \text{ s}^2 & 1,48932E-05 \end{vmatrix}$$

Tabla 4. Constantes del denominador de la función de transferencia

s^3	0,00741928
s^2	0,01873226
s	0,72344157
N	-0,03496011

Quedando la función de transferencia como se aprecia en la ecuación (33). Donde la salida del sistema $\theta(s)$ es el ángulo de salida y la entrada $\delta(s)$ se refiere a la deflexión de las aletas.

$$\frac{\theta(s)}{\delta(s)} = \frac{1,1262 \text{ s} - 2,7185}{0,0074 \text{ s}^3 + 0,0186 \text{ s}^2 + 0,7233 \text{ s} - 0,0349} \quad (33)$$

4. Sistema de control

Para el desarrollo del sistema de control inicialmente es necesario saber si la función de transferencia de la planta es inherentemente estable o no. Esto se hace mediante el

diagrama de polos y ceros de Root locus, donde el plano izquierdo y derecho indican si es o no estable. En el plano izquierdo se deben ubicar los puntos que generan una señal estable, con el fin de que la respuesta, al estar más lejos de cero, sea más rápida.

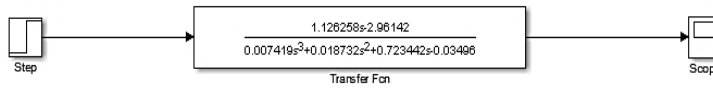


Figura 14. Diagrama de bloques en lazo abierto

Al realizar una retroalimentación del modelo sin el controlador se obtiene una respuesta a partir de una señal, la cual se muestra en la Figura 15.

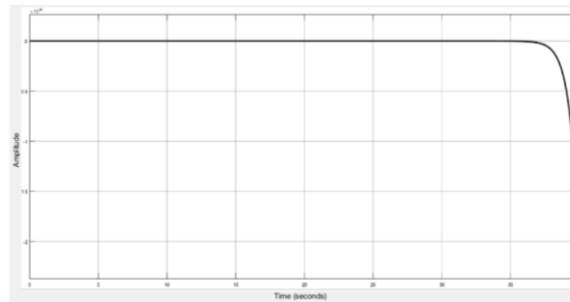


Figura 15. Respuesta al sistema en lazo abierto

En esta señal se observa un sistema que no es capaz de estabilizarse, porque tiende a una caída y, por lo tanto, nunca llega al valor de entrada (*step*) ingresado. A continuación, se encuentra el diagrama de Root locus del sistema en lazo abierto de la función de transferencia, hallada anteriormente, donde se relaciona la entrada del sistema junto con la planta y, finalmente, la respuesta de la señal. En el diagrama Root locus (polos y ceros) de la Figura 16, se observa que el sistema (sin controlador) resulta inestable, porque existen ceros en el plano derecho que indican que se deben hacer modificaciones en el diagrama de bloques, de tal modo que los polos y ceros se encuentren en el plano izquierdo, y así el sistema será estable [10].

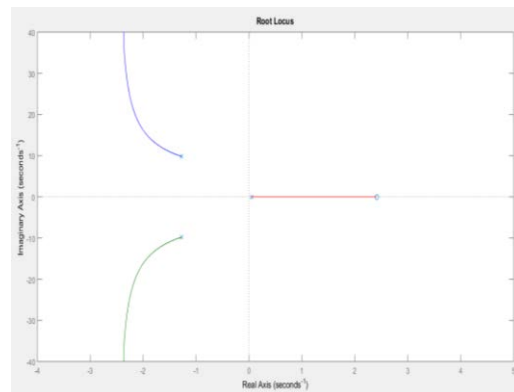


Figura 16. Diagrama Root Locus del sistema en lazo abierto

4.1 Controlador

En la adaptación de un controlador, capaz de estabilizar el sistema con la planta, se realiza el ajuste de un controlador PID. El principio básico del esquema del PID es que actúa sobre la variable a manipular por medio de la combinación de tres acciones de control: la primera es donde la acción de control es proporcional a la señal de error actuante, que es la diferencia entre la entrada y la señal de realimentación; la segunda es donde la acción de control es proporcional a la integral de la señal de error actuante, y la

tercera es donde la acción de control es proporcional a la derivada de la señal del error actuante [9]. La acción del control PID en controladores analógicos está dada por la ecuación (34).

$$m(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (34)$$

Donde $e(t)$ es la entrada al controlador, $m(t)$ es la salida del controlador, K es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo [6]. De acuerdo con esto, se genera un lazo de retroalimentación donde, gracias a la herramienta Tune de Simulink®, se obtienen las constantes K_p , K_d y K_i automáticamente, que conforman la función de transferencia del PID [12]. Con las constantes del PID se obtiene el diagrama de bloque en lazo cerrado con la función de transferencia de la planta, así como se muestra en la Figura 17.

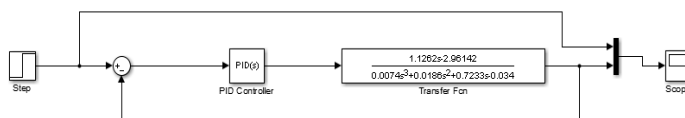


Figura 17. Diagrama de bloque en lazo cerrado con el PID

La respuesta al sistema en lazo cerrado se obtiene mediante el *scope*, generando la señal estabilizada de la Figura 18. Donde las ganancias para el controlador se presentan como: proporcional $K_p = -0.2032$, integral $K_i = -0.0159$ y derivativa $K_d = 0.0693$. Obteniendo un pico de amplitud de 1.27, un margen de ganancia de 8.36dB@2.36rad/s, un margen de fase de 46.3deg@0.803rad/s y un tiempo de estabilización de 15s.

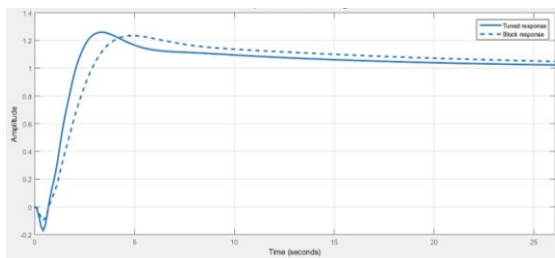


Figura 18. Respuesta del sistema de control

4.2 Discretización del sistema

Actualmente, los sistemas de control mayoritariamente se manejan digitalmente, porque son adaptables a microcontroladores y tarjetas de datos, entre otros, son más exactos en la respuesta del sistema y manejan algoritmos complejos, que se ajustan y modifican según las especificaciones de entrada. Es por eso que, al ver la necesidad de implementar un sistema digital, para luego ser unificado con un microcontrolador, se debe pasar el sistema continuo a uno discreto, por medio de una discretización.

La discretización consiste en convertir un modelo continuo a uno discreto por medio de Matlab®. Esta operación se realiza con el comando de $[Nz,Dz] = c2dm(N,D,Ts,'metodo')$, donde se tiene en cuenta la función de transferencia del modelo continuo, que viene dada por los polinomios numerador y denominador (N y D). Además, existe el tiempo de muestreo (T_s) y, por último, se especifica el carácter con el cual se ejecuta la discretización (método). Dentro de estos métodos se encuentra el método ZOH, que realiza la discretización utilizando mantenedor de orden cero, uno de los más usados. Con el comando $dstep(Nz,Dz)$ se calcula la respuesta temporal de un sistema discreto a una secuencia de escalón, donde se muestran múltiplos del periodo de muestreo. Para el proceso se genera el código en Matlab®, que se muestra a continuación:

```

num=[1.1262 -2.7185]
den=[0.0074 0.0186 0.7233 -0.0349]
planta=tf(num,den)
plantad=c2d(planta,1,'zoh')
Go=feedback(pidcontinuo*planta,1)
God=feedback(piddiscreto*plantad,1)
step(Go)
axis([0 70 0 1])
hold on
figure
step(God)

```

Este código arroja una función de transferencia en tiempo discreto de la planta y vuelve a generar un diagrama de bloque con su respectivo PID (Figura 19).

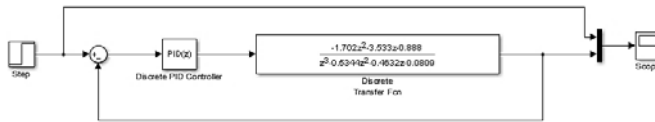


Figura 19. Diagrama de bloque del sistema en tiempo discreto

Según la respuesta obtenida en el *scope* del lazo cerrado, se genera la gráfica de la Figura 20, que muestra la señal de respuesta por medio de pulsos.

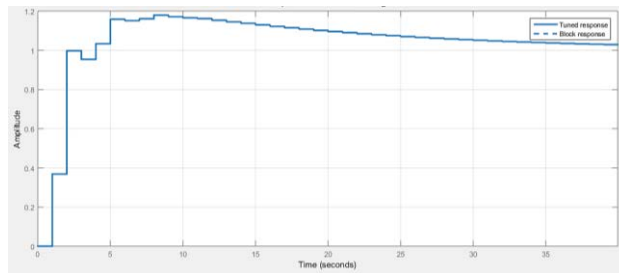


Figura 7 Respuesta del sistema en lenguaje digital

La Figura 20 se representada en forma digital, lo que quiere decir que los valores son discretos; utiliza numeración binaria donde las cantidades se representan utilizando los números 0 o 1. Al mismo tiempo se obtienen las ganancias para el controlador PID [13]: proporcional $K_p = -0.1329$, integral $K_i = -0.00618$ y derivativa $K_d = 0.0571$.

Obteniendo un valor pico de 1.18, un margen de ganancia de 7.23dB@1.95rad/s y margen de fase de 64.5deg@0.5rad/s.

5. Conclusiones

Por medio de análisis dinámicos se pudo generar un modelo capaz de estabilizar el cohete en su ángulo de cabeceo, lo cual se puede evidenciar en la simulación del diagrama de bloques de la Figura 19, que implementa un controlador PID, y en la Figura 20, donde se observa que el sistema llega a estabilizarse conforme a un valor de entrada deseado (ángulo cabeceo).

Este sistema de control pretende ser implementado físicamente en futuros proyectos. Es por eso que se buscó determinar el lenguaje más efectivo para su implementación, implicando así el uso de lenguaje discreto para el control PID, porque estos sistemas son más utilizados por la industria y generan más exactitud en las variables que manipula. Sin embargo, se puede evidenciar que el tiempo de respuesta para los dos sistemas resulta un

poco prolongado, teniendo en cuenta el tiempo que el cohete tendrá desde su punto cero hasta la altura del apogeo, por esta razón es necesario adicionar otro controlador que pueda modificar o mejorar ese tiempo de respuesta.

No obstante, el mecanismo del sistema de control se debe ubicar en las aletas, en la cuerda de raíz, donde se ubica el centro de presión. Según los análisis expuestos, este sistema deberá estar conformado por cuatro servos, cada uno para una aleta, una plataforma que tenga un entorno que implemente el lenguaje de programación, en este caso un Arduino. También es necesaria una unidad de medición inercial (*IMU*), que detecte la tasa de aceleración usando acelerómetros, además de cambios en el cabeceo, guiñada y alabeo usando uno o más giróscopos, y una batería que se encarga de alimentar todo el sistema. Para que exista una transferencia de información y energía entre el Arduino, los servos, el IMU y la batería, se usan cables.

De acuerdo con el análisis dinámico, se deben tener en cuenta los datos de entrada y salida, así como las especificaciones de vuelo del cohete, porque a partir de estos se generan las ecuaciones de movimiento, para luego determinar la función de transferencia, que será la planta del sistema y que tendrá lugar en Simulink®, para desarrollar el lazo cerrado junto con el controlador y así generar la señal de respuesta.

Referencias

- [1] Blakelock, J. (1991). [Automatic control of Aircraft and Missiles](#). USA: Wiley.
- [2] Siouris, G. (2004). [Missile Guidance and Control Systems](#). New York: Springer.
- [3] [Apogee Components](#). Online [Dec 2015].
- [4] Nakka R. (2001). [Solid Rocket Motor Theory](#). Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site.
- [5] Barrowman, J. (2012). [Calculating the Center of Pressure of a Model Rocket](#). EstesEducator.com.
- [6] Ogata, K. (2002). [Sistemas de control en tiempo discreto](#). Barcelona: Prentice Hall.
- [7] Williams, J. et al. (1979). [The USAF Stability and control digital datcom](#). USAF Technical Report AFFDL-TR-79-3032.
- [8] Bandu, N. (1998). [Performance, stability, dynamics and control of airplanes](#). USA: AIAA.
- [9] Ogata, K. (2010). [Ingeniería de control Moderna](#). Madrid: Prentice Hall.
- [10] Vargas, M. (2005). [Tutorial de análisis y control de sistemas usando Matlab](#). Online [Jan 2016].
- [11] Millign, T. (2012). [Determining the drag coefficient of a model rocket using accelerometer based payloads](#). Online [Dec 2015].
- [12] Norman, S. (2011). [Control System Engineering](#). USA: John Wiley.
- [13] [Sistema digital](#). profesormolina.com.ar. Online [Dec 2015].

16. Caracterización de un sistema propulsor aplicado en agricultura de precisión

Daniel Mejía
Rafael Cerpa
Lina Toro

Universidad de San Buenaventura. Bogotá, Colombia

1. Introducción

La agricultura satisface una necesidad primordial del ser humano: la alimentación y sostenimiento, por lo que se convierte en una de las principales actividades económicas en un país, como Colombia, que cuenta con todos los pisos térmicos durante todas las épocas del año [1]. Esta importancia se ve reflejada en la inversión que se ha hecho en investigación tecnológica y, según Fedesarrollo [2], el gasto en investigación se utiliza como el indicador principal de la importancia que se le otorga a dicha actividad. La medida utilizada usualmente es la intensidad del gasto en investigación y transferencia de tecnología con relación al PIB del país en referencia. En Colombia, dicho indicador, en el período 2002-2012, fue de 0,6% en promedio. Aunque parece ser un número bajo, en los últimos años ha sido el más creciente en referencia a la inversión en tecnología. En estos valores se refleja cómo se ha incrementado las investigaciones a mercados específicos y el peso que tienen hoy en la economía de un país. Anteriormente, la inversión en tecnología estaba direccionada a las grandes empresas productoras agrícolas [3] y se ha visto la necesidad de aplicarlos también a los productores pequeños y medianos, porque, según cifras de la Vicepresidencia de la República, 17.670 propietarios son dueños del 64% de todas las parcelas rurales existentes [4].

De acuerdo con la necesidad existente, las aeronaves remotamente tripuladas con fines agrícolas son una de las respuestas para aumentar la eficiencia de los cultivos, es por eso que en este proyecto se presenta la selección de la planta motriz de una plataforma multi-rotor no-tripulada para aplicaciones en agricultura de precisión, en terrenos que oscilen entre 5-40 hectáreas. Esta selección se hace con el propósito de determinar cuánto tiempo estará en vuelo el multi-rotor a una altura entre 30 y 120 metros, seleccionada por la resolución espectral que se desea obtener en el fotograma. Asimismo, se requiere determinar la cobertura por unidad de área por vuelo, para encontrar la cantidad de vuelos necesarios para cubrir la totalidad del cultivo a analizar.

El proyecto se desarrollará en los llanos orientales de Colombia (altitud promedio 365m snm) [5], en el cultivo de un productor ubicado en la categoría de pequeño y mediano empresario, aunque las pruebas son realizadas en Bogotá (altitud promedio 2625m snm) [6], bajo condiciones más críticas, lo que agrega un factor de seguridad al producto, en caso de que sea utilizado en una ubicación diferente a la planteada.

El sistema propulsor para suplir la necesidad se debe analizar desde diferentes puntos de vista, teniendo en cuenta la necesidad del cultivo y la del cliente, y la capacidad necesaria y los costos. Además, puede ser tan pequeño y económico que no genere la suficiente potencia para levantar el multi-rotor, o no lo pueda sostener el tiempo necesario en el aire, es decir, que no cumpla correctamente su función; o puede ser tan grande y costoso que mantenga al multi-rotor en el aire una cantidad de tiempo innecesaria. De aquí surge la necesidad de seleccionar correctamente la planta motriz a utilizar, teniendo en cuenta las necesidades específicas del sector agrícola objetivo y el poder adquisitivo de este tipo de clientes. Por lo tanto, la plataforma multi-rotor busca ser una solución a la necesidad y no un gasto más en la producción.

2. Experimentación

2.1 Variables y métodos experimentales

El análisis se realiza con un motor de tipo eléctrico y, para determinar la cantidad de pruebas necesarias para obtener datos de empuje, consumo de corriente y voltaje, se analizaron los diferentes métodos experimentales: comparativos simples, con un solo factor, análisis de varianza, bloques aleatorizados, cuadrados latinos, diseño relacionados y diseño factorial 2^k . Al final se determinó que el más adecuado era el método experimental 2^k , debido a que es una experimentación que tiene como objetivo, medir la influencia de los factores k a lo largo de un proceso y, además, demostrar si hay interacción entre ellos. Con este método se puede obtener la información necesaria con menos cantidad de pruebas [7].

Para la experimentación se tienen 3 factores k que pueden influir en el resultado de la obtención de datos: temperatura, presión y humedad relativa, que varían debido a que las pruebas se tomaron en un lapso de alrededor de dos semanas, mientras cada día y hora las condiciones climáticas cambian, afectando los resultados de las pruebas. Las variables son independientes, porque la viscosidad y la densidad dependen de alguna de ellas, por lo que se tienen en cuenta como factores k (ecuación (1)).

$$2^k = \text{No. de prueba} \quad (1)$$

Reemplazando los valores se obtiene: $2^3 = 8$

De acuerdo con este resultado se determina realizar 8 pruebas para cada régimen de vuelo, que, en este caso, son potencia mínima, potencia media, potencia máxima y empuje constante. Luego se procede a un análisis detallado de los resultados, donde se debe realizar un promedio de los diferentes datos obtenidos, tal como lo muestra la Tabla 1. Es necesario aclarar que los resultados incluyen la variación del clima.

Tabla 1. Método de promedio

Promedios	
1	+
2	+
3	+
4	+
5	+
6	+
7	+
8	+

3. Descripción del proceso

El sistema de propulsión está conformado con un motor eléctrico Tarot 4114 (Figura 1 y Tabla 2) y una hélice Tarot 1555 (Figura 2 y Tabla 3) recomendada por el fabricante de la planta motriz, una batería Storm tipo LiPo de 22.2V con capacidad de 5000 a 5300 mAh y 6S, y un controlador de velocidades HobbyWing de 40a. El ensamble de estos elementos es recomendado para aeronaves no-tripulas que oscilen entre los 4 y 6 kg. Además, los motores fueron diseñados especialmente para el peso de una carga como el de una cámara Digital Single Lens Reflex (DSLR), conocida como Reflex porque utiliza un sistema de espejos que refleja la imagen del objetivo hacia el visor y, cuando se oprime el botón de obturación, el espejo gira y deja pasar la luz hacia el sensor en la cámara [8].



Figura 1. Motor Tarot 4114 [9]

Tabla 2. Ficha técnica motor Tarot 4114

Diámetro del estator	41 mm
Numero de poleas	22
Diámetro	0.31
Voltaje por velocidad	320 RPM/V
Resistencia inercial	126 mΩ
Peso	148 gr
Altura	32 mm
Altura total con eje	37 mm

Figura 2. Hélice Tarot 1555 [10]



Tabla 3. Ficha Técnica hélice Tarot 1555

Material	Fibra de carbono
Diámetro	310 mm
Paso	5°

En la Tabla 4 se describen algunos parámetros de rendimiento del ensamble motor-hélice calculados por el fabricante [9].

Tabla 4. Ficha técnica ensamble motor-hélice [9]

Empuje (kg)	1	1.5	2	2.5
Voltaje (V)	25	25	25	25
Corriente (A)	5.2	7.4	11.1	15.1
RPM	4370	5045	5755	6311
g/W	7.69	8.11	7.21	6.62
W/kg	130	123.33	138.75	151

3.1 Banco de pruebas

El banco de pruebas es un prototipo desarrollado por investigadores del grupo de Aerotech para análisis de motores eléctricos con hélices de hasta 23in (60 cm) de diámetro y una capacidad de empuje de hasta 400 N. Está construido sobre un riel de desplazamiento en el eje axial, que permite el movimiento de todo el sistema de sujeción al motor en la cantidad de empuje aplicado, donde el equipo de medición (dinamómetro) queda anclado y refleja la cantidad de movimiento del sistema de sujeción al motor en unidades de Newton. Este carro horizontal está montado sobre rodamientos lineales guiados por un riel circular de 12 mm, como se observa en las Figura 4 y 5. El banco fue

fabricado en metacrilato de 10 mm de espesor y el soporte del motor en aluminio comercialmente puro [11].

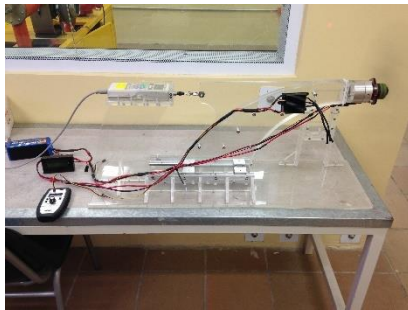


Figura 4. Banco de pruebas [11]

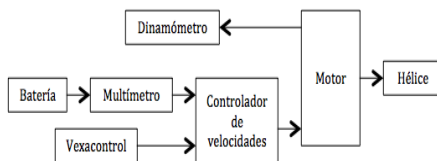


Figura 5. Esquema banco de pruebas

4. Parámetros de medición

4.1 Empuje

Para la medición del empuje se utiliza un dinamómetro digital Imada DS2-100 con capacidad máxima de 50 Kgf a tensión, conectado a una interfaz de adquisición de datos SW1X-V2 con plataforma Winwedge y protocolo de adquisición de datos RS232. Esta interfaz refleja el empuje producido por el motor eléctrico cada segundo, generando una tabla y gráfica con los valores adquiridos en el tiempo (Empuje vs. Tiempo). El control de velocidad se realiza por medio del Servoxciter RF de Vexa Control, que emite manualmente la señal digital en un ancho de 0 a 2, entregada al controlador de velocidades del motor; esta variación en el ancho de banda modifica la velocidad entregada al motor, siendo 0 la menor y 2 la mayor velocidad.

4.2 RPM

La velocidad rotacional de la hélice se capta con un tacómetro foto-reflector Minipa MDT-2238A, que mide el tiempo transcurrido en un giro del motor al incidir un haz de laser a 700 mm de distancia, sobre una marca reflectora en la cabeza rotatoria del motor.

4.3 Voltaje, Amperaje y Potencia

Para estas mediciones se utiliza un multímetro digital conectado entre el controlador de velocidades del motor y la batería de 22.2 V, 5000 mAh y 6C, que energiza todo el sistema. En la pantalla del multímetro se muestran los datos mencionados, en unidades de Voltaje [V], Amperaje [A] y [A/h], Potencia [W] y [W/h], y, por medio de fotos cada 30 segundos, se obtienen y se colectan en tablas de datos.

5. Proceso de medición

El proceso de medición se hace de forma secuencial, inicialmente la batería de 22.2 V, 5000 mAh y 6S, se conecta al motor para energizar el sistema y el multímetro se ubica entre la batería y el motor para obtener los datos de voltaje, potencia y corriente que

entrega la batería al sistema. Paralelo a esto se conecta el controlador de velocidades al Vexacontrol, que enviará la señal al controlador de velocidades del motor y determinará el rango de potencia de funcionamiento. Luego se ubica el dinamómetro digital en la parte anterior al sistema de sujeción del motor, conectados entre sí con el aditamento de tracción tipo gancho, incluido con el dinamómetro digital. De esta manera se conecta la batería al motor por medio del controlador de velocidades y el dinamómetro digital al sistema de sujeción. Al producir un ancho en la señal entregada por el Vexacontrol al controlador, aumenta la corriente entregada al sistema y entra en funcionamiento.

5.1 Potencia mínima de operación

Para determinar la potencia mínima requerida por el sistema se analizaron las fuerzas en vuelo estacionario, porque en esta condición de vuelo es donde la aeronave va a generar la fuerza necesaria para compensar el peso. Este análisis se realizó por medio de un diagrama de cuerpo libre (Figura 6).

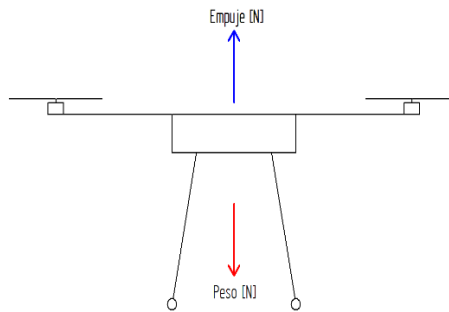


Figura 6. Diagrama de cuerpo libre

Se determinaron las fuerzas totales del sistema, es decir, la masa (estructura, sistemas de control, carga paga) multiplicada por la gravedad, dividida por el número de plantas motrices (6), porque cada motor producirá la misma cantidad de empuje para mantener el sistema en vuelo (ecuación (2)).

$$E_{\min} = \frac{m \times g}{6} = \frac{5,72 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2}{6} = 9,4 \text{ N} \quad (2)$$

El máximo empuje es lo producido ampliando el ancho de la señal entregada del Vexacontrol hasta su punto final, es decir, a 2, según pruebas de operación de $E_{\max} = 16,30 \text{ N}$ y el empuje medio es el punto intermedio entre el valor máximo y mínimo (ecuación (3)).

$$E_{\text{med}} = \frac{16,30 \text{ N} + 9,4 \text{ N}}{2} = 13 \text{ N} \quad (3)$$

5.2 Tiempo de descarga de las baterías

En el proceso de obtención de datos un parámetro inicial que se va a determinar es el factor de seguridad para la batería, para lo que se tiene en cuenta los resultados obtenidos en el programa MatLab, en cuánto a base teórica y curvas de descarga experimentales de una batería inicialmente usada. La batería se llevó hasta su punto de descarga máxima, lo que produjo el calentamiento de la misma, generando un desprendimiento de gases internos que dañaron sus celdas y terminaron su vida útil, debido a que es propensa a auto-incinerarse. Con estos datos, junto al grupo de investigación AeroTech, se calculó el factor de seguridad para las baterías en posteriores pruebas. El proceso en Matlab se desarrolla en Simulink en el módulo de baterías, donde inicialmente se ingresan las características de la batería (22.2 V, 5000 mAh y 6C) y se genera la curva de tasa de

descarga, variando en cada caso la tasa de la misma. La Figura 7 muestra la descarga a tasa mínima de la batería, especificando las áreas de descarga exponencial y nominal.

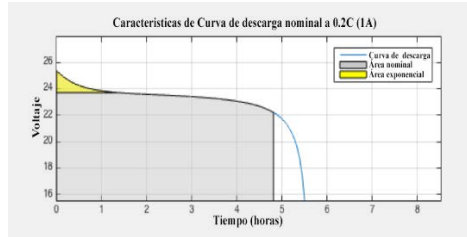


Figura 7. Curva de descarga mínima de la batería (Teórica)

Las curvas de descarga reflejan el comportamiento de la batería en condiciones de máxima, media y mínima potencia (Figura 8), manteniendo constantes las revoluciones por minutos. Basados en el consumo de corriente que tendrían a esas potencias, con estos valores se determina que, en el tiempo de 0 a 5 minutos iniciales de las pruebas, en los 3 casos se evidencia una descarga exponencial en la batería. Por lo que el siguiente tramo de descarga lineal muestra el área nominal que refleja el tiempo de buen funcionamiento de la batería, hasta que empieza su descarga final. Cuando la curva deja de ser lineal y llega a su descarga final, la batería estaría perdiendo sus propiedades de funcionamiento correcto, es decir, al llegar a ese punto debe ser desechada para pruebas futuras.

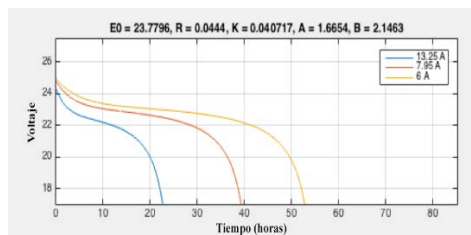


Figura 8. Curvas de descarga mínima, media y máxima

Los datos obtenidos en Matlab fueron comprobados con las curvas de descarga experimental. En este caso, las baterías se llevaron hasta su punto final de carga a potencia máxima y una tasa de descarga máxima de (13A), donde se obtuvo las curvas de descarga total y real. Al final del experimento las baterías se desecharon, debido a que, al llevarlas a su punto final de descarga, no vuelven a su estado inicial normal (Figura 9).

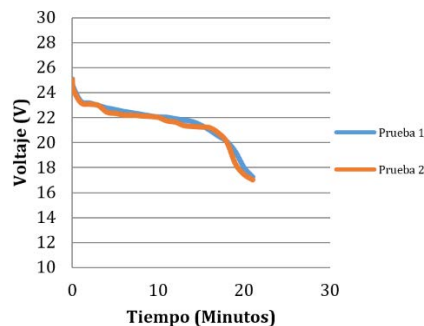


Figura 9. Curvas de descarga experimentales de las baterías

Después de obtener los datos teóricos y experimentales, se puede concluir que el punto en común, donde la tasa de descarga de la batería está en su área nominal y el tiempo de prueba permite la obtención de datos suficientes para generar la curva de descarga a las diferentes potencias, es de 22V, con lo que se garantiza la vida de la batería y los resultados exitosos de las pruebas.

6. Resultados después de las pruebas

6.1 Empuje

En la Figura 10 se muestra el comportamiento del empuje en relación con a la corriente en las condiciones del motor a potencia máxima, media y mínima. La corriente que entrega la batería va disminuyendo debido a la pérdida de carga; aunque el ancho de banda entregado por el controlador de velocidades (Vexacontrol) se mantiene constante, esta disminución influye en todo el sistema, debido a que la batería es la que lo energiza (ecuación (4)).

$$V = I * R \quad (4)$$

Donde I es la corriente, que se ve afectada proporcionalmente a la disminución de carga de la batería $[V]$, pues la resistencia siempre será fija.

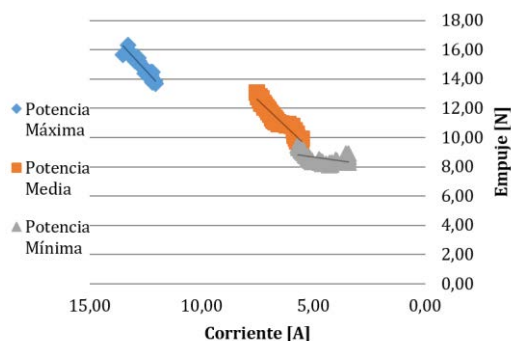


Figura 10. Empuje vs Corriente a diferentes regímenes de potencia

La potencia eléctrica del motor está definida por la ecuación (5). Lo cual se comprueba con las tablas obtenidas, porque en condiciones de máxima potencia la corriente necesaria es mayor, como se observa en Figura 10 en términos de amperios. La potencia máxima está en un rango entre 14A y 12A, potencia media entre 8A y 5A, y potencia mínima entre 6A y 3A (valores aproximados).

$$P = V * I \quad (5)$$

La Figura 11 muestra el comportamiento del empuje a medida que va incrementando el consumo de corriente a lo largo del tiempo, lo cual tiene relación con la ecuación (5), donde, al despejar la corriente en función del voltaje y la potencia, se obtiene la ecuación (6).

$$I = P/V \quad (6)$$

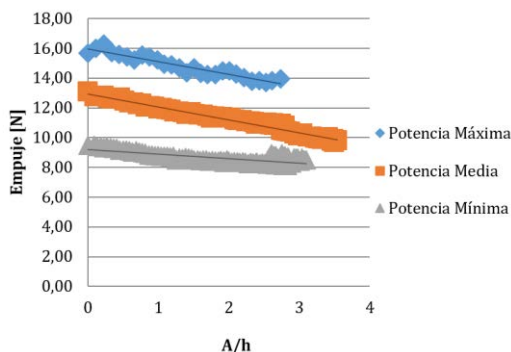


Figura 11. Empuje vs A/h a diferentes regímenes de potencia

Luego de planteada la ecuación (6) se visualiza más claramente los datos obtenidos en la Figura 11 y se puede concluir que, a mayor potencia, menor corriente necesaria en el tiempo. Esto va relacionado a la duración de la prueba porque a menor empuje, mayor carga eléctrica pasa por los terminales de la batería en el tiempo, debido a que la duración de la prueba es mayor que en el caso de potencia máxima, cuando la batería se descarga en menor tiempo y, al estar descargada, no hay carga eléctrica pasando por los terminales. En la Figura 12, la potencia eléctrica entregada por la batería disminuye debido a su descarga. En esta ocasión, las potencias eléctricas entregadas varían según la potencia mecánica requerida, sea máxima, media o mínima.

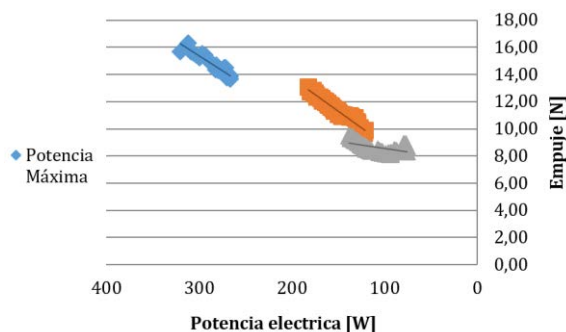


Figura 12. Empuje vs Potencia eléctrica a diferentes regímenes de potencia

6.2 Consumo de corriente

La corriente es un parámetro principal para analizar en el estudio del sistema propulsor, porque a partir de su comportamiento se determinará el del empuje. En la Figura 13 se muestra cómo con el tiempo la corriente va disminuyendo. En la prueba, la potencia que se imprime al motor permanece constante, es decir, no se varía desde el controlador, por lo que la corriente se ve disminuir, debido a que con el tiempo la carga de la batería disminuye y afecta proporcionalmente la corriente.

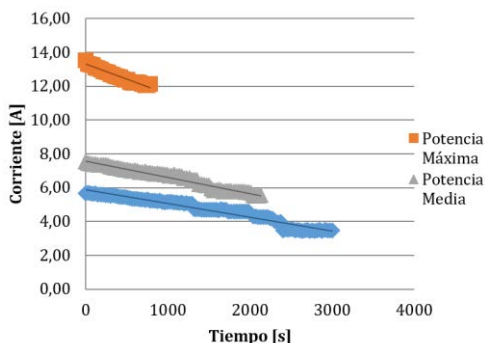


Figura 13. Corriente vs Tiempo a diferentes regímenes de potencia

6.3 Consumo de voltaje

En la Figura 14 se observa el comportamiento del voltaje de la batería, con lo que se comprueba que la utilizada está en buenas condiciones, con base en el estudio realizado sobre el tiempo de descarga, en el que se obtuvieron las curvas de Voltaje vs. Tiempo. En este punto de análisis se compara el comportamiento de la potencia requerida por el motor, su variación se muestra en las tres líneas de la Figura 14 en las que, a menor potencia generada por la batería, más tiempo de vuelo, pero su tiempo de descarga aumentará debido a que la corriente que entrega es menor. En la Figura 15 se aprecia el comportamiento de las RPM vs el voltaje consumido.

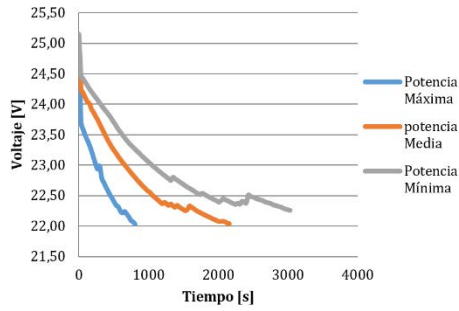


Figura 14. Voltaje vs Tiempo a diferentes regímenes de potencia

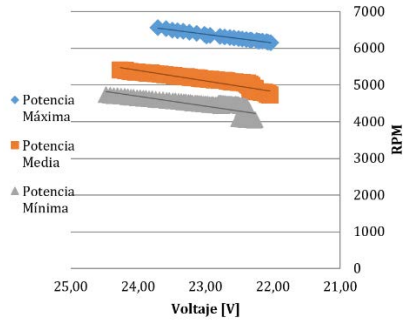


Figura 15. RPM vs Voltaje a diferentes regímenes de potencia

6.4 Prueba adicional a empuje constante

La diferencia entre estas pruebas y las anteriores, es que su propósito es mantener constante el empuje producido por el motor, para esto, el controlador se gradúa manualmente para obtener el empuje requerido, de acuerdo con lo que arroja el Dinamómetro digital, y así mantener un empuje constante de 9,4N (potencia mínima de vuelo o potencia para vuelo estacionario). En las Figuras 16, 17 y 18 se observa este comportamiento.

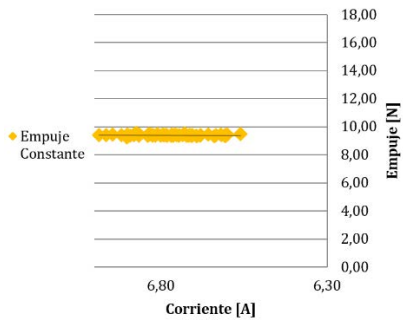


Figura 16. Empuje vs Corriente a potencia constante

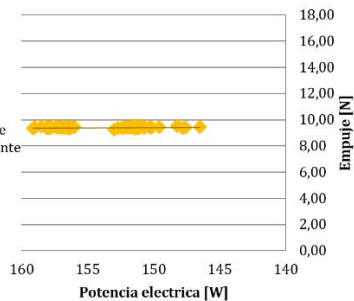


Figura 17. Empuje vs Potencia eléctrica a potencia constante

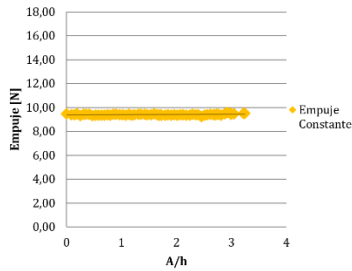


Figura 18. Empuje vs A/h a potencia constante

En el caso de empuje constante y a diferencia de lo obtenido en las pruebas de potencia máxima, mínima y media, las pruebas se realizaron de otra forma, porque aquí se analiza qué parámetro puede ser variable en la ecuación para obtener resultados diferentes, y cuáles simplemente no lo pueden ser. En este proceso se determina que la corriente y la potencia eléctrica podrían no verse afectadas por la disminución del voltaje, es decir, no se verán afectadas por la descarga de la batería. Para mantener el empuje constante se aumenta el ancho de banda entregado por el controlador de velocidades, lo que contrarresta la disminución de corriente entregada al motor mientras el voltaje disminuye. Con esto se encuentra que el empuje de salida del motor, relacionado directamente con el comportamiento de la corriente y la potencia eléctrica, se puede mantener constante, por lo que es necesario controlar la corriente y potencia eléctrica que entrega la batería, lo que se logra a través del controlador de velocidades.

6.5 Consumo de corriente

En la Figura 19 se establece que, en caso de empuje constante, la corriente se mantiene constante para lograr el resultado, aunque el voltaje continúa disminuyendo por el uso de la batería. Si se controla la corriente entregada, se controla el empuje final producido por el motor, y la corriente se varía manualmente variando el ancho de banda, es decir, la velocidad entregada al motor. A medida que el voltaje disminuye, si el ancho de banda no varía, la corriente disminuye; pero, variando el ancho de banda, es decir, aumentando la velocidad entregada, la corriente aumenta, por lo que, debido a su disminución por el voltaje y su aumento por el ancho de banda, se contrarrestan y se mantiene constante.

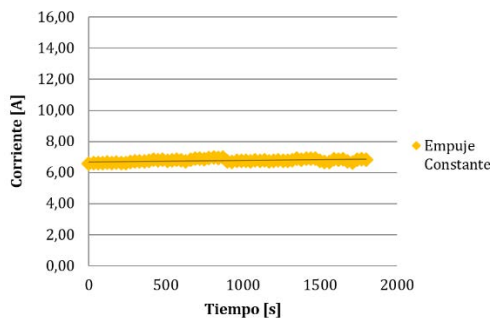


Figura 19. Corriente vs Tiempo potencia constante

6.6 Consumo de voltaje

De acuerdo con los resultados de la Figura 20, se puede determinar que el voltaje disminuye sin importar la corriente que la batería esté entregando al sistema; la corriente entregada afecta el tiempo que la batería tarda en descargarse hasta 22V, determinados como factor de seguridad de vida de la batería. Esta variación afecta el tiempo máximo de vuelo, de acuerdo con el peso del Hexacoptero, en comparación con las pruebas de potencia máxima, mínima y media. De acuerdo con la duración de éstas, una prueba a

potencia mínima con empuje constante, es decir, variando la corriente entregada, su duración es similar a lo que dura la batería con potencia media, sin variar la corriente; asimismo, cuando se varía la corriente, disminuye el tiempo de descarga de la batería.

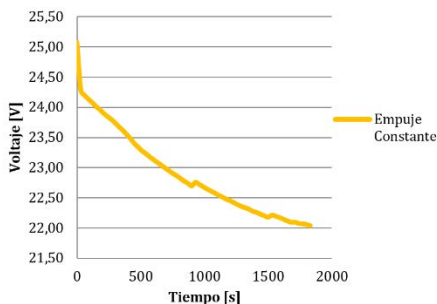


Figura 20. Voltaje vs Tiempo a potencia constante

A su vez, el voltaje no afecta ni la velocidad angular del motor, ni el empuje del motor; la variación continúa en la corriente y el aumento generado manualmente, que contrarresta la disminución de voltaje, permiten una potencia mecánica ($RPM * I$) constante (Figura 21). La potencia, como el empuje, están relacionados directamente con la corriente, y son los parámetros principales a tener en cuenta en este proyecto. La prueba de empuje constante refleja que, en el vuelo, este cambio de corriente se estará realizando para tener un vuelo recto y nivelado y a una distancia específica sobre el terreno para capturar las imágenes necesarias.

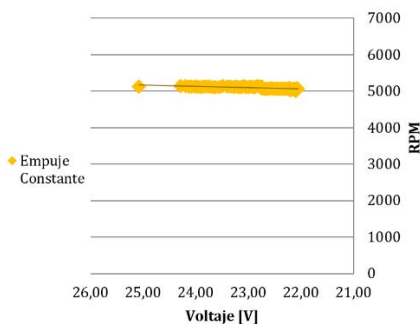


Figura 21. RPM vs Voltaje a potencia constante

7. Conclusiones

El sector agrícola en Colombia tiene necesidad de aumentar el rendimiento y la rentabilidad de los cultivos, por lo tanto, debe cambiar de alguna manera. Una posibilidad es mediante cambios en la ejecución de procedimientos e implementación de nuevas tecnologías, enfocadas a la agricultura de precisión. En este sentido, los sectores público y privado deben realizar esfuerzos para incentivar la productividad de la tierra en Colombia, con programas de transferencia tecnológica, modernización de maquinaria y financiación. Una falencia hoy, es que los equipos de mecanización que se tienen, en su mayoría, se encuentran obsoletos o sobredimensionados a lo que realmente necesitan los suelos colombianos. Esto genera desaceleración de la producción o desmotivación de los agricultores pequeños y medianos, que no logran los estándares de producción que esperaban [8].

Mediante la caracterización del sistema propulsor propuesto en este trabajo, es posible ayudar al logro de este objetivo. Se concluye que la aeronave de ala rotatoria USB-Rotor,

con una carga máxima de 0.7 kg y operando a una altura de 60 m idealmente, logra un tiempo máximo de vuelo entre 15 y 20 min bajo condiciones atmosféricas de la ciudad de Bogotá. Con esta configuración se obtienen imágenes con resolución de 1.5 cm por pixel, lo que significa que con un vuelo se puede tomar las imágenes necesarias para elaborar un mapeo completo de 3.5 hectáreas, lo que permitiría adquirir información de calidad para un análisis detallado del terreno.

Con la información obtenida se logra un gran avance en el desarrollo de nuevas tecnologías a nivel nacional, porque el sector agrícola podría incrementar su eficiencia para el seguimiento y control de producción de cultivos. Además, se tiene una mayor conservación del terreno y del medio ambiente, un tema importante a nivel mundial.

Referencias

- [1] DANE (2015). [Producto Interno Bruto](#). Departamento Nacional de Estadística. Online [Apr 2016].
- [2] Junguito, R., Perfetti, J. & Becerra, A. (2014). [Desarrollo de la agricultura colombiana](#). Cuadernos Fedesarrollo 48.
- [3] Dinero (2015). [Agricultura de precisión: Del azadón al GPS](#). Revista Dinero. Online [Apr 2016].
- [4] Semana (2008). [Tierras ociosas](#). Revista Semana. Online [Apr 2016].
- [5] <http://www.puertolopez-meta.gov.co>
- [6] <http://portel.bogota.gov.co/portel/libreria/php/01.270701.html>
- [7] Ferré, J. (2005). [El diseño factorial completo 2k](#). Universidad Rovira i Virgili. Online [Marc 2016].
- [8] <http://www.helipal.com/tarot-4114-high-power-brushless-motor-320kv-orange.html>
- [9] <http://es.aliexpress.com/store/product/2-Pairs-1550-Carbon-Fiber-CW-CCW-Prop-Propeller-for-T-Motor-RC-MultiCopter>
- [10] Escobar, J. et al. (2014). [Herramienta Computacional para el Análisis Numérico de Hélices usadas en Aeronaves no Tripuladas](#). Proyecto.
- [11] Chen, L. & McKerrow, P. (2007). [Modelling the Lama Coaxial Helicopter](#). In Australasian Conference on Robotics & Automation. Brisbane, Australia.
- [12] Andrews, S. (2010). [Fastqc: A quality control tool for high throughput sequence data](#). Babraham Bioinformatics. Online [Mar 2016].
- [13] Augen, J. (2004). [Bioinformatics in the post-genomic era: Genome, transcriptome, proteome, and information-based medicine](#). USA: Addison-Wesley.
- [14] Blankenberg, D. et al. (2010). [Galaxy: a web-based genome analysis tool for experimentalists](#). Current protocols in molecular biology 19, pp. 1-21.
- [15] Bolger, A., Lohse, M & Usadel, B. (2014). [Trimmomatic: A flexible read trimming tool for illumina NGS data](#). Bioinformatics 2014, pp. 1-7.
- [16] Giardine, B. et al. (2005). [Galaxy: a platform for interactive large-scale genome analysis](#). Genome research 15(10), pp. 1451-1455.

17. Estudio del rendimiento aerodinámico de un ala de envergadura variable para un planeador de entrenamiento

**Paula Carranza V.
Jaime Escobar
Jorge Gaitán A.**

Universidad de San Buenaventura. Bogotá, Colombia

1. Introducción

El vuelo sin motor exige habilidades del piloto para aprovechar en su favor las condiciones atmosféricas y diseños sofisticados, que exigen de los ingenieros la convergencia de características técnicamente opuestas, especialmente aquellas relacionadas con eficiencia aerodinámica, bajo peso y alta resistencia estructural. El éxito de un planeador radica en el mejor aprovechamiento de la energía potencial, de las corrientes ascendentes de aire y la generación eficiente de la fuerza aerodinámica, requerida para sostener el peso de la estructura.

Los esfuerzos para mejorar la eficiencia energética del planeador se enfocan principalmente en el diseño aerodinámico. Las alas delgadas de baja relación de aspecto y carga alar de los primeros diseños de Otto Lilienthal, evolucionaron a configuraciones con mayor relación de aspecto, espesor y carga alar, en planeadores de clase abierta, como la aeronave SB-10 que tiene una envergadura de 29m, permitiéndole alcanzar un rendimiento aerodinámico de 50:1 [1], además de la reducción en la resistencia parásita e inducida. Estos cambios fueron modelados principalmente por los avances en materiales de fabricación y diseño estructural, el desarrollo de modelos matemáticos y numéricos para análisis aerodinámico y, especialmente, la evolución del simple planeo sin motor a otras modalidades, tales como vuelo en corrientes térmicas ascendentes y *cross-country* [2-4].

La mayoría de planeadores consiste en tres componentes básicos: el ala, el fuselaje y el empenaje. El ala soporta el peso del planeador, los alerones y el empenaje proporcionan estabilidad y control y el fuselaje tiene por función mantener el ala y la cola en relación adecuada entre sí, además de proporcionar un espacio en la cabina para el piloto. El principal objetivo de diseño de un planeador es convertir toda la energía en sustentación útil y en empuje necesario, por lo que cualquier desperdicio de energía se traduce en un bajo rendimiento [5].

El rendimiento de un planeador se mide comparando sustentación y arrastre. Un planeador típico de carreras posee una relación de sustentación máxima sobre el arrastre (L/D) de 43:1, es decir, el planeador puede ir 43 metros hacia adelante mientras pierde un metro de altura, lo cual significa que, a 6 metros de altura, cubre una distancia de aproximadamente 250 metros.

Al verificar la relación de rendimiento L/D, la fuerza de sustentación aumenta con el incremento del peso del avión, porque en vuelo recto y nivelado debe ser igual a la sustentación. Entonces, si se asume que el peso del planeador es el mismo (por cuanto se habla del mismo avión), para aumentar la eficiencia aerodinámica se debe disminuir el arrastre o el coeficiente de arrastre, compuesto por el coeficiente de arrastre parásito y el coeficiente de arrastre inducido. Este último se puede reducir significativamente si aumenta la relación de aspecto que, a su vez, puede lograrse con un aumento en la envergadura del ala, lo que implica que, necesariamente, la superficie alar aumente y, por

lo tanto, afecta la generación de sustentación. Suponiendo que no aumentara el peso con el aumento en la envergadura, para mantener la misma fuerza de sustentación con el aumento de la superficie alar se debe reducir el coeficiente de sustentación o la velocidad de vuelo. A su vez, la disminución del coeficiente de sustentación también reduce notoriamente el coeficiente de arrastre inducido. Entonces, con el incremento de la envergadura alar que, usualmente, se logra a expensas de un mayor peso en la estructura del ala [6], se puede obtener una mayor eficiencia aerodinámica.

Se sabe que la aplicación de *winglets* en planeadores ha sido ampliamente estudiada y, como resultado, se aprendió que podía disminuir el arrastre inducido y mejorar la maniobrabilidad [5-9]. Actualmente, la mayoría de aeronaves mantienen su envergadura constante y poseen un rendimiento definido, pero, la fabricación y experimentación sobre alas de envergadura variable, como la desarrollada a mediana escala en la Universidad de Maryland sobre una aeronave no-tripulada [10], ha demostrado que un ala de envergadura variable aumenta el rendimiento, porque se produce una mayor relación de aspecto, lo que significa que hay menor arrastre inducido, sustentación a menores velocidades y menor velocidad de pérdida.

Un ala de envergadura variable es un sistema compuesto por una sección alar central, con una o más secciones sustentadoras que, además, son completamente retráctiles, moviéndose hacia afuera o hacia adentro de la sección principal. El aumento del tamaño del ala incrementa el arrastre parásito (que se debe a la fricción generada en la superficie). Respecto al rendimiento de una aeronave de motor, que posea un ala de envergadura variable, la mayor parte del arrastre es inducido para bajas velocidades y es parásito para; por ello, el ala extendida es esencial para bajas velocidades de pérdida y la retraída se usa para reducir el arrastre durante crucero, de manera que exista un aumento de la velocidad [11].

En 2008 se presentó la tesis de grado: *Diseño detallado de un planeador de alto rendimiento para instrucción*, de la que surge el planeador conocido en la Universidad de San Buenaventura con el nombre de ATLAS I (Figura 1) y que se caracteriza por ser una aeronave sin motor de alto rendimiento para dos pasajeros [12]. Con base en esta aeronave se realizó el estudio de rendimiento aerodinámico, teniendo en cuenta que la eficiencia del planeador puede aumentar al implementar un ala telescópica. Las principales características de este planeador se describen en la Tabla 1.



Figura 1. Configuración previa a la implementación del ala telescópica en el planeador ATLAS I

Tabla 1. Características principales del planeador ATLAS I

Ítem Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Peso máximo del planeador	W	600	kg
Carga Alar	W/S	34,29	Kg/m ²
Velocidad de máxima eficiencia	V_{Emax}	35,1	m/s
Eficiencia Máxima	E_{max}	36,9	-
<i>ALA (Perfil Eppler 593 Modificado)</i>			
Cuerda media del ala	C	1,01	m
Cuerda en la punta del ala	Ct	0,65	m
Cuerda en la raíz del ala	Cr	1,3	m
Relación de taperado	Λ	0,5	-
Envergadura del ala	B	18	m
Superficie Alar	Sw	17,5	m ²
<i>FUSELAJE</i>			
Longitud del fuselaje	Lf	8,76	m
Diámetro de Anchura máxima del fuselaje	bf,max	0,76	m
<i>EMPENAJE (Perfil Naca 63012)</i>			
Cuerda media del estabilizador horizontal	ch	0,54	m
Cuerda en la punta del estabilizador horizontal	Cth	0,35	m
Cuerda en la raíz del estabilizador horizontal	Crh	0,7	m
Relación de taperado del estabilizador horizontal	Λ	0,5	-
Envergadura del estabilizador horizontal	bh	3,14	m
Área superficial del estabilizador horizontal	Sth	1,65	m ²
Cuerda media estabilizador vertical	Cv	0,55	m
Cuerda de raíz estabilizador vertical	Crv	1,28	m
Cuerda de punta del estabilizador vertical	Ctv	0,70	M
Relación de Taperado del estabilizador vertical	λ_v	0,55	-
Envergadura del estabilizador vertical	Bv	1,4	m
Área del estabilizador vertical	Stv	1,38	m ²

En 1930, Ivan Makhonine realizó por primera vez un mecanismo telescópico para extender la envergadura en una aeronave, la cual podía cambiar su envergadura alar en 62% (desde 13m hasta 21m) [13]; posteriormente, en la Unión Soviética se desarrolló la aeronave Bakshaev LiG-7, que contaba con seis secciones de ala que requerían entre 30 y 40 segundos para completar su extensión [14]. Un ejemplo de la aplicación del concepto de ala telescópica en aeronaves tipo planeador fue desarrollado a lo largo de la década de 1970, en la Universidad de Stuttgart, por los miembros de la Akaflieg, quienes fueron proponentes del ala telescópica como solución al *performance* Soaring o rendimiento de planeo. El planeador diseñado con este tipo de ala, el fs-29 (Figura 2), es el único de ésta clase y voló por primera vez el 15 de junio de 1975. Su envergadura mínima es de 13,3 metros y la máxima de 19 metros [15].

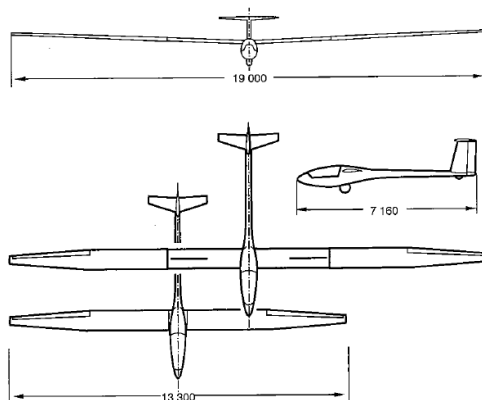


Figura 2. Planeador de ala telescópica fs 29 [17]

Sus primeros dos vuelos se hicieron con el ala completamente extendida, de ésta manera voló durante 2 horas y 20 minutos y algunas de las mediciones que se lograron fueron la tasa de *roll* promedio de 5,3 segundos a 95 km/h de 45 a 45°; con los frenos de aire abiertos se obtuvo una tasa de descenso vertical de 3 m/s a 80 km/h y de 4,5 m/s a 100 km/h; el aviso de pérdida ocurrió a los 72-75 Km/h y a los 68 Km/h la máquina empezó a oscilar sin suficiente potencia, lo que se corrigió con un control ligero del alerón y del *rudder*. En térmicas, la aeronave demostró ser ligera y fácil de controlar en los tres ejes, a pesar de tener las alas rígidas. Durante el tercer vuelo la envergadura fue reducida a su valor mínimo (13,3 m) por primera vez; el control de los alerones incrementó, pero no fueron necesarias la aplicación de fuerzas extraordinarias [16].

2. Estudio aerodinámico

El ala de geometría variable, propuesta para el planeador Atlas I, pretende mejorar el desempeño aerodinámico para condiciones de baja velocidad, requeridas durante vuelos en espiral dentro de la masa de aire ascendente en una corriente térmica y desplazamientos a alta velocidad en vuelos de *cross-country*. La primera condición requiere que el planeador extienda las alas para aumentar la superficie y disminuir la carga alar; la segunda condición requiere que la longitud del ala sea mínima para reducir la superficie y aumente la carga alar.

Para el análisis aerodinámico y de rendimiento se consideraron los estados estacionarios de ala retraída y ala extendida, pero no se consideraron los efectos en las características de vuelo que pueda producir la transición de un estado a otro, ni las acciones requeridas por el piloto. La condición de ala retraída y sus características geométricas son las mismas del diseño original del Atlas I, sin embargo, para establecer las dimensiones del ala extendida se definieron restricciones para la máxima envergadura, con base en las características de otros planeadores y las restricciones geométricas de un sistema de ala telescópica.

Siguiendo las recomendaciones en cuanto al diseño de planeadores [17, 18], se realizó una revisión de diseños existentes con envergadura superior a 18 m, prestando especial atención a las características del ala y el desempeño del planeador. La información recolectada y analizada permitió definir que, el ala extendida del ATLAS I, debe tener una longitud máxima de 23,6m, relación de aspecto de 22,83 y superficie alar de 24,4m² (Figura 3).

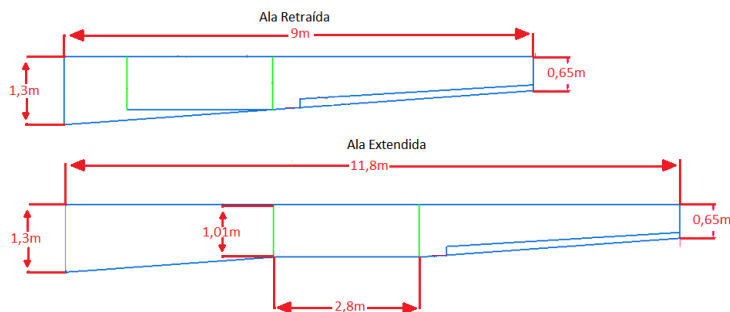


Figura 3. Ala retraída y extendida

La implementación de la ala de geometría variable implica la instalación de un sistema compuesto por un servomotor, tornillo sin fin, guías de desplazamiento, control de posición, sistema eléctrico e interruptor de mando para su accionamiento desde la cabina, además de modificaciones a la estructura y al sistema de control de los alerones

localizados en las secciones externas del ala. Estas modificaciones inciden directamente en el peso de vuelo del planeador, para efectos de desempeño de la aeronave. A partir de un estudio preliminar, se estimó que la masa del planeador aumenta de 600 kg a 746,36 kg, lo que implica que la carga alar, cuando el ala está retraída es $423 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ y cuando el ala está extendida, es de $300 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$.

El ala del planeador ATLAS I se caracteriza por usar una modificación del perfil Eppler 583, que cuenta con espesor máximo de 0,1695 (t/c máx.) [12], proporcionando buenas características aerodinámicas. Este perfil alcanza un coeficiente de máxima sustentación de 1,67 a un ángulo de ataque $\alpha = 16,5^\circ$, con una pendiente de sustentación del perfil $a_{0,r} = 6,051 \text{ rad}^{-1}$ y espesor máximo de 0,1695 (t/c máx.). Sabiendo que, cuando el ala está retraída, el coeficiente de Oswald (e) es 0,96 y que cuando el ala está extendida es 0,94, fue posible calcular el factor K (ecuación (1)), que es 0,018 cuando el ala está retraída y 0,014 cuando está extendida. Además, con base en las ecuaciones (1) a (7), se calcularon los parámetros aerodinámicos presentados en la Tabla 2 para las condiciones de ala retraída y extendida del planeador ATLAS I.

$$K = \frac{1}{\pi A e} \quad (1)$$

$$CL_{max} = Cl_{max} * 0.9 \quad (2)$$

$$CL = \sqrt{\frac{Cd_{o,tot}}{K}} \quad (3)$$

$$Cd_{o,tot} = K [Cd_{o,w} + Cd_{o,f} + Cd_{o,ht} + Cd_{o,vt}] \quad (4)$$

$$CD_i = \frac{CL_w^2}{\pi A Re} \quad (5)$$

$$CD_w = Cd_o + CD_i \quad (6)$$

$$CD = Cd_{o,tot} + CD_i \quad (7)$$

Tabla 2. Parámetros iniciales de coeficiente de sustentación y coeficiente de arrastre

Parámetro	Nomenclatura	Ala retraída	Ala extendida
Coef. sustentación máxima del ala	CL_{max}	1,501	1,501
Coef. Sustentación de máxima eficiencia	CL	0,75	0,83
Coef. Arrastre Parásito	$Cd_{o,tot}$	0,010	0,010
Coef. Arrastre Inducido	CD_i	0,01018	0,01000
Coef. Arrastre del ala	CD_w	0,012	0,0115
Coef. Arrastre total	CD	0,020	0,020

La ecuación (6) implica que el cálculo de la fuerza aerodinámica de arrastre es dependiente del coeficiente de arrastre parásito (Cd_o), además, debido a que el análisis de rendimiento se basa en el arrastre de la aeronave, la exactitud del análisis de rendimiento depende en gran medida del cálculo del Cd_o . El método para determinar el coeficiente de arrastre parásito se conoce como Build-Up Technique o Técnica de Acumulación, e indica que todos los componentes aerodinámicos externos contribuyen al arrastre de la aeronave. A pesar que el ala y la cola son superficies sustentadoras, también producen arrastre junto con cada componente que tiene contacto directo con el flujo de aire, por lo tanto, para el cálculo del Cd_o se deben incluir todos los elementos, tales como el ala, la cola vertical, la cola horizontal y el fuselaje (ecuaciones (8) a (17)) [19] [20].

$$Cd_{o,w} = C_f f_M f_{tc,w} \left(\frac{S_{wether,w}}{S_w} \right) \frac{(Cd_{min})^{0.4}}{0.004} \quad (8)$$

$$Cd_{o,vt} = C_f f_M f_{tc,vt} \left(\frac{S_{wether,vt}}{S_w} \right) \frac{(Cd_{min})^{0.4}}{0.004} \quad (9)$$

$$Cd_{o,ht} = C_f f_M f_{tc,ht} \left(\frac{S_{wether,ht}}{S_w} \right) \frac{(Cd_{min})^{0.4}}{0.004} \quad (10)$$

$$S_{wether,w} = S_{expuesta,w} [1.977 + 0.52 (t/c)_{max}] \quad (11)$$

$$S_{wether,vt} = S_{expuesta,vt} [1.977 + 0.52 (t/c)_{max}] \quad (12)$$

$$S_{wether,ht} = S_{expuesta,ht} [1.977 + 0.52 (t/c)_{max}] \quad (13)$$

$$C_f = \frac{1.327}{\sqrt{Re}} \quad (14)$$

$$f_M = 1 - 0.08Ma^{1.45} \quad (15)$$

$$f_{tc,w} = 1 + 2.7(t/c)_{max} + 100(t/c)_{max}^4 \quad (16)$$

$$Cd_{o,f} = C_f f_M f_{LD} \left(\frac{S_{wether,f}}{S_f} \right) \quad (17)$$

Tabla 3. Desglose de coeficiente de Drag a sustentación cero

Parámetro	Nomenclatura	Ala retraída	Ala extendida
Coef. de arrastre a parásito del ala, cola vertical y cola horizontal	$Cd_{o,w}$	0,0017	0,0014
	$Cd_{o,vt}$	0,0026	0,0026
	$Cd_{o,ht}$	0,0026	0,0026
Área mojada del ala, cola vertical y cola horizontal	$S_{wether,w}$	16,76 m ²	22,56 m ²
	$S_{wether,vt}$	1,24 m ²	1,24 m ²
	$S_{wether,ht}$	1,6 m ²	1,6 m ²
Coef. de Fricción	C_f	0,000094	0,000094
Parámetro en función del número de Mach	f_M	0,99	0,99
Parámetro en función del espesor del perfil del ala y de la cola vertical y horizontal	$f_{tc,w}$	1,53	1,53
	$f_{tc,vt}$	1,34	1,34
	$f_{tc,ht}$	1,34	1,34
Coef. de arrastre parásito del fuselaje	$Cd_{o,f}$	0,003	0,003

Al analizar las Tablas 2 y 3 se observa que los parámetros de sustentación son los únicos que se ven afectados por el incremento de la envergadura (Tabla 2), porque, al realizar todos los cálculos referentes a los coeficientes de arrastre, ellos no tuvieron cambios significativos. Con el ala extendida aumenta la superficie, pero la fuerza de sustentación requerida es la misma que con la retraída y, por lo tanto, el vuelo se efectúa con velocidad más baja y coeficiente de sustentación más alto. Igualmente disminuye el arrastre parásito del ala por el aumento en la superficie expuesta al flujo, pero el arrastre inducido disminuye considerablemente por el aumento en la relación de aspecto.

Conociendo el valor del arrastre parásito es posible calcular la máxima eficiencia aerodinámica del planeador, definida por la relación entre la sustentación y resistencia aerodinámica obtenida a partir de la ecuación (18): para la configuración de ala retraída $E_{max} = 36,9$ y para el ala extendida $E_{max} = 41,52$. En principio, con la implementación del ala telescópica la eficiencia del planeador aumenta 11,8%.

$$E_{max} = \sqrt{\frac{\pi \cdot AR \cdot K}{4 \cdot Cd_{o,tot}}} \quad (18)$$

3. Rendimiento aerodinámico

3.1 Rendimiento aerodinámico en crucero: Velocidad de vuelo y tasa de descenso

Para encontrar la sustentación y el arrastre en la condición de crucero (planeo) de una térmica a otra, se determinó que la velocidad de planeo (V_p) debe ser la correspondiente a la de máxima eficiencia, dada por la ecuación (19). Para el cálculo de la velocidad se

utilizó la densidad de $0,74\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ que corresponde a una altura barométrica de 5000m, por tratarse del techo promedio de una térmica, para luego incluirles en las ecuaciones (20) y (21) de sustentación y arrastre como fuerzas.

$$V_{Emax} = \left(\frac{2}{\rho} \sqrt{\frac{K}{Cd_{o,tot}}} \frac{W}{S_w} \right)^{1/2} \quad (19)$$

$$L_r = Cl_w \frac{\rho}{2} V_{p,r}^2 S_w \quad (20)$$

$$D_r = Cd \frac{\rho}{2} V_{p,r}^2 S_w \quad (21)$$

Al resolver la ecuación (19) se encontró que la velocidad de vuelo para la máxima eficiencia es $39,15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ y $31,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para las condiciones de ala retraída y extendida respectivamente. Esto indica que la velocidad de máxima eficiencia en la aeronave, modificada con el ala retraída es 10,92% mayor que en la aeronave original; además, la velocidad con el ala retraída, es 19,87%, mayor que la velocidad cuando el ala está extendida. La disminución en la velocidad de vuelo cuando el ala está extendida afecta la fuerza de arrastre, de manera que es menor a cuando el ala está retraída, a pesar que el coeficiente de arrastre total es el mismo en las dos condiciones de envergadura.

También se encontró que la fuerza de sustentación es 7.321,79N en las dos condiciones de envergadura (ecuación (20)); sin embargo, el arrastre (ecuación (21)) es 198,48N cuando el ala está retraída y 176,34N cuando está extendida. Al hacer una comparación entre los valores obtenidos para las fuerzas de sustentación y arrastre se observa que no hay un incremento en la sustentación, debido a que el peso de la aeronave se mantiene constante cuando el ala está extendida y cuando está retraída. Esto implica que haya disminución de la velocidad, además del aumento del coeficiente de sustentación en 9,55%, contrario a la fuerza de arrastre que disminuyó en 11,15% cuando el ala está extendida, a pesar de mantener constante el coeficiente de arrastre en las dos condiciones.

Por otra parte, se toma en consideración que en vuelo recto y nivelado la sustentación debe ser igual al peso de la aeronave y que, además, al saber por definición que la aeronave no tiene un motor de propulsión, su empuje T es igual a cero. El peso del planeador, al igual que las fuerzas aerodinámicas, tiene dos componentes: una paralela y otra perpendicular a la trayectoria de vuelo.

En un planeo equilibrado o compensado (Trimmed Glide) a velocidad de vuelo constante, el mínimo ángulo de trayectoria de vuelo y es el que proporciona equilibrio entre las fuerzas individuales (Figura Figura 4) a partir de la eficiencia máxima de la aeronave, y se calcula con la ecuación (22) [21]. El resultado para la condición de ala retraída es $\gamma_{min} = 1,55^\circ$ y para la extendida es $1,38^\circ$. El porcentaje de disminución encontrado, cuando el ala está extendida, es mínimo en comparación con el presentado cuando está extendida y, al ser menor a 2° , se considera una condición ideal de planeo.

$$\tan \gamma_{min,r} = \frac{1}{E_{max,r}} \quad (22)$$

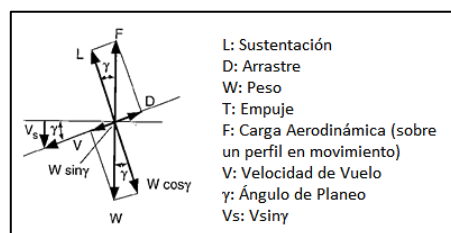


Figura 4. Balance de fuerzas en vuelo

La velocidad de descenso V_s en planeo es un parámetro que se directamente afectado por los cambios producidos en la carga alar y la relación $Cl_w^{3/2} \cdot Cd^{-1}$ (ecuación 23). El valor de esta velocidad, calculada para el ala retraída, es $1,06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y para la extendida es $0,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; es decir, con el ala extendida se consigue una tasa de descenso 28,29% menor que cuando está retraída.

$$V_s = \frac{1}{\frac{Cl_w^{3/2}}{Cd}} \sqrt{\frac{2W}{\rho S}} \quad (23)$$

3.2 Rendimiento aerodinámico en viraje: Teoría de *cross country*

- *Polar de Viraje: Tasa de descenso.* Un vuelo de travesía o *cross-country flight*, se define como aquel en el que el planeador ha volado más allá de una distancia de planeo desde el sitio local de *soaring*. Los elementos que deben ser considerados durante los vuelos de travesía son: qué tan buenas son las térmicas adelante y si van a permanecer activas, qué posibilidades de aterrizaje hay, cuál aeropuerto a lo largo del curso tiene una pista favorable para las condiciones de viento predominantes, qué efectos tendrá el viento contrario sobre el planeo y cuál es la mejor velocidad para volar en descenso entre térmicas [5]. El objetivo del modelamiento de vuelos de travesía es aportar bases para la comparación de diferentes diseños, permitiendo una determinación cuantitativa de la influencia de los parámetros individuales de diseño (relación de aspecto, selección del perfil aerodinámico, etc.) [17].

En su forma más simple, el planeo de travesía involucra una serie de ascensos y planeos en espiral de térmica a térmica. Dentro de una determinada térmica, el área de sustentación está limitada y el ascenso debe tomar lugar en un giro continuo [17]. Entonces, la aeronave está siempre descendiendo en relación con el aire y, para mantener o ganar altura, debe pasar el tiempo suficiente en la térmica para superar el descenso normal y para recuperar la altura perdida en las corrientes descendentes [22]. Por lo general, se asciende circundantemente a baja velocidad en la térmica y luego se planea de una térmica a la otra, como se muestra en la Figura 5.

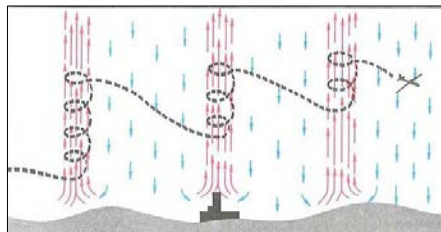


Figura 5. Cross-Country: Vuelo entre térmicas [22]

El modelo de *cross-country* más simple asume que la fuerza de las térmicas permanece constante a lo largo del vuelo y que no varía con la altitud; además, que la transición de planeo a ascenso ocurre sin demora, es decir, no se considera la transición entre una condición y la otra [22]. Para realizar los cálculos de rendimiento del planeador ATLAS I en térmicas, dadas las dos condiciones de envergadura, se requirieron tres variables iniciales: el ángulo de banqueo, velocidad de vuelo de la aeronave para el ascenso V_K (de donde $V_K = V_{Emax,r}$), y el radio de viraje.

La tasa de ascenso alcanzada en térmicas depende fuertemente de su rendimiento y manejo en los vuelos de viraje. Un análisis del planeador en virajes refleja la fuerza centrífuga CF opuesta a la componente horizontal de la velocidad. Para un objeto viajando en una trayectoria circular $CF = ma_{cent}$ y está dirigida en dirección del radio

de viraje; a menudo se denomina *fuerza ficticia* porque no es resultado directo de las interacciones mecánicas entre el cuerpo y sus alrededores. No obstante, la fuerza es real en el sentido que puede ser usada para escribir una ecuación de equilibrio dinámico (principio de D'Alembert). La Figura 6 presenta un diagrama de equilibrio dinámico para el viraje, con la fuerza centrífuga balanceada por la componente de la sustentación que, a su vez, depende del ángulo de banqueo del planeador.

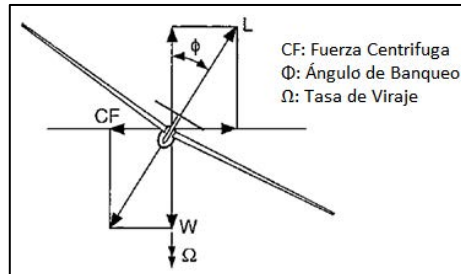


Figura 6. Equilibrio de fuerzas de viraje

El peso W , la fuerza centrífuga CF y la sustentación L están relacionados con el ángulo de banqueo a través de las ecuaciones (24) y (25). Al introducir las relaciones elementales de las ecuaciones (26) y (27) se obtuvo el radio de viraje (ecuación (28)).

$$W = L_{turn} \cos \Phi \quad (24)$$

$$CF = L_{turn} \sin \Phi \quad (25)$$

$$CF = \frac{mV_K^2}{r} \quad (26)$$

$$W = mg \quad (27)$$

$$r_r = \frac{V_K^2}{g \tan \Phi} \quad (28)$$

Con esta información se calcula la tasa de descenso durante la etapa de viraje V_s , que es un número positivo en la dirección descendente, es decir, es la velocidad de descenso relativa medida con respecto al aire y descrita por la ecuación (29). El resultado es positivo porque indica velocidad de descenso, pero para este proyecto se asume como negativa, porque se busca que en las térmicas se obtenga una velocidad de ascenso positiva.

$$V_s = \left(\frac{kCL^2}{\pi AR} + C_{D_0} + C_{D_i} \right) * C_L^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{2W}{\rho Sw}} \left[1 - \left(\frac{2W}{\rho Sw r g CL} \right)^2 \right]^{\frac{3}{4}} \quad (29)$$

De esta manera fue posible encontrar la velocidad de descenso en la aeronave en todas las configuraciones de la misma (ATLAS I original, ATLAS I modificado con la retraída y ATLAS I modificado con ala extendida) para radios de viraje entre 20m y 180m. El valor mínimo preliminar tomado para el rango de radios de viraje es ligeramente superior al de la envergadura del planeador, aunque depende de la velocidad de pérdida, y el valor máximo corresponde al diámetro de las térmicas fuertes y estrechas, y débiles y estrechas, porque fuera de allí el planeador no tendrá como ganar altura y la velocidad de descenso tiende al valor que corresponde al vuelo recto. La Figura 7 es un diagrama de viraje donde se compara el planeador ATLAS I original, ATLAS I modificado con ala retraída y ATLAS I modificado con ala extendida. Se relaciona el radio de giro y la tasa de descenso a la velocidad correspondiente a la eficiencia máxima para cada una de las configuraciones del planeador.

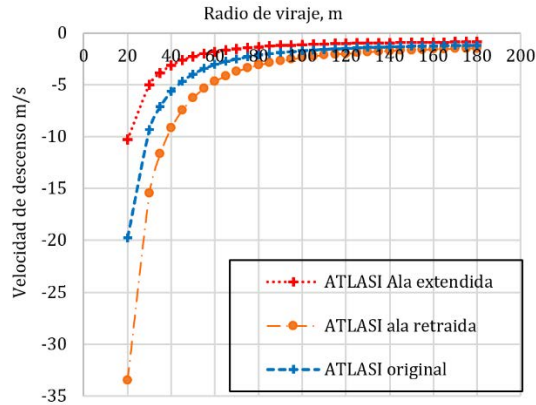


Figura 7. Tasas de eficiencia máxima para cada una de las configuraciones del planeador

En las curvas de la Figura 7 se observa que el ángulo de banqueo se reduce a medida que aumenta el radio de viraje, para mantener el equilibrio de fuerzas en el plano horizontal a una velocidad de vuelo V_K constante, y que cuando aumenta el ángulo de banqueo también lo hace la tasa de descenso. Disminuir el ángulo de banqueo, mientras se mantiene constante la velocidad de vuelo, implica aumentar el coeficiente de sustentación y, por lo tanto, el radio mínimo de viraje está limitado por el coeficiente de máxima sustentación. Al graficar la tasa de descenso calculada para varios radios de giro (donde el radio de viraje está en función del ángulo de banqueo), en un sólo diagrama de viraje se obtuvo una curva que define la más baja tasa de descenso alcanzada por el planeador, donde se observa que la tasa de descenso disminuye a medida que el radio de viraje aumenta.

La Figura 7 también muestra que, para la condición de ala extendida, el planeador tiene una menor tasa de descenso que en los otros dos casos; además, que esa velocidad se vuelve casi constante a partir de un radio de 100 m, cuando el piloto debe virar a un ángulo de banqueo de $45,1^\circ$, con una tasa de descenso $V_s = -1,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Para este mismo radio de viraje, el planeador ATLAS I original y el modificado con el ala retraída, necesitan un ángulo de viraje de $51,5^\circ$ y 55° respectivamente, lo que influye en que su tasa de descenso sea $-1,53 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ para el ATLAS I original y $-1,98 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ para el planeador modificado con el ala retraída.

En el caso del ala retraída y del ATLAS I original, se observó que la tasa de descenso tiende a un valor constante al llegar aproximadamente a 130 m de radio. En esta condición de viraje el ángulo de banqueo y tasa de descenso para el ATLAS I original es $47,6^\circ$ y $-1,66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ respectivamente, y para el ATLAS I modificado con el ala retraída son 44° y $-1,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Estos valores representan aproximadamente el 34% de incremento en la velocidad de descenso cuando la envergadura es de 18m. Los resultados mostrados en la Figura 7 evidencian que durante el vuelo en viraje es más beneficioso utilizar el ala telescópica, debido a que es la configuración que ofrece menores tasas de descenso y, por lo tanto, es favorable para ganar altura más rápidamente dentro de las corrientes térmicas.

- **Modelado de Térmicas.** La naturaleza proporciona variedad de corrientes de aire ascendente, también conocidas como corrientes térmicas. Las diversas condiciones geográficas y climáticas, así como el fenómeno meteorológico localizado, conducen a la formación de térmicas de intensidad, amplitud y estructura variables. Los modelos térmicos más simples asumen que las térmicas son perfectamente circulares, cuya intensidad varía en función de la distancia desde el centro. Los siguientes resultados se

obtuvieron con base en el modelo térmico de Carmichael [23], que clasifica las térmicas según su intensidad: fuerte y estrecha, débil y estrecha, y amplia. Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 4 se muestra la velocidad máxima de corriente ascendente V_o y el diámetro de la térmica d para cada tipo de térmica.

Tabla 4. Tipo, velocidad máxima de corriente ascendente y diámetro de las térmicas [24]

Tipo	V_o	Diámetro
Fuerte y estrecha	$V_o = 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$d = 180 \text{ m}$
Débil y Estrecha	$V_o = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$d = 180 \text{ m}$
Amplia	$V_o = 4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$d = 360 \text{ m}$

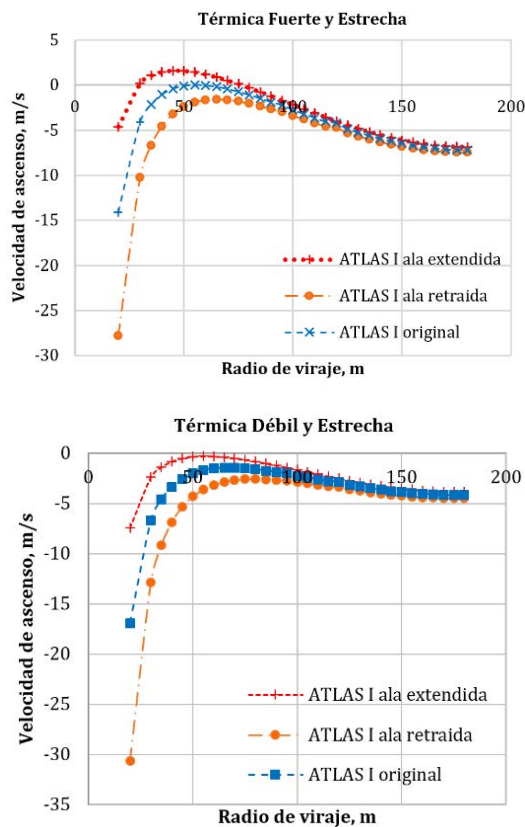
Con la ecuación (30) y los parámetros de la Tabla 4 se encontró la velocidad de la corriente ascendente en el rango de radios (r), mostrados en la Figura 6 para cada tipo de térmica.

$$V_{thermal} = V_o \cos \frac{\pi r}{d} \quad (30)$$

La velocidad ascendente del aire en la térmica, obtenida para determinado radio de viraje, se sumó a la velocidad de descenso (negativa) de la aeronave para calcular la velocidad absoluta de ascenso (ecuación (31)).

$$V_c = V_{thermal} + V_{sc} \quad (31)$$

A partir de la velocidad de ascenso en función de la intensidad de la térmica se construyeron las curvas de la Figura 8, donde se relaciona el radio de giro con la tasa de ascenso según el tipo de térmica en la que se encuentre el planeador; en todos los casos presentados las tasas de ascenso se calcularon con la correspondiente velocidad (V_K) para cada configuración.



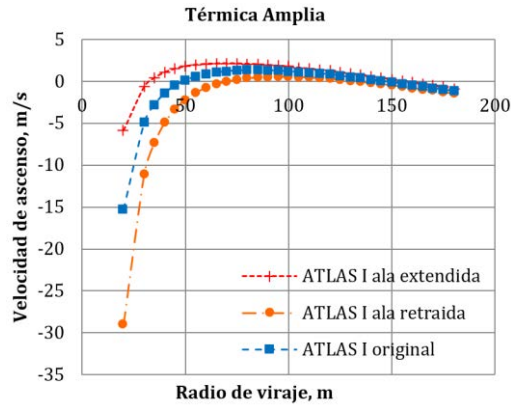


Figura 8. Tasa de ascenso V_c vs. Radio de viraje r en los diferentes tipos de térmica

Al comparar el planeador ATLAS I original, ATLAS I modificado con el ala retraída y el ATLAS I modificado con el ala extendida, se observa que, al igual que para la tasa de descenso, la tasa de ascenso disminuye con el aumento del radio de viraje. Además, se durante el ascenso en cualquiera de las térmicas, si el piloto hace el viraje cada vez más pronunciado, la tasa de ascenso alcanza un valor máximo y después cae drásticamente. En esta región la mayor intensidad de la corriente ascendente encontrada hacia el centro de la térmica no alcanza a compensar el aumento pronunciado de la tasa de descenso. En el otro extremo, si la aeronave vuela con un radio de viraje amplio, se situará en la zona exterior más débil de la térmica donde también pierde altura.

Para realizar el análisis de tasa de ascenso en térmicas se tuvo en cuenta la relación que ésta tiene con la tasa de descenso, el coeficiente de sustentación durante el viraje, que no debe ser mayor a CL_{max} , y la fuerza de sustentación. Las curvas de la Figura 8 muestran que la máxima tasa posible de ascenso en las tres condiciones de térmica se presenta en el radio de viraje, ángulo de banqueo, fuerza de sustentación, coeficiente de sustentación y tasa de descenso, como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Condiciones de rendimiento aerodinámico con la máxima tasa de ascenso

Configuración	Ala extendida	Ala retraída	Original
r (m)	70	95	75
Φ (deg)	55,01	58,97	59,16
$L(N)$	12.795,88	14.094,63	11.482,23
Cl_{turn}	1,45	1,46	1,46
V_s	-1,53	-2,53	-2,29
V_c Térmica A	0,52	-2,94	-0,73
V_c Térmica B	-0,505	-2,74	-1,51
V_c Térmica C	2,14	0,54	1,28

4. Análisis de resultados

Al relacionar las Figuras 7 y 8, para la configuración del ATLAS I modificado con ala extendida, se observa que, para que la aeronave se mantenga en ascenso positivo, en la térmica Fuerte y Estrecha necesita volar con radio de viraje entre 70m y 75m y en la térmica Amplia entre 70m y 155m; sin embargo, cuando la aeronave se encuentra en la térmica Débil y Estrecha, el ascenso siempre es negativo, por lo que su mayor tasa de ascenso es $-0,505 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a un radio de viraje de 70m.

Los resultados obtenidos para el ATLAS I modificado con ala retraída, muestran que solamente se consigue un ascenso positivo cuando la aeronave vuela en la térmica Amplia,

para lo cual debe realizar virajes con radios entre 95m y 130m, aunque la tasa de descenso es cada vez mayor que la tasa de ascenso. Por otra parte, en el ATLAS I original ocurre la misma situación que con el ATLAS I modificado con ala retraída, porque solamente hay ascenso positivo cuando la aeronave vuela en la térmica Amplia; pero, el radio de viraje en el primero, para lograr una tasa de ascenso positiva, debe estar entre 75m y 140m.

La Tabla 5 muestra que el ATLAS I modificado con ala extendida tiene la menor tasa de descenso, que se ve favorecida por la intensidad de la corriente Fuerte y Estrecha para alcanzar mejores tasas de ascenso que las otras dos configuraciones. Por otra parte, el ATLAS I modificado con ala retraída tiene la mayor tasa de ascenso negativa, en comparación con las otras configuraciones del planeador, lo que significa que la aeronave pierde altura en la térmica mientras vuela a la velocidad V_K . En el caso del ATLAS I original se observa que, a pesar de tener el mayor ángulo de banqueo Φ y la mayor velocidad de descenso V_s a consecuencia de volar a un radio de viraje más amplio que en la condición de ala extendida, la intensidad de la térmica no es suficiente para alcanzar una tasa de ascenso absoluta positiva.

Otra observación en la Figuras 7 y 8 es que el ascenso es negativo en las tres configuraciones del planeador, por lo que la mejor tasa de ascenso obtenida de $-0,505 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (en este caso negativa) es para el ATLAS I modificado con el ala extendida, cuando vuela con un radio de 70m. Esto significa que, en comparación con las otras dos configuraciones del planeador, la tasa de ascenso de la configuración de ala extendida es mayor en 81,5% y en 66,5% con respecto a las otras configuraciones de ala retraída y de ATLAS I, respectivamente. Por esta razón se recomienda no volar en térmicas débiles en ninguna de las configuraciones del planeador. Si es inevitable entrar en este tipo de térmicas se recomienda volar con el ala extendida y planear hasta una corriente fuerte y estrecha o amplia (preferiblemente), que le permita a la aeronave ganar altura. Esto se debe a que las térmicas amplias se caracterizan por tener dos veces el diámetro de las dos térmicas ya analizadas y por tener una intensidad fuerte. Además, se observa que, en el caso en que la aeronave vuele en una térmica amplia, es más conveniente utilizar el planeador en la configuración de ala extendida, debido a que hay ganancia en ascenso de 74,4% y 40,18%, en comparación con las configuraciones de ala retraída y de planeador original.

Los resultados obtenidos luego de los cálculos determinaron que el incremento en la superficie alar es esencial para cumplir misiones en térmicas y, en general, en vuelos que requieran maniobras en espiral. También se determinó que el ala retraída es ideal para vuelos de planeo cuando se requiere ir rápidamente de una térmica a otra, porque se tiene mayor velocidad y eficiencia a la del planeador ATLAS I original. El planeador ATLAS I original, bajo condiciones de vuelo en térmica, tiene mejor tasa de ascenso en todas las térmicas (64,5%, 44,9% y 57,8%), en comparación con la configuración de ATLAS I modificado con ala retraída.

La razón por la que se consigue una mayor tasa de ascenso a bajas tasas de descenso en la configuración de ATLAS I modificado con ala extendida, es que la superficie alar y la relación de aspecto ayudan a disminuir la fuerza de *drag* que se presenta a lo largo de la envergadura, lo que se ve reflejado en los vuelos a altos ángulos de viraje para hacer espirales cerradas sin afectar el rendimiento de la aeronave.

5. Conclusiones

Se realizó el estudio aerodinámico y de rendimiento de la propuesta de modificación del planeador ATLAS I, diseñado en la Universidad de San Buenaventura, para incorporar

un ala de geometría variable que le permita aumentar o disminuir su envergadura dependiendo de las condiciones de vuelo. Para el estudio se consideraron dos configuraciones y dos condiciones de vuelo: ala extendida a la máxima envergadura y ala retraída a la mínima envergadura, para vuelo recto de crucero y en espiral dentro de corrientes térmicas.

Se determinó que la envergadura con ala completamente retraída de 18m es la misma del diseño original; la máxima extensión de 23.6m se obtuvo a partir de las características geométricas del ala del diseño original y de una línea base de diseños de planeadores, con altas relaciones de aspecto y envergadura superior a los 18m; de esta manera la envergadura puede aumentar en vuelo hasta 23,3%. La variación de la longitud del ala afecta otras características, por ejemplo, la superficie alar pasa de tener 17,32 m² cuando el ala está retraída, a 24.4 m² cuando está extendida, lo que implica un aumento en la superficie alar del 29,03%; además, la relación de aspecto con el ala retraída es 18,7 y aumenta hasta a 22,83 cuando el ala es extendida.

La eficiencia obtenida de la aeronave con el ala retraída fue 36,9 y extendida 41,52, es decir, aumentó 11,8%. Este incremento se atribuye principalmente al aumento efectivo en la relación de aspecto, a pesar del incremento en el peso a consecuencia de la modificación y la incorporación del sistema de extensión y retracción del ala.

El estudio de rendimiento aerodinámico también reveló que la velocidad se ve directamente afectada por el peso y la superficie alar: con el ala retraída se incrementa la carga alar por el aumento del peso y, por lo tanto, lo hacen las velocidades de maniobra y de vuelo recto, mientras que con el ala la carga alar se redujo.

Durante la etapa de planeo se encontró que es más beneficioso tener el ala del planeador retraída, porque en esta condición la aeronave cuenta con mayor velocidad que con el ala extendida, lo que le permite volar de una térmica a otra en un periodo de tiempo más corto, de manera que el piloto pueda lograr mayor provecho de la siguiente corriente ascendente sin perder gran altura.

Se determinó que el uso del ala extendida en vuelos en espiral disminuye la tasa de descenso y, por tanto, aprovecha mejor las corrientes térmicas ascendentes. El incremento en la superficie alar permite obtener un aumento mayor al 60% en la tasa de ascenso y una tasa de descenso menor al 50%, en comparación al ala retraída en los tres tipos de térmica. Sin embargo, ninguna de las configuraciones del planeador logra tener una tasa de ascenso positiva cuando hay térmica débil y estrecha, a pesar de que el planeador con el ala extendida tenga la menor tasa de ascenso en comparación a las otras configuraciones. Por lo tanto, la aeronave con el ala extendida puede volar de manera eficiente (siempre ascendiendo) cuando hay térmica Fuerte y Estrecha y térmica Amplia.

Finalmente, se concluye que la implementación de un ala de envergadura variable (ala telescópica) es ideal para aumentar la eficiencia de la aeronave, disminuyendo considerablemente la fuerza de arrastre en la misma, lo cual se ve reflejado en las ventajas tomadas en los vuelos en espiral sin importar la intensidad de la térmica a la que se vea sometido el planeador. Luego, retraer el ala conduce a una mayor velocidad en la condición de vuelo recto y nivelado, permitiendo entrar rápidamente a una próxima térmica.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de la Universidad de San Buenaventura y del grupo de investigación AEROTECH de la misma universidad y, en especial, a Andrés Felipe

Chapetón Calderón por su apoyo incondicional en el desarrollo de este estudio y aportes en las áreas de diseño y conceptualización.

Referencias

- [1] Bramesfeld, G. & Maughmer, M. (2002). [The Penn State Sailplane Project – First Decade](#). In 20th AIAA Applied Aerodynamics Conference. St. Louis, USA.
- [2] Maughmer, M. (2003). [The Evolution of Sailplane Wing Design](#). In AIAA International Air and Space Symposium and Exposition: The Next 100 Years. Dayton, USA.
- [3] Thomas, F. (2003). [Sailplane Design-100 Years of Sailplane Design and Beyond](#). In AIAA International Air and Space Symposium and Exposition: The Next 100 Years. Dayton, USA.
- [4] Horstmann, K. & Boermans, L. (2003). [Evolution of Airfoils for Sailplanes](#), Technical Soaring – An International Journal 27(3-4), pp. 87-95.
- [5] FAA (2013). [Glider Flying Handbook](#). USA: Federal Aviation Administration.
- [6] Guynn, M. (2015). [Effective L/D: A Theoretical Approach to the Measurement of Aero-Structural Efficiency in Aircraft Design](#). In AIAA Aviation 2015. Dallas, USA.
- [7] Maughmer, M. (2003). [Design of Winglets for High-Performance Sailplanes](#). Journal of Aircraft 40(6), pp. 1099-1106.
- [8] Smith, M. et al. (2001). [Performance Analysis of a Wing With Multiple Winglets](#). In 19th AIAA Applied Aerodynamics Conference. Anaheim, USA.
- [9] Catalino F. & Ceron, H. (2005). [Experimental Analysis of Aerodynamics Characteristics of Adaptive Multi-Winglets](#). In 43rd AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings. Reno, USA.
- [10] Blondeau, J., Richeson, J. & Pines, D. (2003). [Development and Testing of a Morphing Aspect Ratio Wing Using An Inflatable Telescopic Spar](#). In 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Norfolk, USA.
- [11] Ajaj, R. et al. (2013). [Variable Wing Span Using the Compliant Spar Concept](#). In 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Boston, USA.
- [12] Cala, J. et al. (2008). Diseño detallado de un planeador de alto rendimiento para instrucción. Trabajo de grado. Universidad de San Buenaventura, Bogotá.
- [13] Makhonine, I. (1933). [Airplane With Supporting Surfaces of Variable Area](#). Patent US1938148A. Paris, France.
- [14] Weisshaar, T. (2006). [Morphing aircraft technology-new shapes for aircraft design](#). Scientific Report: RTO-MP-AVT-141 - Multifunctional Structures/Integration of Sensors and Antennas. NATO: Germany.
- [15] Harwood, R. (1975). [New Sailplanes](#). Sailplane & Gliding 26(5), pp. 198-202.
- [16] Lert, P. (1976). [The fs-29, a Telescoping-wing Sailplane](#). Soaring 40(1), pp. 21-27.
- [17] Thomas, F. (1999). [Fundamentals of Sailplane Design](#). Georgia: College Park Press.
- [18] Frati, S. (1946). [The Glider](#). Milano: Ulrico Hoepli Milano.
- [19] Jobe, C. (1984). [Prediction of Aerodynamic Drag](#). Technical Report AFWAL-TM-84-203. Air Force Wright Aeronautical Laboratories.
- [20] Feagin, R. & Morrison, W. (1978). [Delta Method, an Empirical Drag Buildup Technique](#). Technical Report NASA-CR-151971. NASA.
- [21] Anderson, J. (1999). [Aircraft Performance and Design](#). USA: McGraw-Hill.
- [22] FAA (1975). [Aviation Weather for Pilots and Flight Operations Personnel](#). USA: Federal Aviation Administration.
- [23] Milgram, J. (2005). [Climb Performance and Handicapping](#). Skylines 2005, pp. 2-6.
- [24] Pajno, V. (2006). [Sailplane Design: A guide for students and designers, From drafting to flight test](#). Varese: Macchione Editore.

18. Optimal power spectrum in the multisine experiment design

Daniel Agudelo N.¹

Piotr Lichota²

¹Universidad de San Buenaventura. Bogotá, Colombia

²Warsaw University of Technology. Varsovia, Polonia

1. Introduction

System identification (Sys-ID) is a method used to develop mathematical models that describes the dynamic characteristics of a system, from observations or measurements of input signals and output behavior of the system under test. Model control surface surfaces must be excited in order to take the aircraft out from its equilibrium state. Then the airplane response can be observed and quantified. Generally, an entire flight test program is dedicated to obtain such information. This results in a time and money consuming procedure. Nowadays, new techniques are being developed which allow engineers to plan a maneuver with simultaneous excitations of the control surfaces, by optimizing the control deflections. Recent methods generate more accurate results than Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations or wind tunnel test in terms of aerodynamic derivatives prediction. Latest Sys-ID multisine excitations methods deal with the real scale object performing at real operational environment [1-7].

For a better parameter estimation on the basis of multisine signals, small perturbations are preferred in order to keep the airplane as close as possible to its equilibrium state so that the pilot cannot differentiate the airplane typical response to a turbulence from the reaction to perturbations [8-10]. Schroeder [11] developed a mathematical model that proved that a sum of phase-shifted sinusoids can provide an input control signal with low peak factor and a good frequency content. The mentioned peak factor is a measure of the ratio of maximum input amplitude to the input energy magnitude. Low peak factor inputs are necessary because they provide good frequency content while giving low amplitudes in the time domain. An estimation of the operating frequencies of the model is required to perform accurate calculations [4-6].

By using 4-M methodology from a given input and an output, the system dynamic characteristics can be estimated. Regularly during the studies, the airplane is assumed to be a rigid body. Forces and moments acting on it arise from aerodynamics and propulsion characteristics. Identification methods from flight data present several advantages over wind tunnel tests and CFD techniques. Complex maneuvers can be replicated and response can be recorded. Wind tunnels test and CFD methods present limitations on this kind of maneuvers representation [12]. All gathered information can support flight simulators design. Moreover, for early design stages it becomes an important methodology as it allows to verify airplane specifications compliance in new designs [2, 13, 14].

2. Simultaneous multisine inputs design

Three set of deflections sequences were created for the study. Different configurations were taken into account with and without a-priori knowledge containing system dynamics properties. The multisine control signals where calculated by the use a Matlab script. In the study the SIDPAC set of Matlab functions was used [5]. The script can generate multiple orthogonal phase-optimized multisine sweep inputs. Each set of data

has minimized relative peak factor for an established power spectrum in the designated frequency range.

The range of the frequencies of the sinusoidal components can be defined, if not, program uses the maximum frequency resolution. In order to obtain finer frequency resolution, the time length should be increased. This leads to obtain a richer and smoother power spectrum for the chosen frequency band [15, 16]. Multiple inputs that are mutually orthogonal in both time and frequency domain can be generated. By default, the program uses flat and uniform power spectrum unless the user specifies different arrangement. Elements in each column of the power spectrum represent a portion of the total power for the corresponding component sinusoid, defined either by default or by the user. Phase angles are adjusted to begin and ends at zero value for each sweep. This implements a perturbation input [2, 5, 17, 18].

2.1 First case: Uniform Power Spectrum

For this case, aircraft dynamics information was not available to compute the orthogonal multisine control vector. Furthermore, a uniform distributed power spectrum was used along the airplane selected frequency range as set in Table 1. A mutually orthogonal harmonically related multisine inputs with minimized peak factor was obtained. The control vector u consists of the sum of harmonic sinewaves which have individual amplitudes A_k and phase shift angles ϕ_k as follows (equation 1) [4, 6].

$$u = \sum_{k=1}^M A_k \sin(2\pi f_k t + \phi_k) \quad (1)$$

Where ϕ_k from $k=1$ to M are consecutive harmonic frequencies and t is the time.

Table 1. First case input data

Symbol	Variable	Value
A	Amplitude	1.2 deg
f_{min}, f_{max}	Minimum and maximum frequency	0.05Hz and 2Hz
dt	Sampling interval	0.02s
T	Time length	20s
m	Number of signals to generate	2
f_u	Frequencies for each input	Default
pwr	Power spectrum for each input	Default (Uniform)

In this study, a vector fu was set as an input for the excitations. It contains the harmonic frequencies that were assigned to each control surface. Only ailerons and rudder were analyzed. In order to obtain mutually orthogonal inputs, it was required to assign different harmonics to each flight control. For ailerons $f_0, 3f_0, 5f_0...$ were assigned and $2f_0, 4f_0, 6f_0...$ for the rudder. This distribution gives orthogonality in frequency domain as distinct spectral lines compose the frequency content of each input. Regarding the time domain, orthogonality is achieved by the orthogonality properties of the sine function [6, 19-21].

The range of frequencies was set from 0 to 2 Hz which is typical for a large aircraft [22]. Time for the control surfaces excitation was set to 20 seconds. The maneuver lasted for 40 seconds. A total number of 40 harmonics was analyzed. For this case, the Power Spectrum magnitude was defined as constant along the frequency range. The phase shift angles ϕ_k for each control surface were calculated to increase the efficiency of the input signal. An input with maximum energy and minimum amplitude range means the solution has a low Relative Peak Factor (RPF) calculated with equation (2) [4-6].

$$RPF(u_j) = \frac{\max(u_j) - \min(u_j)}{2\sqrt{rms}(u_j)} \quad (2)$$

Where $j=1$ corresponds to ailerons and $j=2$ to rudder.

The initial values for the phase shift angles were calculated by using the equation (3) developed by Schroeder [11].

$$\phi_{j,k} = \phi_{j,k-1} + 2\pi(f_{j,k-1} - f_{j,k}) \frac{k-1}{M_j} T \quad (3)$$

Control surfaces deflections vector must start and finish with zero value to keep and return the airplane at equilibrium before and after the maneuver. For this reason, obtained signals were shifted on time. For all the signals excitation started at 10 seconds and lasted for 20 seconds. Table 1 shows the excitations inputs. Output variables are listed in the Table 2. RPF and orthogonal multisine control vector u are the most important output data for the purposes of this study.

Table 2. Matlab script output data

Symbol	Variable
u	Orthogonal multisine sweep(s)
t	Time vector
pf	Relative peak factor(s)
f	Frequencies of harmonic components, Hz
M	Number of harmonic components for each column of u
ph	Phase angles of harmonic components, rad
u	Orthogonal multisine sweep(s)

After calculations, control vector and relative peak factor for each excitation were obtained. Figure 1 presents the computed control vector for ailerons and rudder. Deflections are presented in degrees as a function of the time.

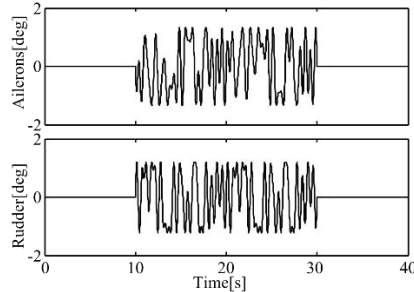


Figure 1. Orthogonal multisine control vectors for first case

2.2 Second case: Non-uniform Power Spectrum

This case was designed on the basis of a-priori knowledge obtained from the steady-state matrix formulation. The state-space continuous time representation of a linear, time-invariant deterministic system can be expressed with equation (4)[2].

$$\dot{X}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4)$$

Where A is the stability matrix and B is the control matrix. Usually, the input u is composed by real numbers as well as the state x matrix which varies with the time [2]. Information contained in both the stability matrix and the control matrix were obtained from data that describes the airplane under study [23].

The matrix eigenvalues were determined and specific period and frequency were calculated. The obtained frequency magnitude was 0.13 Hz. This frequency is of special interest because it is assumed that more information related to the aircraft derivatives is stored there. Increasing the applied power at such frequency can improve the accuracy of

the Sys-ID results. The nearest frequencies for both the ailerons and rudder were chosen to increase the magnitude of the power spectrum by 20%.

Using the non-uniform power spectrum as an input the orthogonal multisine control vectors were determined. Figure 2 shows the signals for both ailerons and rudder as a function of time. Similar to the previous case, the input signals were shifted and deflections started in 10th second and lasted for 20 seconds.

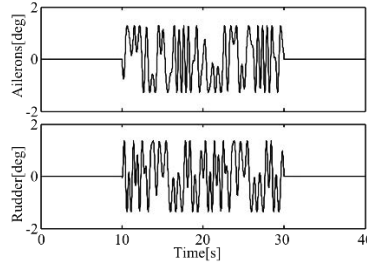


Figure 2. Orthogonal multisine control vectors for second case

2.3 Third case: Non-uniform optimized Power Spectrum

For this case, the RPF was optimized. A genetic algorithm was used to achieve its minimization. The next procedure was applied to obtain the control vector for the optimized case. Marchand method was used to evaluate aircraft a-priori information in terms of derivatives. From the available information Bode plots were obtained for lateral and directional derivatives. They were computed for the rolling moment L , the yawing moment N and the lateral force Y for both ailerons and rudder. Figure 3 shows Rolling Moment Bode plot for aileron.

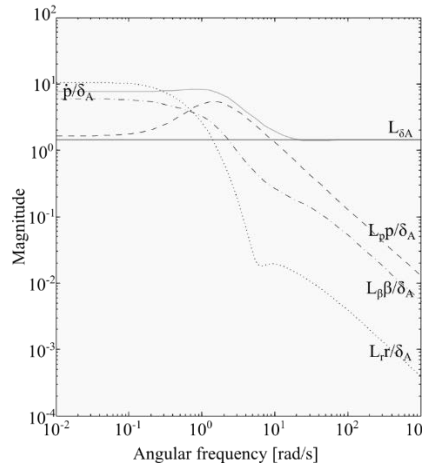


Figure 3. Rolling Moment Bode plot for aileron deflection

From the Bode plots it was determined frequency ranges at which is more suitable to obtain accurate information from the performed maneuvers. A ponderation was developed in the frequency domain. A threshold for the magnitude of the weighting factors was established as the order of one decade below in the logarithm scale. The maximum range in the plot was determined along the range of the frequencies under study (0 to 2 Hz) from the graphs and corresponding magnitudes of each plotted magnitude. A ponderation was assigned from the calculated differences. The lower the difference, the higher the assigned ponderation. For each control surface the obtained ponderation distribution was assigned to 20 harmonic frequencies that compose the power spectrum as shown in Figures 4 and 5.

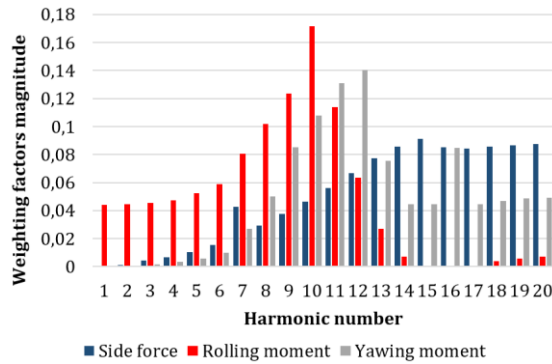


Figure 4. Power spectrum ponderations for Ailerons

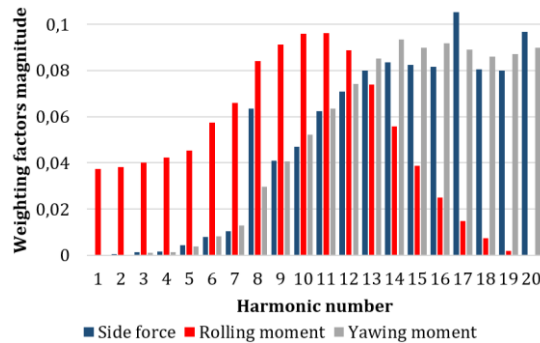


Figure 5. Power spectrum ponderations for Rudder

Weighting factors were added for each control surface and then normalized such as the sum of all the power spectrum components is equal to one. Figure 6 presents the reference power spectrum for both the ailerons and rudder.

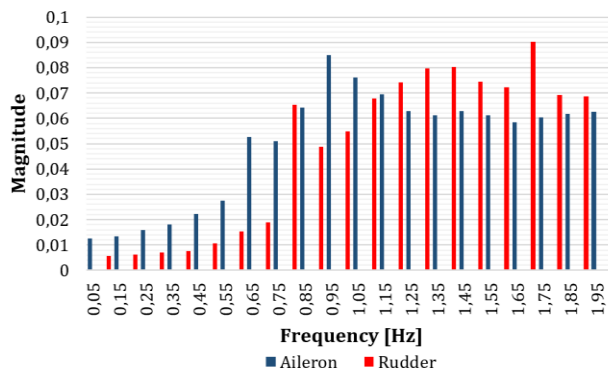


Figure 6. Reference Power Spectrum

Figure 6 shows that the more precise information from the model can be obtained near the middle of the frequency range. Regarding the Ailerons, at lower frequencies the gathered information is less accurate for the identification process. For the rudder, the graph shows that at low frequencies the obtained information is less relevant to the identification process. Information acquired at high frequencies is more accurate for the purpose of the study for both control surfaces.

An optimization process was conducted in order to obtain the third case solution. 50 individuals were randomly created as the initial population. Each of them was represented by a power spectrum distribution. Twenty features determine their individual characteristics and each one corresponds to an individual harmonic in the

power spectrum matrix. Features were coded with binary numbers (genes). Chromosomes were converted into decimal scale and multiplied by weighting factors contained in the reference power spectrum in order to include the a-priori knowledge.

Evolutionary method was chosen because it can describe and optimize the characteristics of the model under study. Among available methods, Genetic Algorithm (GA) was selected. It is a natural selection based process. It can generate solutions using techniques inspired by natural evolution, such as mutation, selection and crossover.

After the individuals were created the selection principle was applied to the calculated population by using a criterion. Roulette Wheel Selection (RWS) method was used for this task. RWS works on the basis of the evaluation of a fitness function. Probability of parenthood is proportional to individual fitness. For this specific case, low RPF magnitude were desired among the analyzed population. Individuals with a low RPF presented more chances to be selected for recombination and produce the next offspring. Method was applied in order to select well suited individual and produce pairs. RPF was obtained from the evaluations carried for each excitation, which means that 50 solutions were computed. Afterward, RWS process was performed in order to obtain parents that will produced the best individuals for the next generation.

Crossover process was performed by mixing the genes between the parents. Conventional crossover process consists on genes exchange between two chromosomes chains. For instance, from the first couple, two offspring were obtained by changing the odd genes between their chromosomes as shown in the Figure 7. Procedure was repeated for the other selected couples.



Figure 7. Uniform crossover

The obtained population replaced the previous one and the process was repeated 50 times. In order to introduce more diversity and uncertainty in the population, a mutation operator was added during the process which changed some elements on the DNA during the combination [1]. This was performed by creating a random vector which contains numbers from zero to one. A threshold of 0.95 was set for the mutation. After the last generation calculation, the individual with the lowest RPF was selected to produce the orthogonal multisine control vector u . Results are shown in Figure 8 which illustrates the power spectrum distribution of individuals with the lowest RPF among the total population obtained after 50 generations for ailerons and rudder.

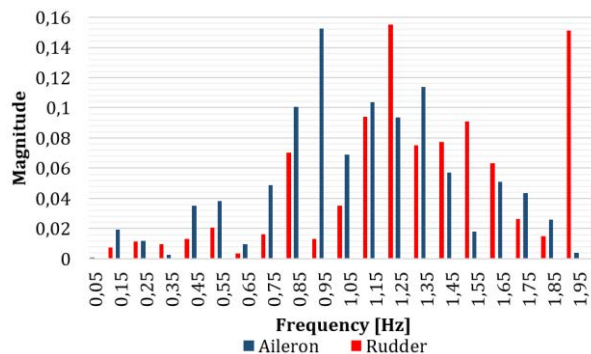


Figure 8. Optimized Power Spectrum

Using the power spectrum distribution, the orthogonal multisine control vectors were determined and the input signals are presented in Figure 9 for both ailerons and rudder.

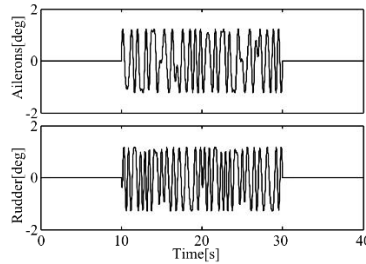


Figure 9. Input signals for the Optimized Power Spectrum

3. Model excitation

The main purpose of this project was to identify aerodynamic parameters from a non-linear aircraft model. Two-point non-linear aircraft model with time delays and cross coupling derivatives model was used. Additional effects like unsteady aerodynamics, ground effect or changes in the mass along the flight time can be set up as well. Nevertheless, during the performed maneuvers those effects were neglected to simplify the computations and data analysis.

Applying the control vectors obtained before to the aircraft non-linear model, several parameters were recorded in order to perform the Sys-ID process. For each case, side slip angle, roll rate, yaw rate, bank angle and lateral acceleration was recorded among the time. Side slip angle responses for the three cases are presented next (Figures 10 to 12).

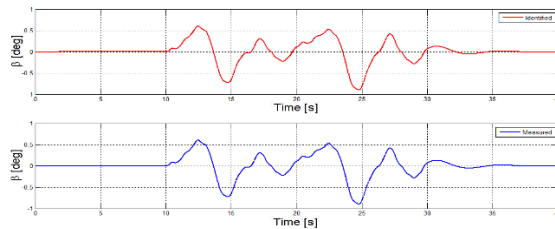


Figure 10. Aircraft side slip angle response to first excitation

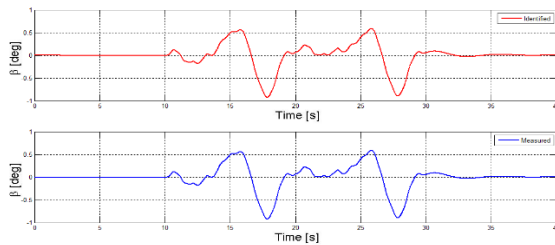


Figure 11. Aircraft side slip angle response to second excitation

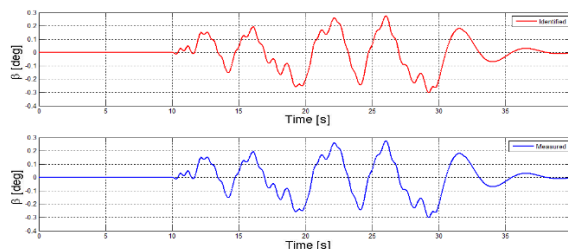


Figure 12. Aircraft side slip angle response to third excitation

Flight parameters denoted by red lines were estimated from the results. By the other hand, the object response represented by blue lines came from the measurements obtained from the model under excitation. For all the showed parameters an almost ideal match between the measurements and the estimations was obtained.

In general, it can be noticed that for the third case after applying the control surfaces deflections, the airplane takes more time to return to the equilibrium state. In some parameters it takes more than 20 seconds to return to a zero value measurement. However, after 20 second, the difference between the parameter magnitude and the zero value is small. Time to return to equilibrium is still very short when compared to typical multi-step inputs.

4. Model identification

After performing the maneuvers, recorded data was used to estimate selected aircraft aerodynamic coefficients using Output Error Method and Maximum Likelihood Principle [3, 4, 24-26]. Flight parameters usually used in aircraft Sys-ID process are:

- Linear and angular velocities
- Linear and angular accelerations
- Aerodynamic angles
- Attitude angles
- Flight surfaces deflections
- Engine characteristics

For developing the mathematical model, it was assumed that the airplane was flying at a constant velocity during cruise flight segment, with an engine running at constant regimen providing constant thrust force magnitude. Furthermore, due to the short maneuver time, it was assumed that no significant fuel amount was burned in such period. Besides, the aircraft was treated as a rigid body, for which inertia characteristics were not affected by control surfaces deflections. The airplane had a vertical symmetry plane in terms of mass and geometry. As the experiment should be performed in good weather conditions it was assumed that the turbulence effects can be omitted.

After performing aircraft identification procedure, obtained data was compared with values acquired from flight tests [23, 27] and relative error e for each aerodynamic coefficient was calculated by the equation (5).

$$e = \frac{\hat{\theta}_i - \theta_i}{\theta_i} \quad (5)$$

Where θ_i are aerodynamic derivatives and hat symbol denotes estimates. For the three cases the system parameters were identified. The results are listed in the Table 3 in terms of the relative error when compared to data obtained from experimentation. From the Table 3 it can be seen that the majority of the aerodynamic derivatives were estimated with high accuracy. A relative error higher than 10% was obtained only for cross-coupling related derivatives. The error magnitude for those parameters obtained from the third case (maneuver with non-uniform optimized power spectrum) was the lowest and can be consider as acceptable. In the experiment the elevator deflection was not considered. In the future to increase the accuracy of the estimation, elevator must be excited during the proposed maneuver.

Figures below show the relative error for each case. From the Figure 13, it is noticeable that three identified derivatives are far from the general tendency in terms of the relative

error magnitude. The first is the dimensionless side force coefficient with respect to the dimensionless roll rate derivative CY_p , the derivative of the dimensionless side force coefficient with respect to the dimensionless pitch rate change due to the angle of attack $CY_{p\alpha}$ and the derivative of dimensionless yawing moment coefficient with respect to the dimensionless pitch rate change due to the angle of attack $Cn_{r\alpha}$. Last two derivatives are related to the change of the angle of attack of the model. To identify them in a proper way, rudder and elevator should be deflected at the same time. They could not be estimated accurately because elevator deflection was not taken into account for the designed maneuvers and CY_p usually is a small term which can be neglected. For all the three derivatives, the third case presented the lowest relative error magnitudes among the conducted tests.

Table 3. Relative error for the three cases

Derivative	Case 1	Case 2	Case 3
CY_β	0,0025%	0,0042%	0,0158%
CY_p	17,0660%	16,4125%	13,3940%
$CY_{p\alpha}$	7,8759%	6,3520%	6,2722%
CY_r	3.9604%	4.3027%	0.7459%
$CY_{r\alpha}$	58.2989%	63.3774%	11.1381%
CY_ζ	0.0403%	0.0061%	0.0200%
Cl_β	0.0036%	0.0036%	0.0036%
Cl_p	0.0177%	0.0677%	0.0500%
$Cl_{p\alpha}$	0.7112%	3.2615%	0.7919%
Cl_r	0.5391%	0.1594%	0.5545%
$Cl_{r\alpha}$	2.1113%	0.5980%	0.9157%
Cl_ξ	0.0039%	0.0040%	0.0109%
Cl_ζ	0.0034%	0.0038%	0.0025%
Cn_β	0.0050%	0.0050%	0.0125%
Cn_p	0.5227%	2.1487%	0.5920%
$Cn_{p\alpha}$	0.6605%	2.6968%	0.3787%
Cn_r	1.3088%	1.1353%	0.2676%
$Cn_{r\alpha}$	19.7729%	17.0096%	5.0291%
Cn_ξ	0.0064%	0.0092%	0.0100%
Cn_ζ	0.0045%	0.0045%	0.0018%

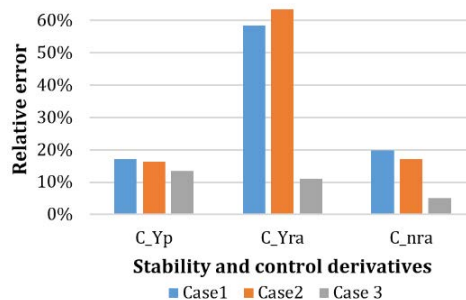


Figure 13. Relative error for calculated derivatives

Due to the differences in the order of magnitude, several plots must be presented and the Y axis scale redefined in order to visualize the smallest values of the relative error as seen in Figure 14. The dimensionless side force coefficient with respect to the dimensionless roll rate change due to the angle of attack derivative $CY_{p\alpha}$ presented a higher error compared to the other values. This derivative depends on the angle of attack and because of the scope of this study, it was less accurately predicted. The dimensionless side force coefficient with respect to the dimensionless yaw rate derivative CY_r relative error presents values near 4% for the first and second tests. For the third test, the error

magnitude was dramatically reduced below 1%. For the dimensionless rolling moment coefficient with respect to the dimensionless pitch rate change due to the angle of attack derivative $Cl_{p\alpha}$ the obtained relative error seemed to be the same for the first and the third cases. Second case control vector allowed to identify such parameter with slightly less quality.

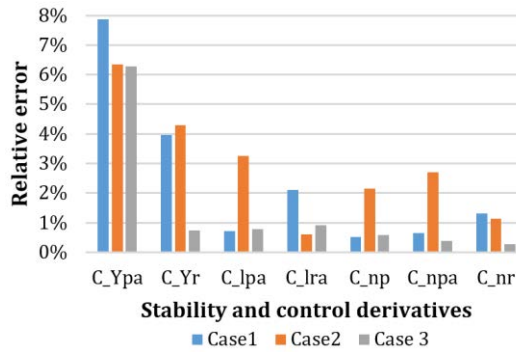


Figure 14. Relative error for calculated derivatives

Dimensionless rolling moment coefficient with respect to the dimensionless yaw rate change due to the angle of attack derivative $Cl_{r\alpha}$ presented the highest magnitude of the relative error for the first experiment. The second configuration presented the lowest error. Dimensionless yawing moment coefficient with respect to the dimensionless roll rate derivative Cn_p obtained the highest error magnitude for the second test. The first and the third cases presented error magnitude near 0.5%. Dimensionless yawing moment coefficient with respect to the dimensionless pitch rate change due to the angle of attack derivative $Cn_{p\alpha}$ was less accurately predicted in the second experiment. On the other hand, in the third one the most accurate result was achieved. Dimensionless yawing moment coefficient with respect to the dimensionless yaw rate derivative Cn_r presented a relative error lower than 0.3% in the third experiment. For this mentioned derivatives, the second case shows remarkable inaccuracies in the prediction of the dimensionless moment coefficients and roll rate related derivatives, but one should have in mind that those errors are small and acceptable. However, side force derivative related to the roll rate did not present the same tendency.

Figure 15 presents the results for the dimensionless rolling moment coefficient with respect to the dimensionless yaw rate derivative Cl_r . It can be noticed that during the second experiment the relative error is the lowest. The outcome from the first and the third experiments is almost the same close to 0.5%.

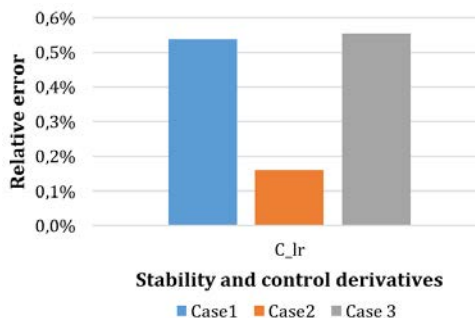


Figure 15. Relative error for calculated derivatives

Figure 16 includes the results for the dimensionless side force coefficient with respect to ailerons deflection derivative CY_z (CY_{zeta}). In the first experiment highest relative error

magnitude was obtained, while the second excitation achieved the most accurate prediction. The dimensionless rolling moment coefficient with respect to the dimensionless roll rate derivative Cl_p was most accurately estimated within the first experiment. In the second one, relative error magnitude was bigger.

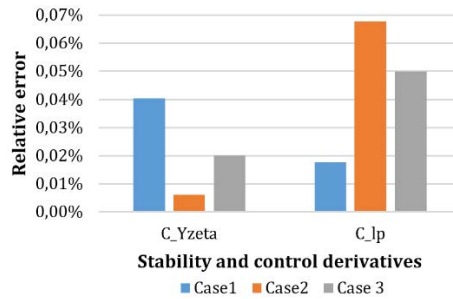


Figure 16. Relative error for calculated derivatives

Figure 17 presents the most accurate estimations achieved during this investigation. The order of the relative error for these derivatives is less than 2×10^{-2} percent. The dimensionless side force coefficient with respect to the sideslip angle derivative CY_β was better predicted during the first maneuver set while the third test result is the less accurate. The dimensionless rolling moment coefficient with respect to the sideslip angle derivative Cl_β relative error gave almost the same result independently of the maneuver design. For the dimensionless rolling moment coefficient with respect to rudder deflection derivative Cl_ξ (Cl_{ksi}) the first and second experiment predicted its magnitude more accurate than the third configuration.

The dimensionless rolling moment coefficient with respect to ailerons deflection derivative Cl_ζ was better predicted during the optimized case. The dimensionless yawing moment coefficient with respect to the sideslip angle derivative Cn_β does not present an accurate solution for the third case when compared with the previous two tests. Similar results were obtained for the dimensionless yawing moment coefficient with respect to rudder deflection derivative Cn_ξ . However, for the dimensionless yawing moment coefficient with respect to ailerons deflection derivative Cn_ζ the lowest relative error of all the performed measurements was obtained from the third maneuver set.

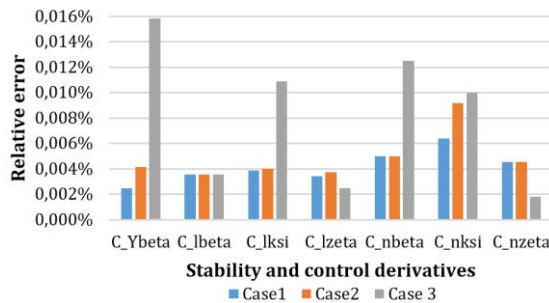


Figure 17. Relative error for calculated derivatives

In general, 9 out of 20 estimated derivatives, almost 50% of the analyzed data, were better estimated from the third experiment among the three used configurations. For the first case, 7 out of 20 derivatives and for the second test a number of 3 were better predicted. Looking for the highest relative error magnitude, case 3 presents 5 hints, while cases 1 and 2 presented 7 each one. In general, the derivatives related to the dimensionless roll moment coefficient were highly accurately predicted during all the maneuvers patterns. These results show that the optimization of the power spectrum

from a-priori aircraft control and stability information, led to a better derivatives estimation when validated with experimental results.

5. Conclusions

During the study, three set of maneuvers were performed in order to estimate lateral-directional stability and control derivatives. For those maneuvers the ailerons and rudder were deflected simultaneously. The first maneuver was based on uniform power spectrum distribution to calculate orthogonal multisine inputs. Second and third tests were based on non-uniform energy distributions. For the second test the state matrix eigenvalues were used as the a-priori knowledge.

For the third configuration and optimization was performed based on genetic algorithm. Weighting factors were obtained from Marchand method to compute a non-uniform reference power spectrum. A-priori knowledge was introduced in terms of derivatives. During the algorithm computations a mutation factor was added to introduce more diversity to the population. RPF was used as the cost function.

The uniform power spectrum (test 1) allowed better results than the non-optimized non-uniform power spectrum (test 2) in terms of the estimated aerodynamic coefficients. Nevertheless, the optimized non-uniform power spectrum (case 3) presented the most accurate estimations based on the relative error magnitude.

Results from the non-uniform non-optimized energy distribution (test 2) show that increasing the amount of energy to the selected frequencies was less advantageous to obtain accurate information. Tests conducted for uniform (test 1) and optimized non-uniform power spectrum (test 3) presented similar power magnitude at high frequency range, for both ailerons and rudder. This similarity produced results with alike relative error magnitude from the identification procedure.

Genetic algorithm optimization permitted to obtain a solution with a low relative peak factor magnitude. The a priori information had a strong influence in the computed power spectrum distributions. Marchand method allowed to obtain accurate results due to the aircraft stable behavior after the model excitation.

Acknowledgment

This work has been supported by the European Union in the framework of European Social Fund through the “Didactic Development Program of the Faculty of Power and Aeronautical Engineering of the Warsaw University of Technology” as well as the Universidad de San Buenaventura in Colombia.

References

- [1] Lichota, P., Rogowski, K. & Maronski, R. (2015). [Simultaneous harmonic multisine excitations design with a priori knowledge of aerodynamic derivatives](#). 6th International Conference on Experiments/Process/System Modelling/Simulation/Optimization. Athens, Greece.
- [2] Klein, V. & Morelli, E. (2006). [Aircraft System Identification. Theory and Practice](#). Blacksburg: AIAA Education Series.
- [3] Escobar, J. et al. (2015). [Detached-Eddy simulation of a wide-body commercial aircraft in high-lift configuration](#). Journal of Aircraft 52(4), pp. 1112-1121.
- [4] Morelli, E. (2003). [Multiple input design for real-time parameter estimation in the frequency domain](#). 13th IFAC Conference on System Identification. Rotterdam, The Netherlands.
- [5] Morelli, E. (2002). [System Identification Programs for Aircraft \(SIDPAC\)](#). AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference. Monterrey, USA.

- [6] Morelli, E. (2012). [Efficient Global Aerodynamic Modeling from Flight Data](#). 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Aerospace Sciences, Nashville, USA.
- [7] Hamel, P. & Jategaonkar, R. (1996). [Evolution of flight vehicle system identification](#). Journal of Aircraft 33(1), pp. 9-28.
- [8] Morelli, E., Derry, S. & Smith, M. (2005). [Aerodynamic parameter estimation for the X-43A \(Hyper-X\) from flight data](#). AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. San Francisco, USA.
- [9] Morelli, E. (2009). [Flight test experiment design for characterizing stability and control of hypersonic vehicles](#). Journal of guidance, control and dynamics 32(3), pp. 949-959.
- [10] Gevers, M. (2005). [Identification for control: From the early achievements to the revival of experimental design](#). European Journal of control 11(4-5), pp. 335-352.
- [11] Schroeder, M. (1970). [Synthesis of Low-Peak-Factor Signals and Binary Sequences with Low Autocorrelation](#). IEEE Transactions on Information Theory 16(1), pp. 85-89.
- [12] Jimenez, P. & Agudelo, D. (2015). [Validation and calibration of a high resolution sensor in unmanned aerial vehicles for producing images in the IR range utilizable in precision agriculture](#). AIAA Infotech @ Aerospace. Kissimmee, USA.
- [13] Morelli, E. (2012). [Flight test maneuvers for efficient aerodynamic modeling](#). Journal of aircraft 49(6), pp. 1857-1867.
- [14] Morelli, E. & Smith, M. (2009). [Real-time dynamic modeling: data information requirements and flight-test results](#). Journal of aircraft 46(6), pp. 1894-1905.
- [15] Levadi, V. (1966). [Design of input signals for parameter estimation](#). IEEE Transaction on Automatic Control 11(2), pp. 205-211.
- [16] Goodwin, G. & Payne, R. (1977). [Dynamic System Identification: Experimental Design and Data Analysis](#). New York: Academic Press.
- [17] Lichota, P. & Agudelo, D. (2016). [A priori model inclusion in the multisine maneuver design](#). 17th International Carpathian Control Conference. Tatranska Lomnica, Slovakia.
- [18] Kalaba, R. & Springarn, K. (1982). [Control, Identification, and Input Optimization](#). New York: Plenum Press.
- [19] Jategaonkar, R. (2006). [Flight vehicle system identification: A time domain methodology](#). Germany: AIAA.
- [20] Illif, K. & Maine, R. (1986). [Bibliography for Aircraft Parameter Estimation](#). NASA Technical Memorandum 86804.
- [21] Morelli, E. (2000). [Real-time parameter estimation in the frequency domain](#). Journal of guidance, control and dynamics 23(5), pp. 812-818.
- [22] Jategaonkar, R. (1991). [Determination of aerodynamics characteristics from ATTAS flight data gathering for ground based simulator](#). NASA Technical Report DLR-FB 91-15.
- [23] Lichota, P. & Ohme, P. (2014). [Design and analysis of the new multi axis input maneuvers for aircraft Sys-ID](#). Monograph DLR IB 111-2014/46. Institute of Flight Systems.
- [24] Milliken, W. (1947). [Progress in Dynamic Stability and Control Research](#). Journal of the Aeronautic Sciences 14(9), pp. 494-519.
- [25] Forssell, U. & Ljung, L. (1998). [Identification for control: some results on optimal experiment design](#). Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control (pp. 3384-3389). Tampa, USA..
- [26] Barenthin, M. (2008). [Complexity Issues, Validation and Input Design for Control in System Identification](#). Ph.D Dissertation. KTH School of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden.
- [27] Lichota, P. (2016). [Inclusion of the D-optimality in multisine manoeuvre design for aircraft parameter estimation](#). Journal of theoretical and applied mechanics 54(1), pp. 87-98.

19. Estudio de los modelos de turbulencia aplicados a la aerodinámica externa de un automóvil, mediante software de dinámica computacional de fluidos

Rafael Cerpa
Eduardo Nieto
Lina Londoño

Universidad de San Buenaventura. Bogotá, Colombia

1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el proyecto de investigación ING010-015 avalado por la Universidad de San Buenaventura. Se presenta un estudio cuyo objetivo fue definir el método de convergencia más exacto utilizando software de dinámica computacional de fluidos en un automóvil concepto urbano, comparando dichos resultados con pruebas experimentales en el túnel de viento. El vehículo fue diseñado por el grupo de investigación AeroTech, teniendo en cuenta la reglamentación estipulada en la competencia Shell Eco-Marathon [1].

Los métodos de turbulencia Reynolds-Averaged Navier-Stokes RANS utilizados fueron Spalart Allmaras, $k-\epsilon$, $k-\omega$ y $k-kl-\omega$, debido a que no requieren demasiados recursos computacionales, tal como RSM y LES [10]. Para el desarrollo de las simulaciones se realizaron estudios previos de convergencia de malla [2], para determinar el número de nodos y el tipo de enmallado correcto para obtener simulaciones con gran precisión, menor uso de capacidad computacional y tiempo de simulación.

La Tabla 1 muestra el comportamiento de los modelos de turbulencia en simulaciones a través de software de dinámica de fluidos computacional [3].

Tabla 1. Comparación modelo de turbulencia

	Bajo Re	Alto Re	Convergencia	Pared cercana	Turbulencia	Curvatura línea de flujo	Flujos con vórtices	Separación capa límite	Recursos CPU
S-A	***	*	****	*	*	*	*	*	****
$k-\epsilon$	*	***	***	*	**	*	*	*	***
RNG $k-\epsilon$	**	***	***	*	**	*	**	**	***
Realizable $k-\epsilon$	**	***	***	*	**	**	**	**	***
$k-\omega$	***	**	**	**	***	***	**	**	***
SST $k-\omega$	***	**	**	*	***	***	**	***	***
$k-kl-\omega$	***	**	**	*	****	***	**	***	**
SST	***	***	**	**	****	***	**	***	**
RSM	***	***	*	**	****	***	***	***	*
LES	*	***	*	**	****	***	***	***	*

La escala en la Tabla 1 va de mejor (****) a menos apta (*). Los resultados obtenidos indican que el modelo S-A presenta una buena convergencia de malla usando menor cantidad de recursos computacionales. Este modelo no permite obtener datos de la energía cinética de turbulencia y es diseñado para geometrías simples con mallas gruesas. El modelo $k-\epsilon$ presenta mejor convergencia con números de Reynolds bajos y permite obtener resultados de la energía cinética de turbulencia utilizando pocos recursos computacionales, además de presentar menor cantidad de problemas de convergencia que el modelo S-A. El modelo $k-\omega$ es uno de los más afectados en su convergencia y utiliza mayor cantidad de recursos computacionales en comparación con los presentados anteriormente, se adapta para altos y bajos números de Reynolds, que es un valor dimensional utilizado para caracterizar el movimiento de un fluido relacionando su densidad, viscosidad, velocidad y dimensión característica. Finalmente, el modelo $k-kl-\omega$ es el más complejo de todos, porque incluye una alta cantidad de ecuaciones para la

solución del fenómeno de turbulencia; se utiliza para geometrías complejas cuando se presenta una elevada separación de la capa límite y es el modelo RANS que más recursos computacionales consume [8-10].

El estudio de los modelos de turbulencia se evaluará en relación con los resultados obtenidos del coeficiente de resistencia al avance, el cual es un parámetro inmerso dentro de la fuerza de resistencia aerodinámica producida por el vehículo. Esta fuerza es la que sufre un automóvil al moverse a través de un fluido, en dirección contraria a la velocidad relativa del vehículo respecto al medio [10]. Este coeficiente es el parámetro de estudio seleccionado porque su disminución producirá una reducción en la fuerza de resistencia aerodinámica producida por el vehículo. La ecuación (1) muestra la fórmula para el cálculo de la fuerza de resistencia al avance.

$$D = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot Cd \quad [10] \quad (1)$$

Donde:

D- Fuerza de resistencia al avance

ρ - Densidad

v- Velocidad

S- Área Superficial

Cd- Coeficiente de resistencia al avance

2. Estudio de los modelos de turbulencia

A continuación, se describe el proceso de generación de la simulación mediante software de dinámica computacional de fluidos y las pruebas experimentales desarrolladas en el túnel de viento. El objetivo es especificar los parámetros de operación del vehículo, el tipo de malla y volumen de control, para obtener los resultados del coeficiente de resistencia al avance causado por la carrocería externa del automóvil, por medio de simulaciones en el software ANSYS y su respectiva validación.

2.1 Pre-procesamiento

El primer paso en el desarrollo de un estudio mediante la utilización de software de dinámica computacional de fluidos, es la identificación del problema a resolver y luego se debe establecer qué resultados se desean obtener por medio de las simulaciones y el nivel de precisión estimado que se obtendrá. Al determinar dichas preguntas se inicia el pre-procesamiento del modelo, que incluye la creación de la geometría, volumen de control, condiciones de frontera, tipo de malla, proceso de enmallado y selección de los parámetros operación del componente. Las simulaciones se desarrollaron bajo las condiciones atmosféricas de la ciudad de Bogotá, que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de operación simulaciones

L (longitud)	3,009966	m
P (Densidad)	0,8878	kg/m ³
V (Velocidad)	5,462969761	m/s
M (Viscosidad)	1,78249E-05	kg/m.s
Presión de operación	74660	Pa
Temperatura	286,45	K

2.2 Enmallado y definición de las condiciones de frontera

El proceso inicia con la creación de la geometría externa del vehículo y su respectivo volumen de control y para generar un sólo volumen se debe extraer la geometría externa

del automóvil del volumen de control. El proceso de enmallado se explica en [2] y [3]. La geometría estudiada y la malla generada en la simulación se muestran en la Figura 1, donde la malla densa tiene un total de 2'417.638 nodos, con un Y^+ de 2,029, y la malla gruesa tiene una totalidad de 1'020.913 nodos con un Y^+ de 1,968. Es importante recalcar que para llegar a estas dos mallas se realizó el respectivo estudio de convergencia de mallas [4].

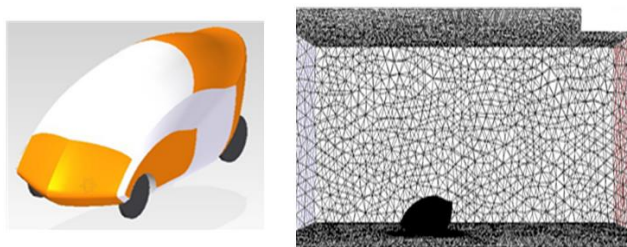


Figura 1. Geometría y Enmallado del vehículo [4]

2.3 Solucionador

Las simulaciones se desarrollaron en el software Ansys 15 y se llevaron a cabo bajo condiciones de flujo estable y transiente con los modelos de turbulencia RANS, con el fin de obtener el modelo más preciso en comparación con los resultados experimentales alcanzados en las pruebas en el túnel de viento.

Con el fin de resolver y obtener respuestas coherentes, es necesario dar parámetros de entrada al software lo más precisos posible de acuerdo con las características físicas de operación del componente. Inicialmente el software hace una integración a las ecuaciones que gobiernan el fluido a través del volumen de control, las sintetiza con el fin de resolverlas; estos resultados se encuentran por medio de un proceso de solución iterativo. Para cada modelo de turbulencia es necesario desarrollar una simulación propia, en este caso de estudio se determinaron 7000 iteraciones para flujo estable, un *time step* de 0,001 segundos y 7320 iteraciones para flujo inestable.

2.4 Resultados experimentales en el túnel de viento

Las pruebas en el túnel de viento se realizaron para obtener el coeficiente de resistencia de avance de la carrocería externa del automóvil. Las especificaciones se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones del túnel de viento

Fabricante	Sección de Prueba			Máxima Velocidad (m/s)
	Forma	Largo (l)	Alto (h)	
ELD	Rectangular	0,61	3,05	50

Para desarrollar estas pruebas fue necesario construir un modelo a escala del automóvil. Este prototipo fue escalado acorde al número de Reynolds de operación del vehículo [3]; su construcción se generó en un centro de mecanizado CNC utilizando icopor de alta densidad y para darle el acabado superficial a la superficie externa se aplicaron cinco capas de resina epóxica. El sistema de sujeción y el automóvil en la Figura 2.

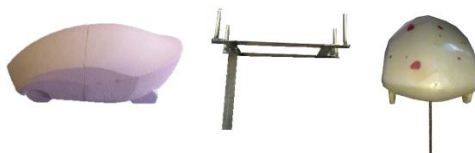


Figura 2. Modelo a escala automóvil [3]

Para determinar la cantidad de pruebas requeridas en el túnel de viento para obtener un correcto resultado del coeficiente de resistencia al avance, se aplicó el método experimental 2^k , donde el parámetro k incluye las siguientes variables: temperatura, humedad relativa y fuerza de resistencia al avance. Como resultado se obtuvo un valor de 2^3 , indicando que es necesario realizar ocho pruebas de toma de datos. La Figura 3 muestra una de las mediciones desarrollada en el vehículo. Las pruebas se desarrollaron en horas y días diferentes y para determinar el coeficiente de resistencia al avance se tuvo en cuenta: el área de la sección transversal del vehículo, densidad, velocidad y fuerza de resistencia al avance; adicionalmente, se tomaron mediciones de parámetros atmosféricos como presión, temperatura y humedad relativa. Una vez finalizadas las pruebas se calculó el valor promedio del coeficiente de resistencia al avance, incluyendo la corrección indicada en el método de turbulencia 2^k , dando como resultado 0,2517.

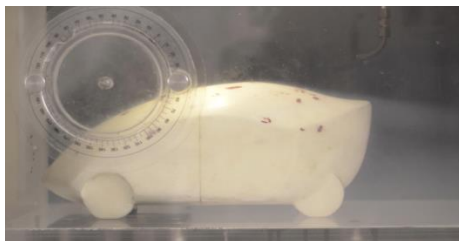


Figura 3. Pruebas en el túnel de viento

3. Análisis de resultados

Las Figuras 4 a 7 muestran los resultados del coeficiente de resistencia al avance (C_d) para los modelos de turbulencia S-A, $k-\epsilon$, $k-\omega$ y $k-kl-\omega$ [3, 4]. El primer resultado es la totalidad de iteraciones, o *flow time*, para los dos tipos de malla (fina y gruesa) con flujo estable; el segundo resultado solamente indica las últimas 300 iteraciones para los dos tipos de malla con flujo estable; el tercer resultado muestra la totalidad de iteraciones para los dos tipos de malla con flujo inestable; y el último indica las últimas 300 iteraciones para los dos tipos de malla con flujo inestable.

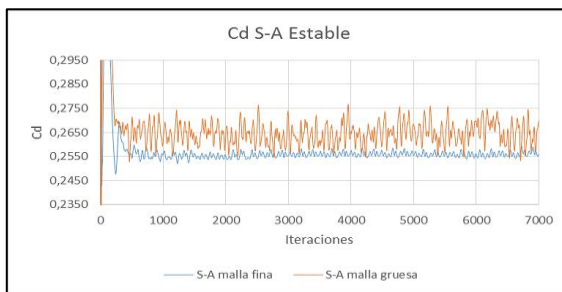


Figura 4. Coeficiente de resistencia con flujo estable para ambas mallas

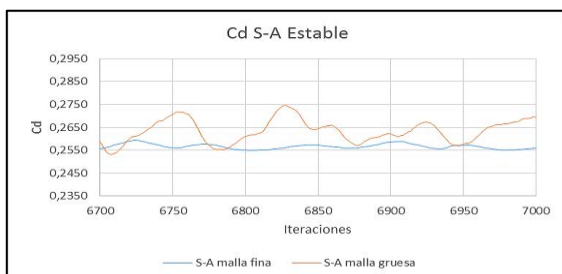


Figura 5. Coeficiente de resistencia para las últimas 300 iteraciones con flujo estable

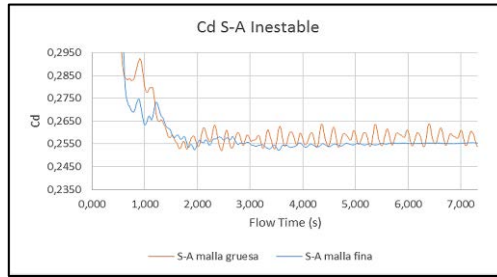


Figura 6. Coeficiente de resistencia con flujo inestable para ambas mallas

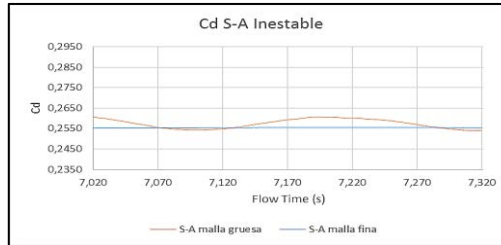


Figura 7. Coeficiente de resistencia para las últimas 300 iteraciones con flujo inestable

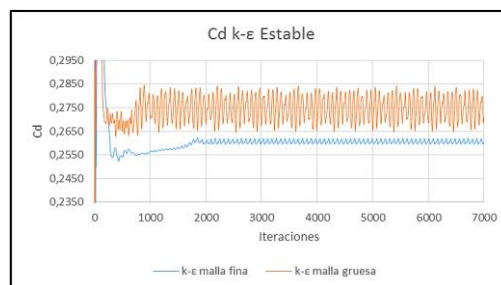
De acuerdo con estos resultados se puede determinar que el modelo Spalart Allmaras (S-A) no presenta una convergencia constante en flujo estable, mientras que para el flujo inestable tiene una estabilidad en la obtención de resultados. En la malla fina se evidencia que la respuesta del coeficiente de resistencia al avance converge a partir de 7,020 segundos, mientras que para la malla gruesa las ondulaciones son repetitivas.

Los resultados con mejor respuesta respecto de la convergencia y la estabilidad de la simulación, se obtuvieron con la malla fina en ambos casos de tipo de flujo. Los valores promedio de las últimas 300 iteraciones del coeficiente de resistencia al avance utilizando el modelo de turbulencia S-A, se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Coeficiente de resistencia al avance modelo de turbulencia S-A [3, 4]

Caso de estudio	Coeficiente de resistencia
Malla fina – flujo estable	0,2567
Malla gruesa – flujo estable	0,2633
Malla fina – flujo inestable	0,2555
Malla gruesa – flujo inestable	0,2573

En el modelo $k-\epsilon$ de la Figura 8 se observa un correcto comportamiento en la convergencia del coeficiente de arrastre; para el flujo estable, la malla gruesa presenta un patrón repetitivo, pero no está estabilizado totalmente, mientras que en la malla fina hay un patrón de oscilación definido desde la iteración 2800 hasta la 7000, aproximadamente. En el caso del flujo inestable, la malla gruesa tiene una oscilación con un patrón constante del valor del coeficiente de arrastre, que se presenta desde los 5 hasta los 7 segundos, mientras que la malla fina presenta una convergencia más estable.



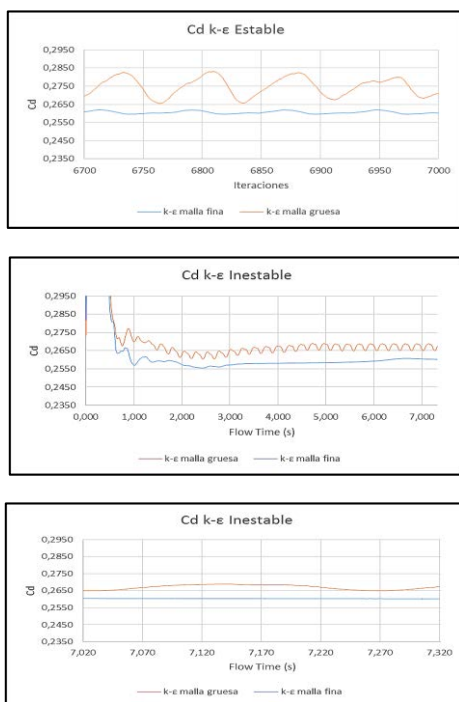


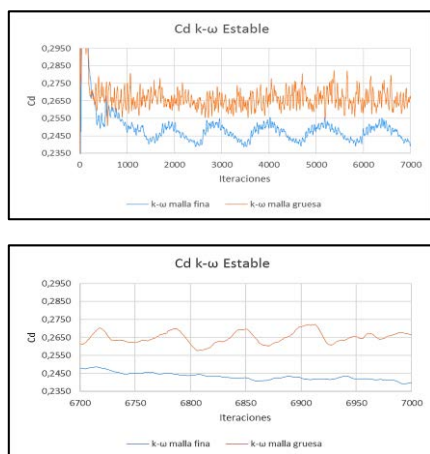
Figura 8. Coeficiente de resistencia al avance modelo $k-\epsilon$ [3, 4]

Los valores promedio de las últimas 300 iteraciones o *time steps* del coeficiente de resistencia al avance utilizando el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Coeficiente de resistencia al avance modelo de turbulencia $k-\epsilon$ [3, 4]

Caso de estudio	Coeficiente de resistencia
Malla fina – flujo estable	0,2606
Malla gruesa – flujo estable	0,2748
Malla fina – flujo inestable	0,2603
Malla gruesa – flujo inestable	0,2670

En el modelo $k-\omega$ se muestra en la Figura 9, donde se observa un patrón de oscilación que no se estabiliza en la malla fina del flujo estable, mientras que en la malla gruesa se puede determinar que tiende a converger; en las simulaciones de flujo inestable, tanto para la malla gruesa como para la malla fina, el valor del coeficiente de resistencia al avance permanece prácticamente constante en los últimos 300 *time steps*.



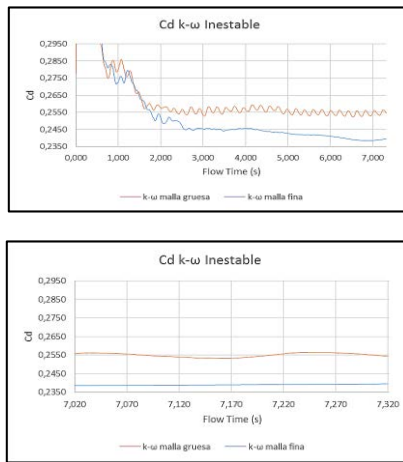


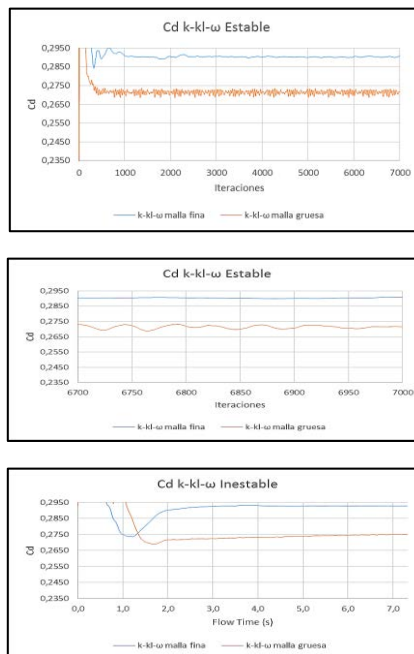
Figura 9. Coeficiente de resistencia al avance modelo $k-\omega$ [3, 4]

Los valores promedio de las últimas 300 iteraciones del coeficiente de resistencia al avance utilizando el modelo de turbulencia $k-\omega$ se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultado coeficiente de resistencia al avance modelo de turbulencia $k-\omega$ [3, 4]

Caso de estudio	Coeficiente de resistencia
Malla fina - flujo estable	0,2434
Malla gruesa - flujo estable	0,2650
Malla fina - flujo inestable	0,2390
Malla gruesa - flujo inestable	0,2550

Finalmente, para el modelo de $k-k\omega$ (Figura 10), se observa una mejor convergencia del coeficiente de arrastre, tanto para el flujo estable como para el inestable; en el primero, la malla fina converge porque no hay oscilación en los parámetros del coeficiente de resistencia al avance, sin embargo, la malla gruesa presenta oscilaciones no-repetitivas por lo que no se puede establecer si la respuesta ha convergido. En las simulaciones con flujo inestable se presenta una convergencia del resultado de estudio.



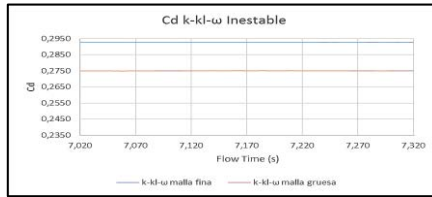


Figura 10. Coeficiente de resistencia al avance modelo k-kl- ω [3, 4]

Los valores promedios de las últimas 300 iteraciones del coeficiente de resistencia al avance utilizando el modelo de turbulencia k-kl- ω se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Coeficiente de resistencia al avance modelo de turbulencia k-kl- ω [3, 4]

Caso de estudio	Coeficiente de resistencia
Malla fina – flujo estable	0,2904
Malla gruesa – flujo estable	0,2714
Malla fina – flujo inestable	0,2927
Malla gruesa – flujo inestable	0,2750

Se puede observar en las gráficas de comparación del coeficiente de arrastre, entre los modelos de simulación estable (número de iteraciones) e inestable (tiempo), que el tamaño de la malla es determinante en la convergencia de las simulaciones. Porque dependiendo del tamaño de la malla, incrementa o disminuye la fluctuación de resultados del coeficiente de resistencia al avance; entre mayor número de nodos en la malla, la estabilización del fluido es mucho más exacta y con menos fluctuaciones, además, cuando una malla tiene mayor cantidad de nodos, cada celda tiene menor volumen, por lo que la cantidad de fluido en cada celda es menor. Por lo tanto, haciendo referencia al método de volúmenes finitos, disminuye la variación de los parámetros que se analizan por cada iteración, lo que explica por qué con una malla más fina se hace más estable la respuesta en la simulación.

Las simulaciones desarrolladas se realizaron bajo condiciones de flujo estable e inestable, debido a que la aerodinámica externa del vehículo eleva el valor de la magnitud velocidad; es posible determinar que, aunque las simulaciones bajo condiciones de flujo inestable requieren mayor recurso computacional y tiempo de simulación, presentan una mejor convergencia del resultado del coeficiente de resistencia al avance. Para las simulaciones en las que no se precisa una completa estabilización de los resultados, es indicado tener en cuenta el promedio de las últimas 300 iteraciones que se extrae del promedio entre el último 4% - 8% del análisis; este rango representa el comportamiento del flujo estabilizado [5, 6].

Para el cálculo del error de las simulaciones desarrolladas con los modelos de turbulencia RANS (S-A, k- ϵ , k- ω , k-kl- ω), bajo condiciones de flujo estable e inestable, se utilizó la ecuación (2). Los resultados de estos cálculos se muestran en las Tablas 8 y 9.

$$e = \frac{\text{Valor simulación} - \text{Valor experimental}}{\text{Valor experimental}} \cdot 100 \quad (2)$$

Tabla 8. Cálculo de error simulaciones con flujo estable [3]

	Flujo estable	
	Malla fina	Malla gruesa
S-A	1,99%	4,64%
k- ϵ	3,55%	9,21%
k- ω	3,30%	5,31%
k-kl- ω	15,39%	7,83%

Tabla 9. Cálculo de error simulaciones con flujo inestable [3]

	Flujo inestable	
	Malla fina	Malla gruesa
S-A	1,51%	2,24%
k-ε	3,43%	6,07%
k-ω	5,02%	1,64%
k-kl-ω	16,31%	9,26%

Los resultados mostrados en las Tablas 8 y 9 permiten determinar que los resultados obtenidos en las simulaciones, con respecto a los de las pruebas, arrojaron un error entre el 2% y el 17%, siendo el modelo de turbulencia Spalart Allmaras el más preciso utilizando una malla fina y condiciones de flujo inestable; por otro lado, el modelo k-kl-ω presentó los valores menos precisos, alcanzando un error del 16,31%.

Otro parámetro importante al desarrollar análisis de dinámica computacional de fluidos es el tiempo computacional que toma cada simulación; en este caso de estudio todos los análisis fueron realizados con el mismo software (Ansys 15) y con el mismo clúster de simulación, con el objetivo de determinar el costo computacional de cada modelo de turbulencia. Las Tablas 10 y 11 muestran el tiempo computacional requerido por cada uno de los modelos de turbulencia bajo condiciones de flujo estable e inestable con dos tipos de malla (gruesa y fina). En el caso de flujo estable (Tabla 10), el tiempo indicado es por cada iteración desarrollada por el software, mientras que en el flujo inestable (Tabla 11), el tiempo es por cada *step* calculado.

Tabla 10. Tiempo de simulación bajo condiciones de flujo estable [3]

Modelo	Flujo estable t(s)	
	Malla fina	Malla gruesa
S-A	3,03	1,14
k-ε	3,17	1,23
k-ω	3,41	1,47
k-kl-ω	5,12	2,01

Tabla 11. Tiempo de simulación bajo condiciones de flujo inestable [3]

Modelo	Flujo inestable t(s)	
	Malla fina	Malla gruesa
S-A	36,81	11,75
k-ε	33,75	11,81
k-ω	34,57	13,38
k-kl-ω	56,88	26,17

De acuerdo con los resultados indicados en las Tablas 10 y 11, se observa que el tiempo computacional es más elevado mientras más complejo sea el modelo de turbulencia; adicionalmente, en los casos simulados con la malla fina, tardará más el desarrollo de la simulación debido a que tiene mayor cantidad de nodos.

En el estudio de costos computacionales se puede determinar que los modelos Spalart Allmaras (S-A) y k - épsilon (k-ε) son los que menor tiempo computacional requieren, porque son los que menos ecuaciones introducen al modelo general de solución del programa (S-A una ecuación y k-ε dos ecuaciones).

De acuerdo con el objetivo de la investigación, que requería la obtención del modelo de turbulencia más acertado para desarrollar el estudio aerodinámico de la carrocería externa de un automóvil aplicado a la competencia *Shell eco-marathon* utilizando software de dinámica computacional de fluidos, se desarrollaron unas tablas de calificación de resultados (Tablas 12 a 14). En este estudio se tuvieron en cuenta los

siguientes parámetros de simulación: porcentaje de error entre los resultados arrojados por las simulaciones y las pruebas experimentales, convergencia de los resultados según tipo de malla, modelo de turbulencia y características del flujo, además del tiempo computacional consumido en las simulaciones. A los resultados de estos parámetros en cada simulación se les asignó una calificación entre 1 y 4: 1 indica menor precisión y mayor tiempo computacional, y 4 mayor precisión y menor tiempo.

Tabla 12. Calificación porcentaje de error resultados obtenidos en las simulaciones [3]

	Porcentaje de error			
	Flujo estable		Flujo inestable	
	Malla fina	Malla gruesa	Malla fina	Malla gruesa
S-A	4	4	4	3
k- ϵ	2	1	3	2
k- ω	3	3	2	4
k-kl- ω	1	2	1	1

Tabla 13. Calificación tiempo computacional requerido en las simulaciones [3]

	Tiempo computacional			
	Flujo estable		Flujo inestable	
	Malla fina	Malla gruesa	Malla fina	Malla gruesa
S-A	4	4	2	4
k- ϵ	3	3	4	3
k- ω	2	2	3	2
k-kl- ω	1	1	1	1

Tabla 14. Calificación convergencia del modelo de simulación [3]

	Convergencia del modelo			
	Flujo estable		Flujo inestable	
	Malla fina	Malla gruesa	Malla fina	Malla gruesa
S-A	2	2	3	1
k- ϵ	3	3	2	2
k- ω	1	1	1	3
k-kl- ω	4	4	4	4

Para la selección del método de turbulencia más adecuado para el desarrollo de las simulaciones, se asignó el siguiente porcentaje de importancia a los parámetros de comparación utilizados:

- Porcentaje de error entre resultados obtenidos en las simulaciones y las pruebas experimentales (45%).
- Convergencia del modelo (35%).
- Tiempo computacional (20%).

Con estos porcentajes de evaluación se calcula el valor final de la calificación a cada modelo de turbulencia. Se debe aclarar que se obtuvieron dos valores para cada modelo debido a que se tienen dos mallas diferentes, pero se promediaron para tener solamente un valor de evaluación para cada uno en la competencia *Shell eco-marathon*. La Tabla 15 muestra los resultados finales asignados a cada modelo de turbulencia.

Tabla 15. Resultados finales modelos de turbulencia [3]

Modelo	Puntaje
S-A	3,09
k- ϵ	2,43
k- ω	2,33
k-kl- ω	2,16

Teniendo en cuenta el error porcentual de las simulaciones, el modelo de turbulencia, el enmallado, el tipo de flujo, el tiempo computacional y la convergencia de la simulación, se puede determinar que el modelo Spalart Allmaras (S-A) es el más recomendado para la simulación del automóvil aplicado a la competencia *Shell eco-marathon*. Este modelo obtuvo esta calificación debido al costo computacional reducido, además del grado de exactitud en la respuesta arrojada en el valor del coeficiente de resistencia al avance, en comparación con resultados experimentales. Sin embargo, como se observa en la Figura 4 su convergencia no fue la más adecuada, porque se presentaron oscilaciones y solamente con malla fina y flujo inestable se obtuvo la convergencia deseada. Por eso, también es recomendable utilizar el modelo k- ϵ , que mostró mejores resultados de convergencia, aunque un error porcentual más elevado de la respuesta en comparación con el modelo *Spalart Allmaras* (S-A).

Los resultados obtenidos en esta investigación se utilizaron en el rediseño aerodinámico del vehículo aplicado a la competencia *Shell eco-marathon*, porque para las simulaciones realizadas al nuevo modelo mediante software de dinámica computacional de fluidos, se utilizó una malla con las mismas características de construcción (tipo de malla, Y+ y características de enmallado), sin tener la misma cantidad de nodos por el cambio en la geometría de la carrocería externa. El modelo de turbulencia aplicado, *Spalart Allmaras* (S-A), asegura la calidad y exactitud de los resultados obtenidos no solamente en el coeficiente de resistencia al avance.

Gracias al rediseño de la geometría externa del automóvil se redujo el coeficiente de resistencia al avance en un 36,6 % y el *downforce* se incrementó en un 14% [3, 4]. Estas mejoras pueden disminuir el consumo específico de combustible del vehículo y mejorar su maniobrabilidad [7], objetivo principal de la competencia planteada por Shell.

4. Conclusiones

Los modelos de turbulencia denominados RANS ofrecen una adecuada aproximación de resultados para el estudio aerodinámico de vehículos, según el análisis que se requiera, con un consumo computacional bajo; mientras que los modelos de alta precisión S-A, k- ϵ , k- ω y k-kl- ω se pueden aplicar en estudios donde las velocidades de operación del automóvil no excedan los 35 km/h, obteniendo resultados en el coeficiente de arrastre muy próximos a los datos experimentales y con un error máximo aproximado de 17% y mínimo del 1,52%

Después de realizar el análisis comparativo entre modelos de turbulencia, se concluye que, el modelo de turbulencia más adecuado, utilizando software de dinámica computacional de fluidos, para una simulación aerodinámica de vehículo urbano de la competencia *Shell eco-Marathon*, es el Spalart Allmaras (S-A), debido a que no requiere demasiados recursos computacionales, en comparación con otros modelos de turbulencia. Además, teniendo en cuenta las condiciones del caso de estudio, tiene buena convergencia en flujo estable e inestable, con una correcta aproximación en la predicción del coeficiente de arrastre (C_d) y menos del 4,7% de error con respecto al valor experimental.

El valor del coeficiente de arrastre no se ve muy afectado si se analiza bajo condiciones de flujo estable o inestable; entonces, debido al tiempo de simulación se considera que es mejor realizar la simulación en flujo estable porque se consume menos recursos computacionales. Sin embargo, la mejor convergencia mostrada en los resultados se obtuvo bajo condiciones de flujo inestable.

De los modelos de turbulencia analizados, $k\text{-kl-}\omega$ es el que tiene un mayor consumo de recursos computacionales y una mejor convergencia del coeficiente de arrastre, pero respecto al resultado experimental el valor tiene un error cercano al 17%. De esta manera se puede decir que, para este caso de estudio, $k\text{-kl-}\omega$ es más sensible a los cambios debidos a la generación de turbulencia, lo que afecta la distribución de presiones en estas zonas y el valor del coeficiente de resistencia al avance.

Debido a los errores de calibración de los instrumentos del túnel de viento y a que las condiciones ambientales no se pueden controlar, se tomó un error del 5% en las pruebas realizadas (una consideración para experimentos científicos [3]). Debido a esto y comparando con el porcentaje de error de los modelos de turbulencia vs el porcentaje experimental, se selecciona al modelo Spalart Allmaras (S-A) como el más adecuado para el caso de estudio de este proyecto, teniendo en cuenta que el error obtenido con él está dentro del rango de experimentación.

Recomendaciones

Para evitar el error generado en la toma de datos, en futuras investigaciones es importante controlar las condiciones ambientales en las pruebas experimentales en el túnel de viento.

Agradecimientos

Esta investigación fue posible gracias al apoyo de la Universidad de San Buenaventura Bogotá bajo la convocatoria ING 0,15. Adicionalmente, se hace mención especial a los auxiliares de investigación Lina Londoño, Eduardo Nieto y Carlos Bayona, por sus aportes en las pruebas computacionales y experimentales.

Referencias

- [1] <http://www.shell.com/energy-and-innovation/shell-ecomarathon/americas.html> Online [Jun 2016].
- [2] Cerpa, R. et al. (2015). *Análisis Aerodinámico de un Vehículo Urbano Aplicado a la Competencia Shell Eco Marathon Mediante Software de Dinámica Computacional de Fluidos*. X Congreso Colombiano De Métodos Numéricos: Simulación en ciencias y aplicaciones industriales. Cartagena, Colombia.
- [3] Cerpa, R. et al. (2016). *Estudio aerodinámico de un vehículo concepto urbano mediante software de dinámica computacional de fluidos*. Informe técnico final ING010. Universidad de San Buenaventura Bogotá.
- [4] Bayona, C., Londoño, L. & Nieto, E. (2015). *Análisis aerodinámico de un vehículo concepto urbano mediante dinámica de fluidos computacionales aplicado a la competencia Shell Eco Marathon*. Tesis de pregrado. Ingeniería Aeronáutica, Universidad de San Buenaventura Bogotá.
- [5] ANSYS Inc. (2013). *ANSYS Fluent theory guide*. USA: ANSYS Inc.
- [6] ANSYS Inc. (2015). *ANSYS Fluent theory guide*. USA: ANSYS Inc.
- [7] Santin, J. et al. (2007). *The world's most efficient vehicle - Design and development of pac car II*. Zurich: ETH.
- [8] Wolfe, C. *The immersed Boundary Approach to Fluid Simulation*. USA: ANSYS Inc.
- [9] Anderson, J. (1995). *Computational Fluid Dynamics - The Basics with Applications*. New York: McGraw-Hill.
- [10] Anderson, J. (2010). *Fundamentals of Aerodynamics*. USA: McGraw-Hill.

20. Prototipo medidor de potencia portátil de señales FM en la banda comercial

Adriano Hoyos
William Díaz
Víctor Miramá

Universidad del Cauca. Popayán, Colombia.

1. Introducción

La radiodifusión sonora en Frecuencia Modulada FM, es un medio de comunicación ampliamente utilizado en Colombia. Teniendo en cuenta la importancia de la estación radial de carácter público institucional, es necesario destacar la utilidad de la construcción de instrumentos de medida de potencia de señales FM en la banda comercial, para conocer los niveles de señal en diferentes puntos de un área de cobertura y determinar posibles problemas de intensidad de señal en recepción. En este sentido, en este proyecto se diseña y construye un prototipo portátil que permite medir la potencia de una emisora en sitios específicos de interés en la zona urbana de Popayán y determinar las coordenadas geográficas del mismo. Es importante destacar que en el mercado existen instrumentos de este tipo, pero son de alto costo. Además, se dificulta su adquisición por parte de una institución pública, como la Universidad del Cauca, debido a la limitación de recursos económicos.

Los módulos utilizados en la construcción del prototipo permiten recibir las señales de estaciones radiales FM y del Sistema de Posicionamiento Global GPS. Los datos obtenidos se procesan en una unidad Micro Controladora MCU, se visualizan en un Despliegue de Cristal Líquido LCD y se almacenan en una memoria MicroSD para ser analizados posteriormente. El prototipo de medida opera en la banda de FM comercial en las frecuencias de 88 MHz a 108 MHz.

En este capítulo se presenta el proceso de construcción del prototipo; en la sección 2 se describe la metodología empleada en el proyecto; en la sección 3 se establecen los requerimientos y el diseño general; la descripción de los elementos utilizados y la construcción del prototipo se presentan en la sección 4; en la sección 5 se estima la precisión del prototipo, para realizar el proceso adecuado de medidas o experimentación que se muestra en la sección 6; y finalmente, se presentan las conclusiones derivadas del proyecto.

2. Metodología de implementación

Para la construcción del prototipo medidor de potencia se adoptó la metodología lineal secuencial definida en [1], la cual permite la construcción y el perfeccionamiento de prototipos. Las fases desarrolladas se describen a continuación.

2.1 Recolección de información

Recopilación de información relacionada con Circuitos Integrados IC y componentes electrónicos para la recepción de señales en sistemas de radiodifusión en FM comercial. Además, se realizó el estudio de herramientas software para planificación radioeléctrica, programación de microcontroladores y diseño de Tarjetas de Circuito Impreso PCB.

2.2 Análisis de requerimientos

Se definen los requerimientos que debe cumplir el prototipo portátil para medir la potencia recibida en diferentes sitios de la ciudad de Popayán, proveniente de señales FM

en la banda comercial. Además, se analizaron los IC receptores de FM que disponían de un pin Indicador de Intensidad de señal Recibida RSSI, módulos receptores de señales del Sistema GPS, módulos para el almacenamiento y visualización de información y fuentes para proveer energía al prototipo medidor de potencia de señales FM.

2.3 Diseño y construcción

En esta etapa se realizaron diferentes actividades para una adecuada construcción del prototipo:

1. Diseño general del prototipo. A partir de los requerimientos se diseña el diagrama general en bloques.
2. Diseño específico de módulos. Con base en el diagrama general del prototipo se diseñan los módulos no disponibles en el mercado y se definen adecuadamente los módulos existentes.
3. Pruebas de funcionamiento de módulos. Se realizan pruebas de funcionamiento a cada uno de los módulos mediante herramientas software o en *protoboard*.
4. Elaboración y pruebas de módulos no disponibles. Elaboración de módulos no disponibles en tarjetas de circuito impreso y posteriores pruebas de los mismos.
5. Construcción del prototipo. Ubicación adecuada de cada módulo en el cuerpo del prototipo y conexiones respectivas de los mismos.
6. Construcción de la Antena Receptora. Elaboración de la antena de recepción para la banda de FM comercial.

2.4 Pruebas

Para esta etapa se definieron las siguientes actividades:

1. Pruebas del prototipo. Ejecución de pruebas para verificar el funcionamiento del prototipo.
2. Medidas de potencia con el prototipo. Se mide la potencia recibida de Unicauca Estéreo en algunos lugares de la ciudad de Popayán.
3. Obtención de potencia mediante simulación. Con una herramienta software se simula una estación de radiodifusión y se estima la potencia en los mismos puntos de la actividad anterior.
4. Comparación de resultados. Se comparan los datos de potencia medidos con el prototipo y los obtenidos mediante simulación.

3. Requerimientos y diseño del prototipo

3.1 Identificación de requerimientos

Los requerimientos a tener en cuenta para el diseño del prototipo portátil de medida de potencia en la banda comercial de FM son los siguientes:

1. Portabilidad. El equipo de medida a diseñar y construir debe ser fácilmente transportable para la toma de medidas en campo.
2. Sintonización de FM comercial. El prototipo debe captar las señales emitidas en la banda comercial de FM, es decir, en el rango de frecuencias entre 88 y 108 MHz.
3. Recepción de señales GPS. Indispensable para registrar el punto donde se mide la potencia de una señal de FM.

4. Despliegue digital de información. Importante para visualizar los datos de interés en el proceso de medición.
5. Almacenamiento de datos. Es fundamental guardar los datos obtenidos para su posterior análisis.
6. Procesamiento de datos. Este requerimiento deriva de la visualización digital y almacenamiento de los datos.
7. Autonomía de alimentación. Al tratarse de un prototipo portátil para medidas en campo, es necesario tener autonomía de alimentación.

3.2 Diseño general del prototipo

Teniendo en cuenta los requerimientos se considera que el prototipo debe contar con los siguientes módulos:

1. Módulo receptor de señales de FM comercial
2. Módulo receptor de señales de GPS
3. Módulo de almacenamiento de datos
4. Módulo de visualización de datos
5. Módulo de procesamiento de datos
6. Módulo de alimentación

En la Figura 1 se muestra el diagrama en bloques correspondiente.

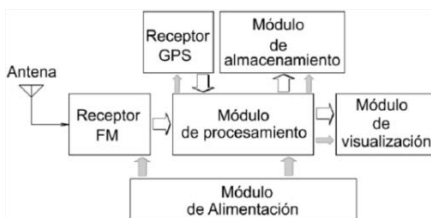


Figura 1. Diagrama en bloques del prototipo

En el esquema de la Figura 1 la señal se recibe a través de la antena del receptor de FM, sintonizado a la emisora de interés. El receptor entrega el nivel de intensidad de señal recibida en uno de sus terminales y se aplica al módulo de procesamiento para obtener su potencia. El receptor GPS provee al módulo de procesamiento de una señal con las coordenadas geográficas del lugar donde se realizan las mediciones de potencia. Tanto los valores de potencia como la posición de los lugares de medida se almacenan en una tarjeta MicroSD y se despliegan a través de un LCD. Por otra parte, el módulo de alimentación suministra la energía requerida por cada módulo del prototipo.

4. Construcción del prototipo

De acuerdo con el diseño modular del prototipo se seleccionan los elementos necesarios para su construcción.

4.1 Receptor FM

El receptor de FM se construyó con base en el IC TDA7021T de Philips® [2], que cuenta con un pin indicador de RSSI, del que se obtiene una corriente que se hace pasar a través de una resistencia para generar un voltaje proporcional al campo incidente en la antena. En la Figura 2 se muestra el diagrama del módulo receptor de FM. Es necesario aclarar que el voltaje V_R aplicado se debe regular y que la salida de audio se obtiene del pin 14, identifica como V_A .

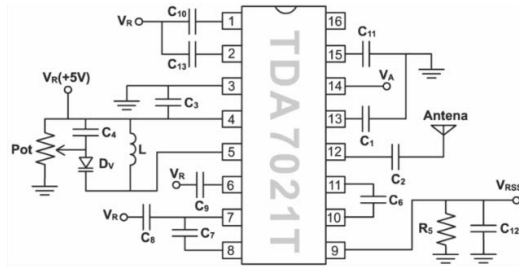


Figura 2. Circuito receptor FM

La Figura 3 muestra el módulo construido sobre una tarjeta de circuito impreso, donde se incluye un regulador de voltaje basado en el regulador de voltaje positivo L7805CV, fabricado por STMicroelectronics®. El receptor tiene un conector Bayonet Neill-Concelman BNC hembra, en el que se conecta el sistema de antena. La impedancia de dicho conector es de 75 Ω .



Figura 3. Receptor de FM

4.2 Antena dipolo de lambda medios

El propósito de la antena es capturar la señal electromagnética que incide sobre ella, para entregarla en forma de voltaje al receptor. La antena utilizada es un dipolo de lambda medios, con una impedancia característica de 75 Ω . La conexión entre la antena y el prototipo se hace con un cable coaxial de 75 Ω . Es necesario un balun entre la línea de transmisión y la antena para adaptar un sistema balanceado a uno desbalanceado. La antena construida se muestra en la Figura 4. En el extremo del cable coaxial que se une al prototipo medidor de potencia se utiliza un conector BNC macho de 75 Ω , fabricado por Amphenol®. La impedancia de entrada es 75 Ω , por lo tanto, se usan componentes de ese valor para lograr la adaptación de impedancias.



Figura 4. Antena dipolo de lambda medios

4.3 Receptor GPS

Para obtener las coordenadas geográficas del lugar donde se realizaron las medidas de potencia se utilizó el módulo GPS EM406-A, de USGlobalSat®. Además, se dispone de una tarjeta para soportar el receptor GPS, que se ensambla en la tarjeta de Arduino UNO R3. En la Figura 5 se muestra la tarjeta que soporta el receptor GPS fabricada por Sparkfun®.



Figura 5. Receptor GPS EM406-A

4.4 Módulo de procesamiento

Los datos provenientes de los receptores GPS y FM se procesan en la MCU Arduino UNO R3 [3], que se muestra en la Figura 6. El código o programa software se realizó en Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, *Integrated Development Environment*) Arduino 1.0.

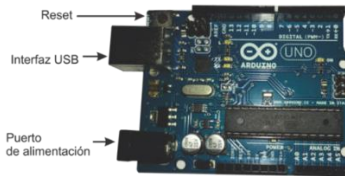


Figura 6. Módulo Arduino UNO R3

4.5 Módulo de almacenamiento

Para la implementación de este módulo se utilizó el adaptador de tarjeta MicroSD v0.9b, de Catalex® [4], mostrado en la Figura 7 junto a una memoria MicroSD de 2 GB, con el propósito de facilitar la recuperación de los datos de medida obtenidos con el prototipo.



Figura 7. Módulo adaptador de memoria MicroSD

4.6 Módulo de visualización

Se usa un LCD de cuatro filas y 20 columnas (20x4) para visualizar la información. El LCD es de referencia LMB204BFC, fabricado por Shenzhen Topway Technology® [5], el cual se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Despliegue de cristal líquido LMB204BFC

La interfaz entre el LCD y la MCU se lleva a cabo mediante el bus de comunicación entre Circuitos Integrados IIC. Esto reduce la cantidad de líneas utilizadas, pasando de 16 a 4. En la Figura 9 se muestra un módulo de Interfaz I2C.



Figura 9. Módulo de interfaz I2C

4.7 Módulo de alimentación

El sistema utiliza una batería recargable FL1250 [6] (Figura 10), que proporciona un voltaje de 12 V y sostiene la carga para un tiempo aproximado de 20 horas continuas de operación.



Figura 10. Batería FL1250

Teniendo en cuenta que el receptor de FM opera correctamente a 5 V regulados y los demás módulos funcionan con un voltaje entre 7 a 12 V sin regular, la batería debe suministrar como mínimo 8 V. De esta manera, si el voltaje es inferior a este umbral, se debe advertir mediante un indicador de carga de la batería, con lo cual se sugiere que debe ser recargada. En la Figura 11 se muestra el esquema del circuito indicador de carga de la batería.

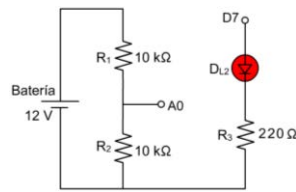


Figura 11. Circuito indicador de carga

4.8 Construcción

La Figura 12 muestra el montaje final del dispositivo, en el que se puede identificar el modulo receptor, Receptor GPS y la tarjeta Arduino UNO, lo mismo que el circuito de alimentación y la batería correspondiente.

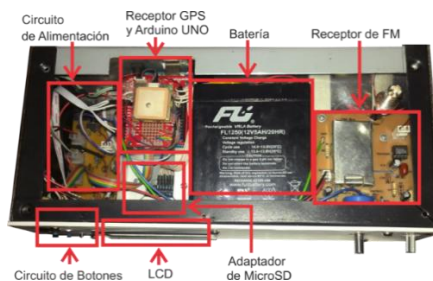


Figura 12. Vista interior del prototipo medidor de potencia

El panel frontal del prototipo portátil medidor de potencia de señales FM en la banda comercial, mostrado en la Figura 13, está compuesto por:

1. Pantalla de visualización
2. Botón de encendido/apagado del prototipo
3. Botón de encendido/apagado del GPS
4. Botón DLINE/UART
5. Botón de reinicio del programa en ejecución
6. Botón de cambio de nombre para los archivos
7. Indicador de carga de la batería

8. Puerto de tarjeta MicroSD
9. Control de volumen
10. Control de sintonía de frecuencias

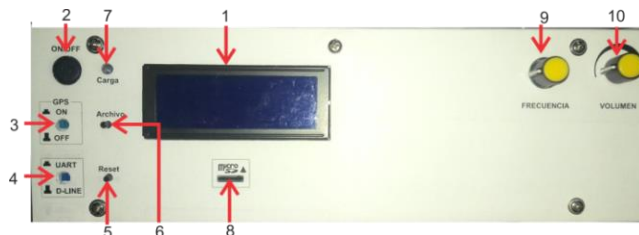


Figura 13. Vista del panel frontal del prototipo medidor de potencia

Los datos se almacenan en una hoja de cálculo con extensión ODS, una herramienta de Openoffice. En la Figura 14 se aprecia la estructura del documento creado para almacenar los datos obtenidos con el prototipo. La primera columna registra la frecuencia instantánea en la que se realiza la medida, las siguientes contienen la intensidad de campo y la potencia recibida, y posteriormente se almacenan las coordenadas correspondientes a la medida tomada.

	A	B	C	D	E
1	Frecuencia[MHz]	Campo[dBuV/m]	Potencia[dBm]	Latitud	Longitud
2	104.08	58.54	-54.25	2.4498	-76.625
3	104.11	58.38	-54.41	2.4498	-76.625
4	104.11	57.74	-55.05	2.4498	-76.625
5	104.08	57.74	-55.05	2.4498	-76.625
6	104.08	55.11	-57.68	2.4498	-76.625
7	104.08	55.11	-57.68	2.4498	-76.625

Figura 148. Formato de datos almacenados

4.9 Costos del prototipo

En la Tabla 1 se muestran los costos de los componentes para determinar el costo total, aproximado, del prototipo construido.

Tabla 1. Costo total del prototipo

Dispositivo	Precio (USD)
Tarjeta Arduino UNO R3	35,43
Tarjeta receptor GPS	94,00
LCD IIC	14,75
Interfaz IIC	10,75
TDA7021T	19,28
TDA7052A	1,69
Potenciómetro multi-vuelta	19,28
Resistencias de precisión	10,61
Adaptador de MicroSD	7,23
Memoria MicroSD	4,82
Batería	19,28
Cargador de batería	12,05
Adaptador de USB a MicroSD	2,41
Conectores BNC	5,45
Cable coaxial	5,40
Antena	3,86
Trípode	24,10
Otros	16,87
Chasis	0
Total	307,27

5. Precisión del prototipo

Para estimar la precisión del medidor se realizaron pruebas de laboratorio, que permitieran realizar los ajustes necesarios sobre el prototipo.

5.1 Caracterización de la antena

Para verificar la impedancia característica de la antena se realizó el montaje de la Figura 15, utilizando los siguientes elementos:

- Analizador vectorial de redes R&S®ZVL
- Adaptador de impedancia de 50 a 75 Ω del tipo N a BNC, respectivamente
- Carga de 75 Ω
- Antena dipolo de lambda medios

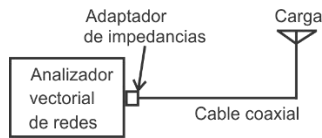


Figura 915. Montaje de prueba para antena

Inicialmente, se realizaron las medidas de referencia utilizando la carga de prueba a una frecuencia de 97,5 MHz, obteniendo los valores de referencia para adaptación que se muestran en las Figuras 16 y 17. En la Figura 16 se puede observar que la curva de la magnitud del coeficiente de reflexión tiene su mínimo valor en una frecuencia muy cercana a la frecuencia de prueba, con lo cual se obtiene una Relación de Ondas Estacionarias ROE igual a 1,00022, lo cual indica una adecuada adaptación de impedancia.

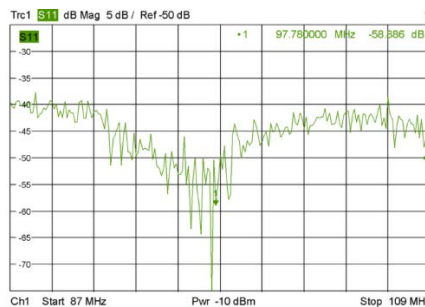


Figura 16. Magnitud coeficiente de reflexión de carga de 75 Ω

La Figura 17 corresponde a la carta de Smith, que de igual manera muestra que existe adaptación de impedancias.

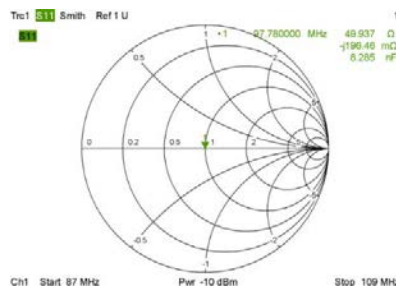


Figura 17. Carta de Smith para la carga de 75 Ω

Posteriormente, se cambió la carga conocida por la antena diseñada y se obtuvieron los resultados mostrados en las Figuras 18 y 19. La Figura 18 muestra que la antena presenta una curva de magnitud de coeficiente de reflexión con un valor bajo, cerca de la

frecuencia de prueba, obteniéndose un ROE igual a 1,052 que evidencia una adecuada adaptación de impedancia.

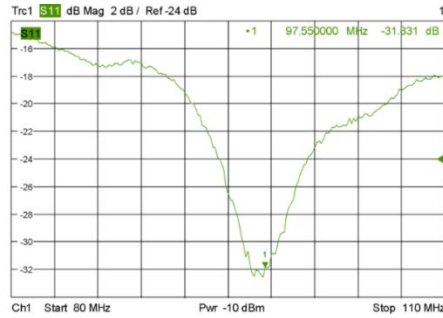


Figura 18. Magnitud coeficiente de reflexión de antena

De igual manera, la carta de Smith (Figura 19) confirma la adaptación de impedancias. Dada la similitud de los resultados al comparar con la carga de 75 Ω, se concluye que la impedancia característica de la antena es igual 75 Ω.

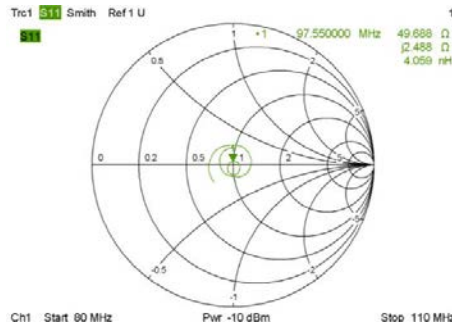


Figura 19. Carta de Smith para la antena

Posteriormente, utilizando el montaje mostrado en la Figura 20 se estima la ganancia de la antena. Para esta prueba se utilizaron dos antenas idénticas y un medidor de campo eléctrico MC-87/EV. Se transmite con potencias desde 1dBm a 10dBm en pasos de 1dB y se registran los valores de campo obtenidos con el medidor de campo.



Figura 20. Montaje para estimación de ganancia de antena

Teniendo en cuenta las características de los elementos mostradas en la Tabla 2, se calcula la ganancia aproximada de las antenas utilizando el balance del enlace. La Tabla 3 muestra los valores de intensidad de campo registrados y el cálculo de la ganancia, que corresponde a las ganancias de las antenas. Puesto que las antenas son idénticas la ganancia de cada una de ellas es aproximadamente 2.61 dBd.

Tabla 2. Atenuación elementos del montaje

	Transmisor	Receptor
Longitud del cable coaxial [m]	3,5	5
Atenuación cable coaxial [dB]	0,364	0,52
Pérdidas por inserción conectores [dB]	0,2	0,2
Pérdidas adaptador de impedancia [dB]	3,844	0
Pérdidas totales [dB]	4,408	0,72

Tabla 3. Campo medido y cálculo de ganancia

$P_{tx}[\text{dBm}]$	$V[\text{dB}\mu\text{V}]$	$G_{ant}[\text{dBd}]$
1	68,5	5,6505
2	69,5	5,6505
3	70	5,1505
4	71	5,1505
5	72	5,1505
6	73	5,1505
7	74	5,1505
8	75	5,1505
9	75,9	5,0505
10	76,8	4,9505

5.2 Obtención de valor de potencia

Debido a que los valores de potencia se obtienen a partir del valor RSSI que proporciona el CI TDA7021T, es necesario convertir el voltaje proporcionado por el CI a un valor de intensidad de campo, que se pueda convertir en potencia. Por lo tanto, en primera instancia se debe verificar que el CI opere de manera adecuada, para ello se aplican los voltajes recomendados por el fabricante y se mide el voltaje inducido por el campo eléctrico, obteniendo la curva de la Figura 21, que corresponde a lo indicado por el fabricante [2].

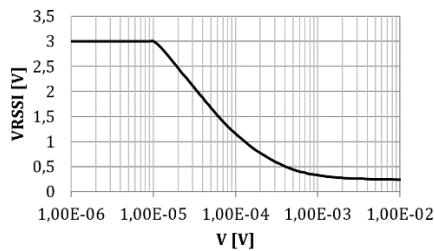


Figura 21. Campo vs voltaje RSSI

Posteriormente, se repite la prueba y se invierten los ejes para generar la curva de tendencia que permite hacer los cálculos para medidas posteriores, el resultado se muestra en la Figura 22.

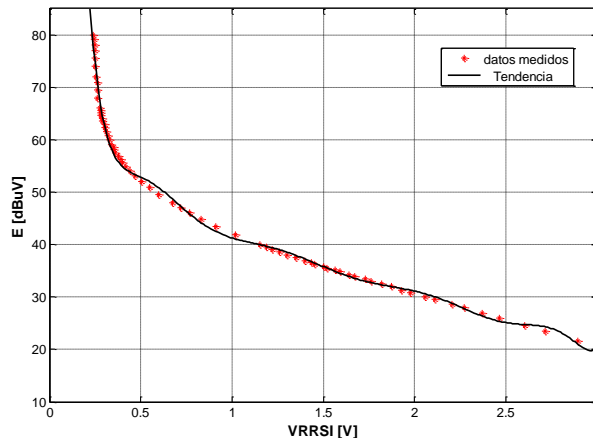


Figura 22. Valores medidos y curva de tendencia

Se puede notar que la curva de tendencia tiene algunas diferencias con los valores medidos, por lo tanto, se tomaron los valores por secciones para ajustar mejor los medidos, como resultado se obtienen las ecuaciones (1) a (5).

$$V_1 = -1,1893V_{RSSI}^3 + 7,5977V_{RSSI}^2 - 25,921V_{RSSI} + 61,616 \quad (1)$$

$$V_2 = 13,348V_{RSSI}^3 - 21,392V_{RSSI}^2 - 10,29V_{RSSI} + 60,528 \quad (2)$$

$$V_3 = -531,05V_{RSSI}^3 + 812,63V_{RSSI}^2 - 441,54V_{RSSI} + 136,22 \quad (3)$$

$$V_4 = -24142V_{RSSI}^3 + 22732V_{RSSI}^2 - 7201V_{RSSI} + 829,14,7 \quad (4)$$

$$V_5 = -22602V_{RSSI}^3 + 23692V_{RSSI}^2 - 8124V_{RSSI} \quad (5)$$

Con estas ecuaciones se obtiene el campo inducido por el campo eléctrico, de acuerdo con el rango del voltaje RSSI mostrado en la Tabla 4.

Tabla 4. Rango de valores RSSI

Rango de voltaje V_{RSSI}	Ecuación
1,153 V a 3 V	1
0,6 V a 1.152 V	2
0,3 a 0,59 V	3
0,26 V a 0,29 V	4
0,25 V a 0,23 V	5

Estas ecuaciones se incluyen en el microprocesador: para determinar la intensidad de campo eléctrico se utiliza la ecuación (6) y para la potencia recibida la ecuación (7).

$$E_0[\text{dBu}] = V[\text{dB}\mu\text{V}] - G_{ant}[\text{dBi}] - 29,8 + 20 \log f[\text{MHz}] \quad (6)$$

$$P_r[\text{dBm}] = E_0[\text{dBu}] + G_r[\text{dBi}] - 20 \log(f[\text{MHz}]) - 77,2 \quad (7)$$

5.3 Medida de potencia

Para la medida de potencia se utilizó el montaje de la Figura 23, cuyos elementos son:

- Generador de señales Hewlett Packard® 8656B
- Prototipo portátil medidor de potencia de señales en la banda FM comercial
- Cable coaxial RG59U de 1,5 m
- Adaptador de impedancia de 50Ω a 75 Ω del tipo N a BNC

La prueba consiste en transmitir varios niveles de potencia desde el generador de señales hasta el prototipo, por medio del cable coaxial en la frecuencia de 97,5 MHz y realizar comparaciones con los valores conocidos. Los resultados de la medida de potencias transmitida y medida se muestran en la Tabla 5.



Figura 2310. Montaje para medidas de potencia

Tabla 5. Potencia de Transmisión y Potencia Medida

P_{tx} (dBm)	P_{med} (dBm)
-24	-24,5
-30	-29
-40	-41,22
-50	-51,44
-60	-61,4
-70	-71,4
-80	-81,2
-85	-86,4
-86	-86,88

5.4 Error relativo de las medidas de potencia

La precisión de los niveles de potencia transmitida desde el generador de señales, comparados con los niveles de potencia medida en el prototipo, se contrastan mediante el error relativo porcentual, el cual se expresa en la ecuación (8).

$$E_r[\%] = \frac{|valor\ real - valor\ medido|}{valor\ real} \cdot 100 \quad (8)$$

Para una mejor comprensión de la precisión en la medida de niveles de potencia con el prototipo, el error relativo se grafica en la Figura 24, donde se aprecia que el error en las medidas de potencia está por debajo de un 3,3 %, lo cual indica que las mediciones son aceptables [7]. Además de los valores de potencia transmitidos, para los cuales el error relativo porcentual es aproximadamente igual al anterior, se determina que el rango dinámico del prototipo medidor de potencia es de 62 dB, que comprende potencias entre -24 dBm a -86 dBm.

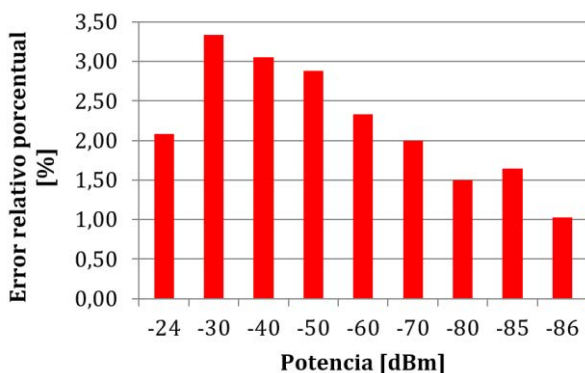


Figura 24. Error relativo porcentual en la medida de potencia

6. Medidas de campo

6.1 Toma de medidas y simulación

Se realizaron diferentes medidas para Unicauca Estéreo y se contrastaron con los resultados arrojados por un simulador, para evaluar la diferencia entre los resultados medidos y simulados, y la tendencia de los mismos. Se midió la potencia para 104.1 MHz, en 24 puntos de la zona urbana en el municipio de Popayán. En cada punto se tomaron 300 muestras de potencia recibida y con la herramienta de hoja de cálculo de Openoffice se determinó la mediana para dichos valores, porque representa la tendencia central más significativa de las muestras tomadas [7]. En la Tabla 6 se detallan los resultados de medida de potencia con el prototipo.

Considerando las coordenadas de los sitios en los que se hicieron las mediciones con el prototipo, se simuló la potencia en la herramienta de planeación de cobertura radioeléctrica en línea Xirio-Online®. Es importante resaltar que, utilizando mapas de media y alta resolución [8-10], con esta herramienta es posible realizar estudios de cobertura con un sistema de pago por uso.

Para la simulación se empleó el método basado en la recomendación ITU-R P.526-11, válida para frecuencias mayores a 30 MHz [9]. Además, se utilizó la cartografía de tipo Modelo Digital de Terreno MDT, o de altimetría. Este modelo es indicado para planificación de redes de radiodifusión [9, 10]. En la Figura 25 se muestra la zona de cobertura para los puntos medidos.

Tabla 6. Medida de potencia con el prototipo

Sitio medido	Potencia [dBm]
Puente de Chune	-55,59
Parquesoft	-45,98
Parque Benito Juarez	-63,265
Plazoleta de Santo Domingo	-52,97
Casa Andrés Ibarra	-69,96
Casa Cesar Álvarez	-61,265
Torre-B/El Portal del Oriente	-66,21
Pueblito Patojo	-54,89
Tulcan-Unicauca	-46,48
Tránsito	-44,64
Barrio Aida Lucía	-49,94
Lacteos-Puente	-57,35
Piso G de Comfacauca	-46,72
FACA-Unicauca	-38,78
Barrio La Paz-Parque Principal	-41,7
SENA - Alto de Cauca	-38,03
Salida a Cali	-38,03
Glorieta de Bellavista	-72,6
Glorieta de la Chirimía	-57,99
Salida a Timbio	-53,26
Estación Mobil-La Variante	-49,45
Barrio Lomas de Granada	-45,46
Maxipan-Salida a El Tambo	-52,31
Casa Adriano Hoyos	-42,54

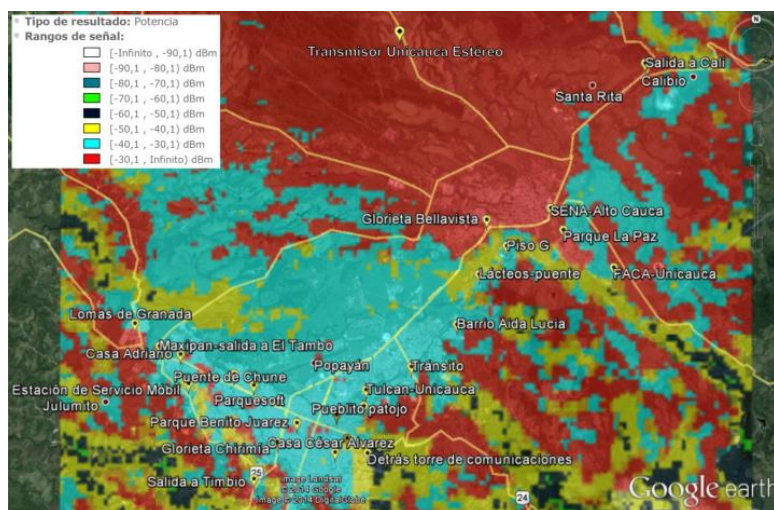


Figura 25. Cobertura de Unicauca Estéreo mediante simulación

Se aprecia que la mayoría de sitios simulados se encuentran en zonas donde la potencia recibida está entre -30 dBm a -50dBm. Las zonas rojas alejadas del transmisor son partes elevadas del municipio de Popayán, donde se reciben niveles de potencia altos, del orden de -30 dBm. Comparando estos resultados con la Tabla 6, se nota que los valores de potencia obtenidos están dentro del rango dinámico establecido para el prototipo. En la Tabla 7 se muestran las medidas de potencia mediante simulación para los mismos sitios medidos con el prototipo en la ciudad de Popayán.

Es de resaltar que en la simulación se utilizó un mapa con la mayor resolución para Colombia en la herramienta Xirio-Online®, la cual es de 100 m/pixel, debido a que con 400 m/pixel las potencias fueron superiores [8-10].

Tabla 7. Medidas de Potencia Mediante Simulación

Sitio medido	Potencia [dBm]
Puente de Chune	-32,41
Parquesoft	-31,44
Parque Benito Juarez	-33,42
Plazoleta de Santo Domingo	-30,85
Casa Andrés Ibarra	-39,01
Casa Cesar Álvarez	-38,28
Torre-B/El Portal del Oriente	-46,48
Pueblito Patojo	-29,66
Tulcan-Unicauca	-33,52
Tránsito	-32,46
Barrio Aida Lucía	-36,09
Lacteos-Puente	-36,84
Piso G de Comfacauca	-31,34
FACA-Unicauca	-31,92
Barrio La Paz-Parque Principal	-28,07
SENA – Alto de Cauca	-19,3
Salida a Cali	-20,3
Glorieta de Bellavista	-21,58
Glorieta de la Chirimía	-31,5
Salida a Timbio	-31,1
Estación Mobil-La Variante	-36,76
Barrio Lomas de Granada	-29,33
Maxipan-Salida a El Tambo	-31,04
Casa Adriano Hoyos	-34,99

6.2 Comparación de Potencia Medida y Simulada

En la Figura 26 se muestra una gráfica de la potencia de recepción obtenida en el simulador (color rojo) y la potencia medida con el prototipo (color azul) para los sitios de interés. Al comparar las dos curvas, con excepción de algunos puntos, se aprecia una tendencia similar de las potencias obtenidas. La diferencia más notable se presenta para la potencia obtenida con el prototipo en la glorieta de Bellavista. En particular, en este sitio se observó que, cerca del punto de recepción, existe gran cantidad de árboles y vegetación que obstruye la línea de vista hacia el punto de transmisión, lo que puede ser una causa del nivel bajo de potencia medido.

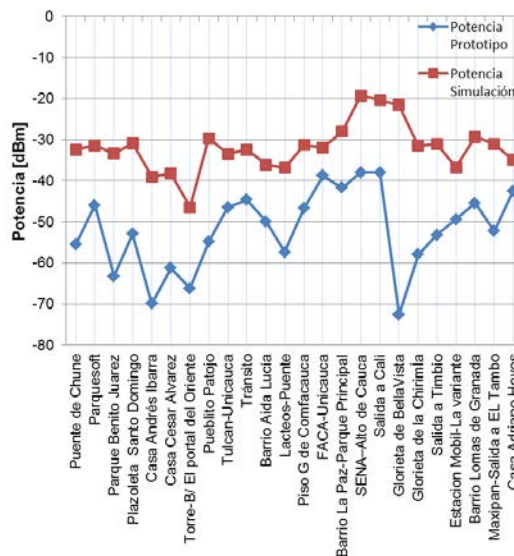


Figura 26. Potencias obtenidas con el prototipo y mediante simulación

En general, de las curvas de la Figura 26 se aprecia una fuerte correlación entre las potencias medidas y simuladas para los diferentes sitios de la ciudad de Popayán. Esto indica que el prototipo funciona de manera aceptable con relación a las medidas de potencia de la zona en cuestión.

7. Conclusiones

- La precisión del prototipo medidor de potencia tiene un error relativo porcentual menor o igual al 3.3%, lo que garantiza una medida de potencia aceptable.
- Para el prototipo se obtuvo un rango dinámico de 62 dB, es decir, potencias comprendidas entre -24 dBm y -86 dBm. Este resultado es bueno dado que las potencias medidas están dentro de dicho rango.
- El costo del prototipo medidor de potencia fue aproximadamente de \$ 912.500 pesos colombianos, mientras que los medidores disponibles comercialmente tienen un costo superior a los 3 millones de pesos, lo cual demuestra que es posible implementar y diseñar un medidor de potencia a un precio asequible para el medio universitario.
- El consumo máximo de corriente del prototipo medidor de potencia es de 200 mA, permitiendo una autonomía aproximada de 20 horas de trabajo continuo, tiempo suficiente para realizar una larga jornada de mediciones en campo.
- Considerando que las medidas de potencia con el prototipo tienen una tendencia similar respecto a los resultados obtenidos mediante simulación, se puede asegurar que las mediciones de potencia realizadas con el prototipo son coherentes.
- La diferencia promedio entre la potencia simulada y la potencia medida con el prototipo, sin tener en cuenta la medida en la glorieta de Bellavista, es de 20 dBm. Valor a tener en cuenta para ajustes de media de potencia al realizar simulaciones.

Referencias

- [1] Pressman, R. (2002). [Ingeniería del Software: Un Enfoque Práctico](#). México: McGraw-Hill.
- [2] Philips Semiconductors. (1992). [TDA7021T - FM radio circuit for MTS](#).
- [3] Arduino. [Arduino Uno](#).
- [4] Catalex. [Arduino Micro SD](#).
- [5] Shenzhen TOPWAY Technology. (2005). [LCD Module-LMB204BFC](#).
- [6] Fulibattery. [Valve Regulated Lead-Acid Rechargeable Battery](#).
- [7] Santo, M. & Lecumberry, G. (2005). [El proceso de medición: Análisis y comunicación de datos experimentales](#). Argentina: Equipo de Producción Editorial.
- [8] López, J. (2009). [Herramientas de planificación radioeléctrica en Internet. Un modelo novedoso](#). Antena de Telecomunicación 178, pp. 18-21.
- [9] Xirio-Online. (2014). [Cálculos de Pago vs Cálculos Gratuitos](#). Xirio-Online Simulación Profesional de Cobertura Radioeléctrica Online.
- [10] Xirio-Online. (2014). [Capas de cartografía](#). Xirio-Online Simulación Profesional de Cobertura Radioeléctrica Online.

21. Sistema de monitoreo de condiciones técnicas y ambientales del sistema de transmisión de Unicauca Estéreo

Diego Lizalda
Jhonatan Durán
Claudia Hernández

Universidad del Cauca. Popayán, Colombia.

1. Introducción

Actualmente, se realizan esfuerzos en investigación y desarrollo de sistemas electrónicos para el monitoreo de variables físicas en lugares de difícil acceso, principalmente motivados por los últimos avances tecnológicos en micro y nanotecnología. En el monitoreo de variables, se emplean diferentes dispositivos que, con una adecuada configuración y articulación, son capaces de tomar diferentes mediciones para un rápido diagnóstico de equipos y/o eventos. Estos dispositivos son la base para el desarrollo de sistemas de monitoreo remoto, una de las aplicaciones prometedoras en la adquisición y tratamiento de datos, según diversos analistas tecnológicos y revistas especializadas [1]. El monitoreo de variables haciendo uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación TIC, se conoce como telemetría y se utiliza en diversos campos, tales como exploración científica con naves tripuladas o no, agricultura de precisión, plantas químicas, redes de suministro eléctrico, entre otros [2].

La emisora de la Universidad del Cauca, Unicauca Estéreo, tiene una estación de transmisión de alta potencia ubicada en la vereda La Rejoja de la ciudad de Popayán. Dicha estación presenta continuas fallas en su funcionamiento y no cuenta con un sistema de monitoreo que permita determinar los motivos de las fallas, por lo tanto, se necesita implementar un sistema de monitoreo para realizar el seguimiento de las condiciones técnicas y ambientales bajo las que está operando el transmisor de la emisora.

En este capítulo se describe el proceso de implementación de un sistema de monitoreo de condiciones técnicas y ambientales del sistema de transmisión de Unicauca Estéreo. El contenido se estructura en cinco secciones: en la 2 se ilustra el marco teórico asociado al desarrollo del sistema, la 3 muestra el desarrollo de la metodología empleada para el sistema de monitoreo, la 4 contiene las pruebas del sistema y, finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones.

2. Marco teórico

2.1 Sistemas de monitoreo

Los sistemas de monitoreo permiten la medición de variables físicas en un sitio remoto o de difícil acceso, con el objetivo de enviar unidades de información hasta un centro de operaciones donde se almacenan e interpretan por sistemas automáticos o personal técnico. Por lo general, esta información se envía utilizando sistemas de comunicación inalámbricos a través de grandes distancias.

En la última década, los sistemas que utilizan sensores para el monitoreo y control han evolucionado gracias a los avances de la electrónica, y ahora cuentan con capacidad de procesamiento, autonomía y comunicación inalámbrica. Este tipo de dispositivos abre un abanico de oportunidades para diseñar y crear todo tipo de aplicaciones, protocolos y sistemas, capaces de reducir tiempo y costos de producción [3].

El monitoreo constante permite obtener beneficios en diversas disciplinas, tales como medicina, agricultura e industria, debido a que en los procesos de medición y monitoreo de variables físicas se logran mejores resultados. Básicamente, estos sistemas están constituidos por tres bloques: el nodo sensor, el nodo coordinador y el centro de visualización. La arquitectura básica se muestra en la Figura 1.

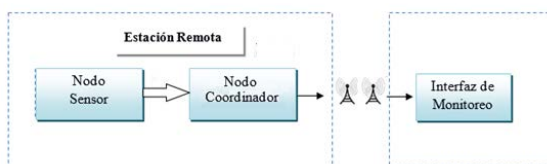


Figura 1. Arquitectura de un sistema de monitoreo

El nodo sensor, se encarga de capturar la información del medio físico y de transmitirla al nodo coordinador, el cual cumple la función de enviar los datos recolectados a la interfaz de monitoreo, ya sea por medio de una plataforma web, o por medio de una aplicación de escritorio o móvil, con la finalidad de mostrar en tiempo real el estado del objeto en estudio. A diferencia de los sistemas de telecontrol, que recolectan información del medio físico y toman decisiones de acuerdo con los datos recopilados para realizar una tarea específica, los sistemas de monitoreo envían información desde un punto remoto a un centro de monitoreo.

2.2 Estándares de comunicación orientados a las redes de sensores inalámbricas

Algunos sistemas de monitoreo incluyen un conjunto de nodos sensores comunicados entre sí de manera inalámbrica, cuya interconexión conforma una red, por consiguiente, se requiere emplear tecnologías que permitan establecer esa comunicación. Las Redes de Sensores Inalámbricas WSN, emplean diversos estándares para la interconexión de nodos sensores, que varían de acuerdo con las distancias de separación entre ellos: Redes de Área Personal WPAN, para redes que no superan los 15 metros y Redes de Área Corporal WBAN, para redes no superiores a los 10 metros, entre otras. Los protocolos más usados en WSN son Bluetooth y ZigBee, entre los que se pueden encontrar diferencias como [3]:

- Una red ZigBee puede constar de un máximo de 65.535 nodos distribuidos en subredes de 255 nodos, frente a los 8 máximos de Bluetooth
- ZigBee tiene un menor consumo de potencia que Bluetooth
- ZigBee tiene una velocidad de hasta 250 kbps, mientras que la de Bluetooth es de hasta 3 Mbps

Tradicionalmente, se han utilizado cables para interconectar diferentes tipos de dispositivos, sin embargo, esto genera dificultades tales como su despliegue, debido al aumento del peso o volumen de los dispositivos y reducción de la escalabilidad. Dadas estas características, surge la necesidad de interconectar los dispositivos de forma inalámbrica como solución eficiente, rápida y confiable para compartir información entre dispositivos dentro de los límites de una WPAN. Las redes inalámbricas de área personal son redes que no superan distancias de 75 metros, no generan grandes cantidades de flujo de información y emplean tecnologías de corto alcance.

3. Metodología de Desarrollo

Para el desarrollo del sistema de monitoreo se utilizó un Modelo en Cascada [4], que define 4 fases:

1. Análisis de requerimientos. Consiste en estudiar el problema con el propósito de establecer los requerimientos indispensables del sistema de monitoreo.
2. Diseño. Se define cómo estará conformado el sistema de monitoreo, especialmente se investigan los dispositivos que se adaptan a los requerimientos del sistema.
3. Implementación. Se realiza el desarrollo hardware-software del sistema de monitoreo, configurando cada dispositivo.
4. Pruebas. Se elabora un plan de pruebas para corroborar y validar el funcionamiento del sistema de monitoreo.

3.1 Análisis de requerimientos

- *Problema de estudio.* Unicauca Estéreo es un medio de comunicación institucional, adscrito a la Vicerrectoría de Cultura y Bienestar de la Universidad del Cauca, de carácter universitario y regido por los principios constitucionales y legales de la República de Colombia. Los estudios de la emisora se encuentran ubicados en la ciudad de Popayán, en la Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación. El sistema de transmisión se encuentra ubicado en la vereda La Rejoja, en un predio de la Universidad del Cauca. Está constituido por un transmisor con una capacidad de radiar en FM a una potencia máxima de 5KW, además, cuenta con un regulador de voltaje trifásico de 220V. Para lograr buena cobertura la antena, a través de la cual se radia la señal, está ubicada en una torre a 50m de altura. El transmisor y el regulador de voltaje se encuentran en el interior de una caseta metálica de 4 metros de ancho por 4 metros de largo y un techo con tejas de zinc. Debido a estos materiales, al interior del cuarto se alcanzan temperaturas superiores a 30°C. El cuarto de equipos no cuenta con un sistema de ventilación ni de refrigeración haciendo difícil mantener o conservar las condiciones ideales para el funcionamiento de los equipos del sistema transmisor.

Desde hace algunos años, el sistema de transmisión de Unicauca Estéreo presenta irregularidades en su funcionamiento, debido a que el módulo encargado de la alimentación deja de funcionar o interrumpe el suministro de energía eléctrica, provocando que la emisora quede fuera de servicio. Las posibles causas son básicamente las altas temperaturas y la falta de ventilación en el lugar. De acuerdo con el fabricante del equipo transmisor, la temperatura ideal debe estar entre 10°C y 30°C para garantizar un óptimo desempeño. Por esto es importante realizar un seguimiento exhaustivo a dicha variable, porque conservar las condiciones recomendadas por el fabricante contribuye a obtener un buen funcionamiento del mismo.

Para mejorar las condiciones de operación, se busca diseñar e implementar un sistema que permita monitorear y controlar las variables que afectan el funcionamiento del transmisor, se considerará la temperatura, la corriente y la humedad relativa.

- *Requerimientos.* Con base en el problema de estudio, a continuación, se presenta la definición de los requerimientos para la implementación del sistema de monitoreo.

Requerimiento 1: Monitorear temperatura y humedad en el interior de la caseta de operación y las corrientes de línea a la salida del regulador de voltaje del sistema de transmisión de Unicauca Estéreo.

Requerimiento 2: Emplear sensores y demás dispositivos que soporten las condiciones climáticas de la zona.

Requerimiento 3: Permitir la visualización local, remota y en tiempo real de la información captada por los sensores.

Requerimiento 4: Usar sensores de corriente no-invasivos.

Requerimiento 5: Evitar las densidades de cableado y facilitar la movilidad del sistema.

Requerimiento 6: Utilizar dispositivos eficientes y de bajo costo.

Requerimiento 7: Utilizar la banda ISM para establecer la comunicación entre los nodos inalámbricos.

Requerimiento 8: Comunicar continuamente los nodos sensores con el nodo coordinador.

3.2 Diseño

Esta etapa tiene como finalidad plantear la construcción de un sistema de monitoreo, para brindarle una solución al problema planteado. Es necesario especificar las tareas a desempeñar por cada componente y seleccionar los que mejor se adapten a los requerimientos del sistema de monitoreo.

- *Definición del sistema de monitoreo pasivo.* El modelo básico del sistema de monitoreo pasivo está conformado por un nodo coordinador, que actúa como maestro, y los nodos sensores, que son esclavos. El sistema debe medir corrientes de línea del regulador de voltaje, así mismo, temperatura en grados centígrados y porcentaje de humedad relativa en la caseta del sistema de transmisión de Unicauca Estéreo. También es necesario que la información recopilada por la red de sensores se pueda visualizar, para lo que se plantean tres formas de hacerlo:

1. Local: Una pantalla de visualización, ubicada en el sistema de transmisión de Unicauca Estéreo.
2. Remota: Una plataforma web, a la que se accede desde cualquier dispositivo conectado a Internet.
3. Aplicación de escritorio: Que permite observar gráficamente todos los datos obtenidos y almacenados previamente por el sistema de monitoreo, durante el tiempo de funcionamiento del mismo.

En la Figura 2 se observa el modelo básico del sistema de monitoreo, en la que se especifican los sensores, el coordinador de la red, el enlace y la conexión a la plataforma web a través de Internet.

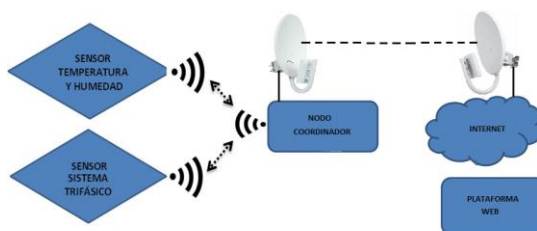


Figura 2. Modelo del sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo se compone de tres tipos de sensores: de temperatura, de humedad relativa y de corriente AC. Para reducir costos, los sensores de humedad y temperatura se incorporan en un sólo dispositivo. En la Tabla 1 se muestran las características de los sensores que se ajustan a las necesidades del sistema.

Los sensores HC2S3 y HMP60 son dispositivos con un amplio rango de medición para temperatura y humedad, además, cuentan con un conversor analógico/digital que

entrega la señal medida en bits. El primero maneja mayor precisión, sin embargo, los dos tienen la desventaja de mediano y alto consumo de potencia y un elevado costo. El sensor de temperatura y humedad SHT11 tiene buenas prestaciones, pero fue descartado por su costo. El dispositivo DHT22 maneja buenos rangos de medición, buena precisión, bajo consumo de potencia y tiene bajo costo. Así mismo, ya se encuentra calibrado, por lo que no es necesario añadir ningún circuito de tratamiento de señal.

Tabla 1. Sensores de temperatura y humedad

Sensor	Temperatura	Humedad	Consumo	Costo
SHT11	± 0.4 °C	± 0.3 %	Bajo	Alto
HC2S3	± 0.1 °C	± 0.8 %	Medio	Medio
HMP60	± 0.6 °C	± 3 %	Alto	Medio
DHT22	± 0.1 °C	± 1 %	Bajo	Bajo

Actualmente, existe una amplia cantidad de sensores para medir corriente alterna, sin embargo, de acuerdo con los requerimientos del sistema, los más aptos a emplear se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Sensores de corriente

Sensor	Costo	Linealidad	Capacidad	Consumo
ACS712	Bajo	Pobre	Muy bajo	Medio
SCT013	Medio	Buena	Alto	Bajo
TA12-100	Alto	Buena	Alto	Bajo

El sensor ACS712 está constituido por un circuito integrado basado en el efecto Hall para medir la intensidad de corriente. Cuando fluye una corriente a través de él, se genera un campo magnético que el dispositivo convierte en un voltaje proporcional de salida. Sin embargo, la capacidad de medición de corriente es muy baja y es un sensor de tipo invasivo. Los sensores SCT013 y TA12-100 son Transformadores de Corriente CT, que utilizan el principio de un transformador para convertir la alta corriente primaria en una secundaria más pequeña. Son dispositivos pasivos que no necesitan circuitos adicionales de control. Al mismo tiempo, pueden medir niveles de amperajes muy altos, consumen poca potencia y son no-invasivos, esto es una ventaja porque no implica abrir la circuitería del sistema para medir la corriente.

En la Tabla 3 se muestran las opciones disponibles en el mercado para las unidades de procesamiento de los nodos sensores [5].

Tabla 3. Unidades de procesamiento para los nodos sensores

Micro	Procesador	Reloj	Voltaje	Costo
Arduino Uno	ATmega328	16MHz	5V	Medio
Arduino Mega	ATmega2560	16Mhz	5V	Medio
Arduino Leonardo	ATmega32u4	16Mhz	5V	Medio
Arduino Pro Mini	ATmega168	8MHz	3.3V	Bajo

Por otro lado, las unidades de procesamiento se ubican en cada uno de los nodos sensores y en el nodo coordinador, dependiendo de ello varían las funciones que deben desempeñar. Se pueden dividir en dos clases:

1. Una unidad de procesamiento, que se emplea en los nodos sensores, que recibe y, si es del caso, digitaliza la información brindada por los sensores. También, debe administrar la interfaz de comunicación que permite enviar datos hasta el nodo coordinador.

- Una unidad que se encuentra en el nodo coordinador y es la encargada de operar en modo maestro respecto a la comunicación con los nodos sensores. Además, debe gestionar el envío de datos a través de un enlace punto a punto hasta la web.

Los nodos sensores deben realizar tareas muy básicas, de manera que no es necesario implementar un procesador de alto rendimiento. El Arduino Pro Mini contiene un microcontrolador ATmega168, con versiones de 3.3V y 8MHz o 5V y 16MHz. Se caracteriza por su flexibilidad, bajo precio y tamaño reducido. En cuanto a las unidades de procesamiento para el nodo coordinador, Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. Los microcontroladores más usados son Atmega168, Atmega328, Atmega1280 y ATmega8 por su sencillez y bajo costo, lo que permite el desarrollo de múltiples diseños.

Raspberry Pi [6] es un computador de placa reducida de bajo costo, desarrollado con el objetivo de estimular la enseñanza de las Ciencias Computacionales en las escuelas. El diseño incluye un procesador central ARM1176JZF-S a 700 MHz, un procesador gráfico VideoCore IV y 512 MB de memoria RAM. El diseño no incluye disco duro ni unidad de estado sólido, porque usa una tarjeta de Seguridad Digital SD para el almacenamiento permanente de la información. Soporta un sistema operativo de las distribuciones Linux para controlar el Hardware. Este microcontrolador está diseñado para proyectos que demandan gran cantidad de procesamiento de información, aunque se podría utilizar para este trabajo, no se aprovecharía su capacidad eficientemente. En cambio, el microcontrolador Arduino, por su alta densidad de pines de entrada y salida, está diseñado para aplicaciones enfocadas más a hardware que a software. Por lo tanto, se opta por utilizar Arduino como el microcontrolador para el nodo coordinador.

Arduino Ethernet es una tarjeta basada en el microcontrolador ATmega328, tiene 14 pines digitales de entrada/salida, 6 entradas analógicas, operación a 5V y un oscilador de cristal de 16MHz. Además, cuenta con un puerto RJ45 que brinda conexión Ethernet, que se implementa en el nodo coordinador, puesto que se encarga de enviar los datos hacia la plataforma web.

A través de los módulos de comunicación Inalámbrica se puede intercambiar información entre los nodos sensores y el nodo coordinador. En la Tabla 4 se presenta una comparación entre diferentes módulos radio que trabajan en la banda de 2.4GHz bajo la configuración maestro/esclavo, donde el parámetro Rx dBm hace referencia a la sensibilidad del dispositivo.

Tabla 4. Módulos de comunicación radio

Micro	Tasa (Mbps)	Rx (dBm)	Costo
NRF24L01	2	-90	\$ 8.000
HC-05	3	-80	\$ 30.000
XBee	250	-92	\$ 30.000
CC2500	50	-104	\$ 50.000

El módulo XBee [7] es una solución integrada que brinda un medio inalámbrico para la interconexión y comunicación de dispositivos, utiliza el protocolo 802.15.4 para crear redes punto a multipunto y se emplea en aplicaciones que requieren alto tráfico de datos. Su costo es elevado en comparación con NRF24L01 [9]. Por eso, y debido a que el sistema de monitoreo no requiere grandes tasas de transmisión, se descarta el uso de este dispositivo. El módulo HC-05 es un dispositivo que brinda la posibilidad de una

conexión maestro/esclavo, en la que el maestro envía peticiones de transmisión y los esclavos están a la escucha de las mismas. Tiene una tasa de transmisión baja y trabaja en la banda ISM, su principal desventaja es un costo elevado. El módulo NRF24L01 es un transceptor diseñado para aplicaciones inalámbricas, que demanden un bajo tráfico de datos, consume baja potencia, tiene un bajo costo y trabaja en la banda ISM. Este dispositivo se configura y opera a través de la Interface Periférica Serial SPI y posee un protocolo basado en comunicación por paquetes.

Con el propósito de establecer el enlace radioeléctrico entre las instalaciones del sistema de transmisión de Unicauca Estéreo y los estudios de la emisora, se determina ubicar los equipos de comunicaciones en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET) de la Universidad del Cauca, contigua a los estudios. La Figura 3 muestra una imagen satelital del radio enlace, en la que se observa la topografía de la región donde se realiza la comunicación.

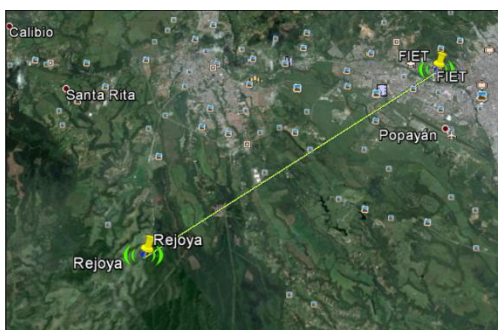


Figura 3. Enlace de Comunicaciones

Se observa que existe una línea de vista entre los puntos de interés y que la señal no colisiona con alguna obstrucción durante el trayecto de 7.74Km, aunque a los 2.2 Km se observa un punto crítico donde la señal pasa cerca de un obstáculo. Debido a esto, realizar la comunicación en 2.4 GHz es más crítico que si se realiza en 900 MHz, pues la longitud de onda es más grande y permite sobrepasar el obstáculo sin complicaciones, a diferencia del enlace en 2.4 GHz. Por lo anterior, la frecuencia más viable a utilizar en el sistema es la de 900 MHz, dado que permite obtener mayores niveles de potencia recepción.

Para realizar el enlace radio-eléctrico es indispensable utilizar equipos de radiofrecuencia que operen en la banda de 2.4GHz o 900MHz. En las Tablas 5 y 6 se observan los dispositivos que se ajustan a los requerimientos del enlace, todos brindan velocidades superiores a 150Mbps [8].

Tabla 5. Dispositivos de radiofrecuencia en la banda de 2.4GHz

Dispositivo	Potencia salida	Sensibilidad	Ganancia antena
AG-HP-2G16	28dBm	-97dBm	16dBi
NanoStation M2	26dBm	-97dBm	17dBi
NanoStation Loco M2	23dBm	-83dBm	8.5dBi
PBE-M2-400	28dBm	-97dBm	18dBi

Tabla 6. Dispositivos de radiofrecuencia en la banda de 900MHz

Dispositivo	Potencia de salida	Sensibilidad	Ganancia antena
Rocket M900	28dBm	-96dBm	16dBi
NanoStation Loco M9	28dBm	-96dBm	8dBi
NanoBridge M9	28dBm	-96dBm	10.6-11.3dBi
BaseStation Sector Antenna	30dBm	-97dBm	13.2-13.8dBi

3.3 Implementación

En la Figura 4 se observan los componentes del sistema de monitoreo de condiciones técnicas y ambientales del sistema de transmisión de Unicauca Estéreo y los dispositivos empleados. Se tienen dos tipos de comunicación inalámbrica de corta distancia: una que se establece entre los nodos sensores y el nodo coordinador, y la otra entre La Rejoja y la FIET que cubre una distancia de 7.5 kilómetros.

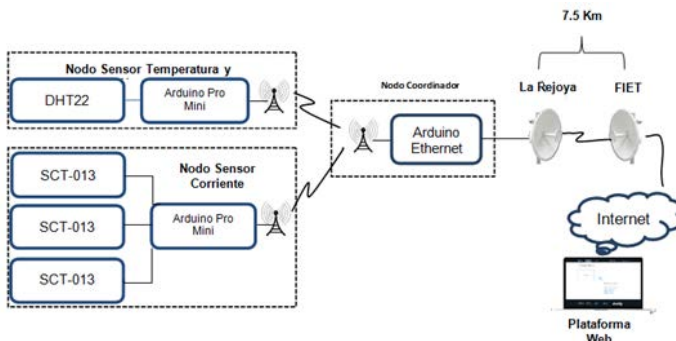


Figura 4. Componentes del sistema de monitoreo

Se seleccionó el nodo coordinador Arduino Ethernet, dadas sus capacidades, su bajo consumo de potencia y el costo. Adicionalmente, el dispositivo trae incorporado un módulo que le permite comunicarse con una red Ethernet. El módulo que soporta la comunicación inalámbrica y que permite intercambiar información con los nodos sensores es el NRF24L01. Este dispositivo fue seleccionado debido a que permite hacer una comunicación maestro-esclavo usando el protocolo de comunicaciones Enhanced Shockburst™, que permite conectar máximo 6 esclavos con un maestro. Además, estos módulos traen una función para la corrección de errores y el reenvío de paquetes, lo que garantiza la calidad de la comunicación. El sistema de monitoreo implementa la trama de datos de la Figura 5, para establecer la comunicación entre los nodos sensores y el nodo coordinador.

Preámbulo (1byte)	Dirección (3-5bytes)	Campo de Control de Paquetes (9bits)	Carga Útil (0-32bytes)	CRC (1-2bytes)
-------------------	----------------------	--------------------------------------	------------------------	----------------

Figura 5. Trama de datos

El campo Preámbulo tiene un tamaño de 1 byte, es una secuencia de bits utilizada para la sincronización con el receptor e indica que una trama de datos inicia allí. El campo Dirección corresponde a la dirección asignada al receptor y se utiliza para asegurar que un paquete es detectado y recibido por el receptor correcto; este campo puede tener una longitud de 3, 4 o 5 bytes, según sea configurado. El tercer campo contiene nueve bits de información y se conforma como se muestra en la Figura 6.

Longitud de Carga Útil (6bits)	Identificador de paquete (2bits)	NO_ACK (1bit)
--------------------------------	----------------------------------	---------------

Figura 6. Campo de control de paquetes

Los primeros 6 bits de información indican la longitud en bytes de la carga útil, el siguiente tiene un tamaño de 2 bits y corresponden al Identificador de Paquete PID, y finalmente una bandera de un bit. El campo carga útil representa la información captada por el sensor y puede tener un ancho de hasta 32 bytes. Para garantizar la integridad de la información se añade a la trama un Código de Redundancia Cíclica CRC de uno o dos bytes, según la configuración del dispositivo. En la Figura 7 se observa la versión final desarrollada para el nodo coordinador.

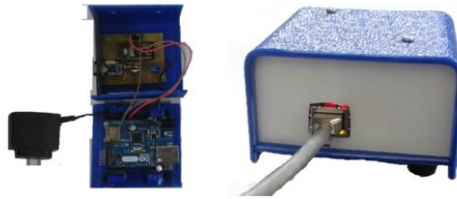


Figura 7. Versión final del nodo coordinador

Para el nodo sensor de temperatura y humedad se seleccionó el dispositivo DHT22, debido a la sensibilidad, el bajo consumo de potencia y el costo, además, brinda valores de temperatura y humedad en secuencias binarias, facilitando las tareas de procesamiento de la información. La unidad de procesamiento que se emplea en el nodo sensor es el Arduino Pro Mini y el módulo de comunicación inalámbrica es el NRF24L01, configurado en modo esclavo. La versión final del nodo sensor de temperatura y humedad se muestra en la Figura 8.

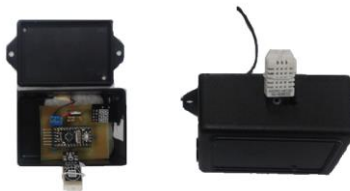


Figura 8. Versión final del nodo de temperatura y humedad

El sensor de corriente seleccionado fue el SCT013, que utiliza un transformador de corriente para transformar las altas corrientes primarias en corrientes secundarias más pequeñas. Emplea el Arduino Pro Mini, debido a que las características de este dispositivo se adaptan a los requerimientos del nodo, además, se utiliza el módulo de comunicación inalámbrica NRF24L01 en modo esclavo. En la Figura 9 se presenta el nodo sensor de corriente implementado, se observan los tres sensores utilizados para medir las corrientes de línea del sistema de transmisión de Unicauca Estéreo.

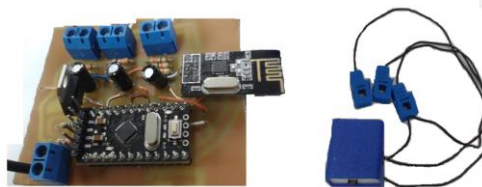


Figura 9. Versión final nodo sensor de corriente

Con el propósito de establecer el radio enlace eléctrico entre las instalaciones del sistema de transmisión de Unicauca Estéreo y la FIET, se realizó un análisis básico en RadioMobile en 2.4GHz y 900MHz, para determinar su viabilidad.

La interfaz de visualización local cuenta con una Pantalla LCD que hace parte del nodo coordinador, la cual está ubicada en el sistema de transmisión de Unicauca Estéreo. En ella se pueden observar los valores de temperatura, humedad y corrientes de línea en tiempo real. La interfaz de visualización remota se implementa a través de la plataforma Web Xively [9], que esencialmente es una nube especializada en recibir y desplegar información de los distintos sensores que se requieran conectar.

Para la integración de Xively con el sistema de monitoreo, primero se creó un nuevo dispositivo privado en la plataforma web, llamado Sistema de Monitoreo Unicauca, para determinar quién tiene acceso a la información. Gracias a la biblioteca que brinda Xively

para trabajar con placas de Arduino [10], la interacción con el sistema se hace mucho más fácil y los datos se envían por el Arduino Ethernet a la plataforma de Xively. La aplicación de escritorio está implementada en el entorno de desarrollo Netbeans con el lenguaje de programación Java. En la Figura 10 se observa el menú principal de la interfaz gráfica y en la Figura 11 se muestra un ejemplo de la gráfica de corrientes.

Figura 10. Menú principal de la interfaz gráfica

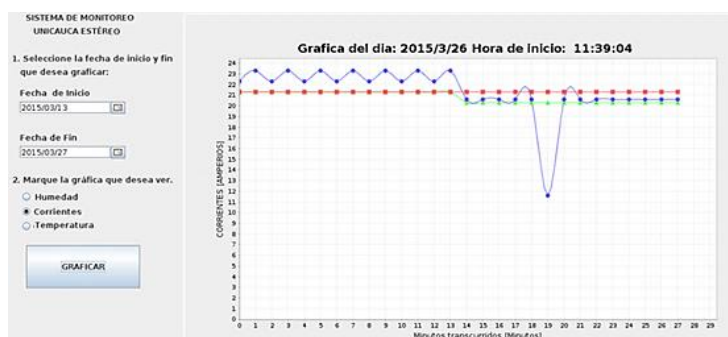


Figura 11. Ejemplo de la gráfica de corrientes

3.4 Plan de pruebas

Para la evaluación del sistema, las pruebas se dividen en dos grupos, como se muestra a continuación:

1. Evaluación de parámetros técnicos: se analiza la cobertura, Tasa de Error de Tramas FER, integridad de la información y desempeño del enlace radioeléctrico.
2. Prueba de monitoreo: se pone en funcionamiento el sistema de monitoreo durante 15 días, con el fin de recopilar información y analizar el comportamiento del mismo.

3. Resultados

3.1 Cobertura

El sistema de monitoreo está diseñado para ser puesto en funcionamiento en el cuarto de equipos del sistema de transmisión de Unicauca Estéreo, sin embargo, no se descarta la posibilidad emplearlo en diversas aplicaciones, que involucren la medición de parámetros tales como temperatura, humedad y corriente. Por esta razón, se realizan pruebas de cobertura en el entorno real de aplicación y en entornos distintos para el cual fue desarrollado, con el objetivo de determinar el alcance máximo entre nodos en interiores con y sin línea de vista y, además, concluir si es viable emplear el sistema de

monitoreo de condiciones técnicas y ambientales en otras aplicaciones. Inicialmente se determinó el alcance máximo de los nodos sensores respecto al nodo coordinador, en interiores con y sin línea de vista empleando cuatro valores de potencia, como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7. Valores de potencia de transmisión

Potencia de TX	Valor (dBm)
Alta	0
Media	-6
Baja	-12
Muy baja	-18

En la Figura 12 se muestra el primer escenario, en el que se ubicó el nodo coordinador y los nodos sensores en la caseta del transmisor de Unicauca Estéreo, el primero en el interior de una gaveta representando el peor de los casos, porque las paredes de la estructura metálica obstruyen la señal.

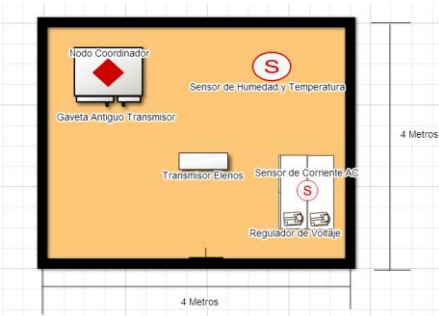


Figura 12. Escenario de pruebas

De acuerdo con los datos de la Tabla 8, es posible establecer la comunicación entre los nodos sensores y el nodo coordinador con potencias alta, media y baja, con excepción de la muy baja debido a que los paquetes no llegan a su destino, porque -18dBm de potencia no es suficiente para superar la obstrucción que se presenta entre los nodos.

Tabla 8. Resultados del primer escenario

Potencia de TX	Cobertura
Alta	Sí
Media	Sí
Baja	No
Muy baja	No

En las Figuras 13 y 14 se observa el segundo escenario de prueba, en el que se ubicaron los nodos del sistema en un pasillo bajo condición de línea de vista, variando la distancia de separación entre estos para cada valor de potencia de transmisión.

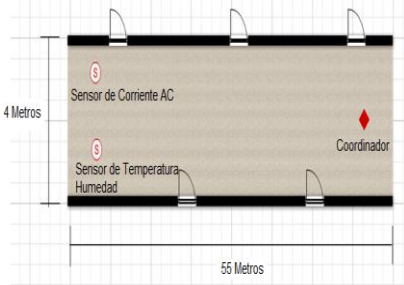


Figura 13. Segundo escenario de pruebas



Figura 14. Plano 3D del segundo escenario

Las distancias máximas alcanzadas se muestran en la Tabla 9. Como se observa en estos datos, el sistema consigue un alcance máximo de 51m, gracias al efecto de guía de onda que genera el pasillo, permitiendo que la señal viaje con pocas pérdidas. Con la potencia media fue posible alcanzar 43m, con la potencia baja 35m y con la muy baja 28m.

Tabla 9. Resultados del segundo escenario

Potencia de TX	Distancia (m)
Alta	51
Media	43
Baja	35
Muy baja	28

En la Figura 15 se muestra el tercer escenario, en el que se ubicó el nodo coordinador en una habitación y los nodos sensores en la habitación contigua sin línea de vista.

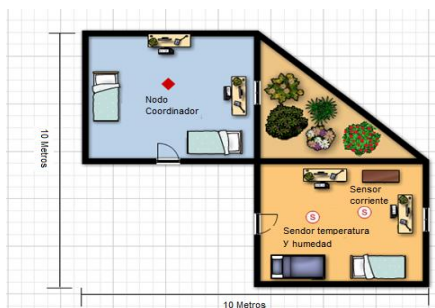


Figura 15. Tercer escenario de pruebas

En la Tabla 10 se observa que con las potencias de transmisión baja y muy baja no es posible establecer la comunicación, sin embargo, con las potencias altas y media sí fue posible realizarla, alcanzando una distancia máxima de 14m y 8m respectivamente.

Tabla 10. Resultados del tercer escenario

Potencia de TX	Distancia
Alta	14
Media	8
Baja	No fue posible
Muy baja	No fue posible

En la Figura 16 se observa el cuarto escenario, en el que se ubicó el nodo coordinador en un piso diferente al de los nodos sensores. Debido a que el grueso de la plancha es de 17cm y está construida con cemento y hierro, fue posible establecer el enlace solamente con la potencia alta, alcanzando una distancia máxima de 6m. Esto se logró porque la plancha era el único obstáculo, pero en los casos donde existía una alta densidad de electrodomésticos o artículos de hogar, la distancia máxima se redujo hasta 2.9m.

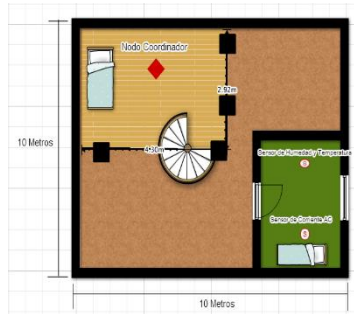


Figura 16. Cuarto escenario de pruebas

Se concluye que el sistema de monitoreo funciona correctamente en el primer escenario, que corresponde al entorno real de aplicación. En el segundo se alcanzó una distancia máxima de 51m con la máxima potencia y para el tercero el alcance del sistema fue de 14m. Finalmente, el sistema está diseñado especialmente para operar en una planta, pero no se descarta la opción de emplearlo entre pisos de un edificio siempre y cuando la distancia no supere los 6m.

3.2 Evaluación de Tasa de Error de Trama (FER)

La prueba se realizó en el escenario real de aplicación, en el que el nodo coordinador se colocó en el interior de un armario a una distancia de 4m respecto a los nodos sensores, tal como se observa en la Figura 17.

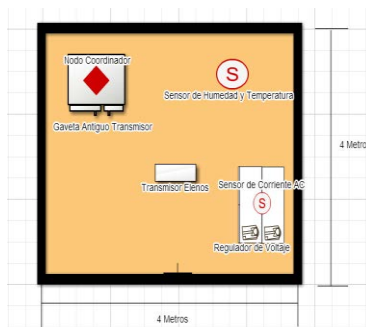


Figura 17. Escenario real de pruebas

Se configuró un código para que los nodos sensores enviaran 2500 tramas de información al nodo coordinador, por lo cual debe recibir 5000 tramas porque son dos nodos sensores. En la Figura 18 se muestran los resultados de la prueba desplegados a través de la ventana del Monitor Serial del ARDUINO IDE.

```

/dev/ttyUSB0
Tramas de N_temperatura correctas: 2500
Tramas de N_temperatura incorrectas: 0
Tramas de N_Corriente correctas: 2498
Tramas de N_Corriente incorrectas: 2

```

Figura 18. Tramas correctas e incorrectas

A partir de la ecuación (1) se calculó la FER, cuyos resultados se observan en la Tabla 11. Esta prueba se repitió cinco veces y los resultados que se muestran en la Tabla 5 corresponden a los promedios.

$$\%FER = \frac{\text{Tramas incorrectas recibidas}}{\text{Tramas totales enviadas}} \times 100 \quad (1)$$

De acuerdo con los datos de la Tabla 11, el nodo sensor de temperatura y humedad presenta una FER de 0%, mientras que el nodo sensor de corriente de 0.08%, es decir, que de 2500 tramas enviadas dos no llegaron o llegaron erróneas.

Tabla 11. FER de los dispositivos sensores del sistema de monitoreo

Nodo	Tramas		% FER
	Correctas	Incorrectas	
Temperatura y humedad	2500	0	0
Corriente	2498	2	0.08

Durante la prueba el sistema de monitoreo intercambió un total de 5000 tramas de información, de las cuales se presentaron dos erróneas, por lo que se determina que la FER total del sistema es de 0.04% o 4×10^{-4} , indicando que por cada 10000 tramas se recibirán 4 erróneas. En general, para conexiones inalámbricas en aplicaciones de monitoreo no se especifica un valor máximo permitido de FER, sin embargo, la obtenida para el sistema garantiza un funcionamiento continuo, teniendo en cuenta que, en caso de perderse una trama de información, el sistema realiza un nuevo ciclo de recolección de información en un corto lapso de tiempo.

3.3 Desempeño del enlace radioeléctrico

Para verificar el funcionamiento del enlace radioeléctrico, el equipo ubicado en La Rejoja se configuró como punto de acceso y el ubicado en la FIET como estación. En la Figura 19 se muestra la configuración de la red empleada.

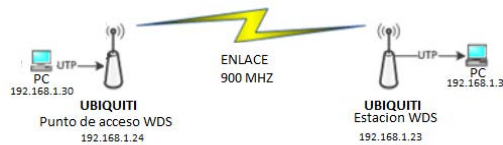


Figura 19. Configuración del enlace

Para esta prueba se envió una solicitud de eco ICMP desde el computador con dirección IP 192.168.1.30, ubicado en la Rejoja, a los demás dispositivos que conforman la red. En la Tabla 12 se presentan los resultados de conectividad del enlace radioeléctrico, en todos los casos se enviaron 100 paquetes.

Tabla 12. Resultados de conectividad

Emisor	Receptor	Paquetes perdidos	Latencia (ms)
192.168.1.30	192.168.1.24	0	6
192.168.1.30	192.168.1.23	0	30
192.168.1.30	192.168.1.31	0	34

De acuerdo con la Tabla 12 no se presentaron pérdidas de paquetes, por lo cual se concluye que el radioenlace entre La Rejoja y la FIET funciona correctamente. La carga útil que se envía a través del enlace de comunicaciones cada minuto es de 48 bytes y el equipo de radiofrecuencia está configurado para soportar una tasa de transferencia de 6.5Mbps. Debido a que el volumen de información que se envía es mínimo, comparado con la capacidad del equipo, no se considera necesario realizar análisis de *throughput*.

3.4 Prueba de Monitoreo

En esta prueba el sistema de monitoreo de variables técnicas y ambientales se puso en funcionamiento en la estación de transmisión de Unicauca Estéreo. En la Figura 20 se puede apreciar que la temperatura del entorno alcanzó un máximo de 32°C entre la 1:33

pm y la 1:45 pm del 17 de abril de 2015. Además, todos los días, el cuarto de equipos desciende a una temperatura mínima entre 14 y 15°C en horas de la madrugada. Según recomendaciones del fabricante del transmisor, la temperatura ambiente del cuarto de operaciones no debe superar los 30°C, para obtener un óptimo rendimiento del equipo.

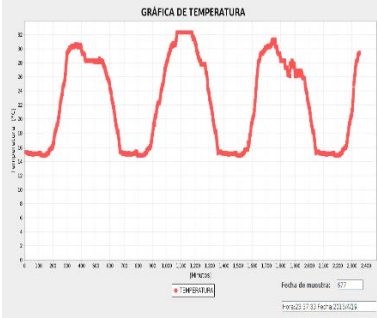


Figura 20. Temperatura del sistema monitoreado entre el 16 y 19 de abril

En la Figura 21 se observa el comportamiento de la humedad, que alcanza un valor máximo de 40.5% y un mínimo de 35% en las madrugadas. Además, los valores máximos de humedad se alcanzan entre las 8 am y las 10 am, cuando la temperatura se eleva debido a la puesta del sol y con ello se realiza el proceso de evaporación del agua condensada durante la noche. El fabricante del equipo transmisor recomienda una humedad máxima 95% cuando el equipo está en funcionamiento.



Figura 21. Humedad del sistema monitoreado entre el 16 y 19 de abril

La Figura 22 representa la gráfica de corrientes, donde la primera fase oscila alrededor de los 22.1A y las fases 2 y 3 alrededor de 21.1A. Según el fabricante del equipo transmisor, las corrientes de fase deben ser mínimo de 19A, pero no aclara cuál es el valor máximo soportado en un sistema trifásico de 220VAC.

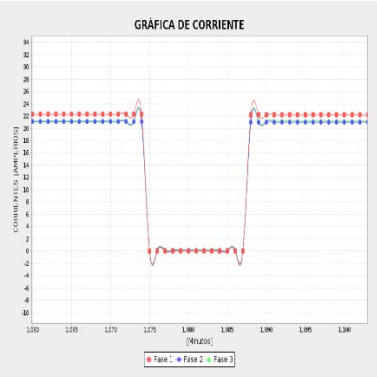


Figura 22. Corriente del sistema monitoreado entre el 16 y 19 de abril

Las tres fases de corriente presentan una caída brusca de amperaje, decaen de su valor promedio hasta 0A, lo que indica que ocurrió una interrupción del flujo de corriente. Dicha caída de amperaje se dio el día 17 de abril a la 1:33 pm y se terminó a la 1:45 pm del mismo día. Además, se encontró que la caída de corriente sucedió en la misma hora en que se presentaron los picos altos de temperatura. En la Figura 23 se observa la gráfica de temperatura de la segunda semana de monitoreo. En esta semana los dos primeros días fueron los más calurosos, alcanzando temperaturas máximas de 32°C. Los siguientes días presentaron temperaturas más bajas.

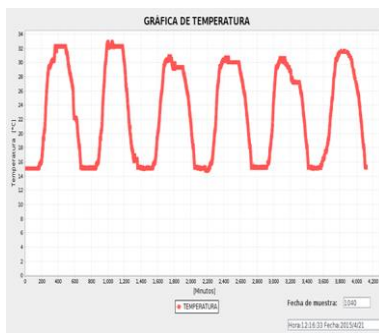


Figura 23. Temperatura del sistema monitoreado entre el 20 y 26 de abril

En la Tabla 13 se muestran las fallas ocurridas en el sistema de transmisión de Unicauca Estéreo durante el tiempo de monitoreo, se presenta la fecha, hora de inicio, duración de la falla y los valores registrados para cada una de las variables monitoreadas (I: corriente, T: temperatura, H: humedad) en este tiempo.

Tabla 13. Lista de las fallas registradas por el sistema de monitoreo.

Fecha	17/04	20/04	26/04	27/04
Hora	1:33 PM	2:05 PM	1:13 PM	2:17 PM
Duración	13``	7``	15``	15``
I(A)	0	0	0	0
T(°C)	32.3	32.2	32.4	32.1
H(%)	40.5	40.6	39.5	40.7
Paquetes Perdidos	0	0	0	0
Latencia (ms)	6	3	3	4

En la Tabla 13 se observa que las caídas del flujo de corriente se ocasionaron en días calurosos, cuando la temperatura sobrepasaba los 30°C; estas temperaturas sobrepasaron el umbral recomendado por el fabricante del equipo transmisor. Por lo tanto, se concluye que las caídas en el flujo de corriente están relacionadas con las altas temperaturas que alcanza la caseta de transmisión de Unicauca Estéreo. Por consiguiente, se recomienda a los encargados del control y mantenimiento del transmisor, equipar la caseta con un sistema de refrigeración que garantice los niveles de temperatura recomendados por el fabricante para mejorar su rendimiento; así mismo, se sugiere revisar el circuito interno del regulador de voltaje, porque no mantiene el nivel deseado de corrientes de fase, y una de ellas frecuentemente falla.

4. Conclusiones

Se identificaron satisfactoriamente los sensores de temperatura, humedad y corriente, los procesadores de información y la tecnología inalámbrica que permitió la correcta comunicación entre los distintos nodos inalámbricos del sistema de monitoreo de condiciones técnicas y ambientales.

Utilizando módulos inalámbricos en modo maestro-esclavo y haciendo uso de las tarjetas de desarrollo Arduino, se logró la correcta comunicación e intercambio de información a bajas tasas de errores entre los nodos sensores. Con esto se garantiza la confiabilidad teniendo en cuenta que, en caso de perder una trama de información, cada minuto se realiza un nuevo ciclo de recolección de información.

Al interior de los pasillos, el sistema de monitoreo de condiciones técnicas y ambientales presenta un alcance máximo de 51m entre sus nodos inalámbricos. Además, es posible ubicar los nodos sensores en distintas habitaciones, con una separación máxima de 14m y empleando la potencia de transmisión más alta, por lo cual, el sistema permite una amplia movilidad de los nodos sensores.

El sistema de monitoreo diseñado presenta un buen desempeño, debido a que se realizó una prueba de monitoreo durante 15 días, en la cual se registró el comportamiento de las variables técnicas y ambientales, se envió la información a una plataforma web, se almacenaron los datos en una memoria SD y se graficó el comportamiento de las variables monitoreadas en la aplicación de escritorio para su posterior análisis.

De acuerdo con el análisis de la información recopilada por el monitoreo realizado en la caseta de transmisión de Unicauca Estéreo, se encontró que alcanza una temperatura mínima de 15°C durante la noche y una máxima de 32°C durante las horas más soleadas. La humedad desciende hasta un 36% de humedad relativa y un valor máximo de 41%. Las corrientes de fase, que van desde el regulador de voltaje al transmisor de alta potencia, presentan valores entre 21A y 22A; según el fabricante del equipo transmisor, las corrientes de fase deben ser mínimo de 19A, pero no aclara cual es el valor máximo soportado en un sistema trifásico de 220VAC. Al mismo tiempo, ocurrieron cuatro interrupciones en el flujo de corriente con una duración promedio de 12 minutos.

Es necesario equipar la caseta de transmisión de Unicauca Estéreo con un sistema de refrigeración, que garantice mantener los niveles de temperatura recomendados por el fabricante y así mejorar su rendimiento, porque se encontró que las fallas que ocurren en el transmisor están relacionadas con la temperatura del ambiente, por lo que sucedieron justo en los días más calurosos cuando se presentaron temperaturas superiores a los 30°C.

Referencias

- [1] Capella, J. (2010). *Redes inalámbricas de sensores: Una nueva arquitectura eficiente y robusta basada en jerarquía dinámica de grupos*. Disertación Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- [2] Jong, I. & Lee, S. (2013). *Development of Telemetry Data Processing Program*. In International Conference on ICT Convergence. Jeju, South Korea.
- [3] Maroto, S. (2010). *Desarrollo de Aplicaciones Basadas en WSN*. Universidad Politécnica de Valencia.
- [4] Bennedsen, J. & Caspersen, M. (2007). *Failure rates in introductory programming*. ACM SIGCSE Bulletin 39(2), pp. 32-36.
- [5] <https://www.arduino.cc/>
- [6] <https://www.raspberrypi.org/>
- [7] <http://xbee.cl/que-es-xbee/>
- [8] <http://www.ubiquitocolombia.com/ubiquiti/>
- [9] <https://www.xively.com/>
- [10] <https://personal.xively.com/dev/libraries/>

22. Diseño de un banco de pruebas para caracterizar motores de combustión interna y eléctricos

Luisa Mónico
Mayra Bogotá
Christiam Casas

Universidad de San Buenaventura Bogotá, Colombia.

1. Introducción

En la actualidad, el uso de motores eléctricos tiene amplia demanda debido al bajo costo de operación, procesos de mantenimiento sencillos, bajos niveles de ruido y adecuadas prestaciones mecánicas que se ajustan a los requerimientos de producción. Por eso es que la fabricación y el estudio de estos motores se debe realizar bajo exigentes estándares mecánicos, que permitan obtener las mayores prestaciones. La industria aeronáutica y automotriz han encontrado en estos motores una alternativa que brinda valores de par y potencia iguales o superiores a los alcanzados por los motores de combustión interna, además de representar una fuente de energía limpia y más económica.

En el sector automotriz, se han llevado a cabo numerosas investigaciones con el objetivo de implementar conceptos de automóviles impulsados por energía eléctrica. Algunos modelos lo hacen únicamente por energía eléctrica y otros de forma híbrida, es decir, compuestos por un motor de combustión interna y uno eléctrico. Un ejemplo de esto es el desarrollo de la compañía Tesla Motors®, que se destaca por el uso de motores eléctricos en sus creaciones y cuyo producto principal son vehículos impulsados totalmente con motores eléctricos de corriente AC. Actualmente, sus modelos sobresalen, en comparación con otros, por recorrer mayores distancias con una menor cantidad de energía, demostrando un ahorro en costo de operación con respecto a los que utilizan combustibles fósiles. Estos autos tienen un rango de 270 millas con aproximadamente 3 motores, donde cada uno brinda cerca de 259 hp y un par de 485 lb.ft, permitiéndole al usuario alcanzar una velocidad máxima de 155 mph [1].

Por otro lado, en la industria aeronáutica ha aumentado significativamente el uso de los sistemas no-tripulados, que emplean motores a reacción o motores eléctricos. Por lo general, los sistemas de propulsión eléctricos son seleccionados por su bajo costo en operación y mantenimiento. El uso de este tipo de motores se aprovecha con la caracterización de distintas hélices, que permiten generar la fuerza de empuje requerida por la aeronave. En las no-tripuladas, los componentes electrónicos tienen amplia relevancia, porque se encargan de controlar la aeronave o el vehículo aéreo, a partir del procesamiento de señales de control. Por ejemplo, para estos vehículos se utilizan motores que trabajan en función de la capacidad de la batería. Actualmente, las baterías de tipo Litio-polímero se muestran como una alternativa de energía dominante en el mercado, y la utilización se ha extendido a pesar de su delicada operación y manipulación por el voltaje y número de celdas.

Los motores eléctricos utilizados en estas aeronaves presentan una variación en las revoluciones por minuto del eje, en función del voltaje que brinda la batería. Por ejemplo, de acuerdo con el fabricante, el motor Turnigy Rotomax 80cc presenta 195 kV, lo que indica que por cada voltio que ingrese al motor se obtendrán 195 revoluciones por minuto. Debido a lo anterior, el fabricante sugiere utilizar 44 V para alcanzar el par máximo, lo cual brindará 8580 rpm. Por su parte, los motores de combustión interna no

han dejado de ser importantes, a pesar de desventajas tales como alto costo de operación y mantenimiento, elevada producción de contaminantes y alta generación de ruido. Estos motores se caracterizan por tener, en la mayoría de casos, facilidad de operación frente a los motores eléctricos.

Los motores alternativos que utilizan combustible fósil como fuente de energía principal, están caracterizados por los fabricantes a través de las curvas características de par y potencia, en función de las revoluciones por minuto a un nivel de carga. Por todo esto, la fiabilidad en cuanto al rendimiento del motor se medirá teniendo un amplio conocimiento de la capacidad de los motores. Para conocer el funcionamiento del motor se utilizan las curvas características, en las que se destacan parámetros tales como el par, velocidad angular o de giro del motor y la potencia. En el caso de los motores de combustión estas curvas las suelen entregar los fabricantes, sin embargo, normalmente no se encuentran disponibles.

Mecánicamente, los parámetros de par y potencia son los más importantes, porque con ellos se puede saber a qué máximo operacional se puede llevar el motor, en función de las revoluciones por minuto, y del mismo modo determinar la aplicación. Cabe destacar que el par o torque es la fuerza que se genera en el eje del motor. Es un parámetro que definirá el trabajo que se pueda producir con el motor, por lo tanto, a mayor par, mayor capacidad de generación de trabajo en el motor. Del mismo modo, la potencia es el producto del par con el régimen de giro, por lo que, para obtener la máxima potencia del motor, será necesario que tanto el régimen de giro como el par estén en su punto máximo [2].

Dada la importancia de las curvas características como parámetros principales de selección de un motor, la experimentación se debe realizar en un banco de pruebas, con dispositivos de medición capaces de registrar la velocidad de giro y el par del motor, lo mismo que un sistema estructural que permita transmitir el par al equipo de medición. Para obtener esta caracterización, una de las alternativas es el freno tipo Prony que, mediante fricción y con un equipo de medición de fuerza y de revoluciones por minuto, permite realizar una adecuada caracterización de los motores. Considerando lo anterior, en este capítulo se describe el banco de pruebas acoplado a un freno tipo Prony, en la Universidad de San Buenaventura Bogotá, el cual se encuentra disponible para realizar la caracterización de motores eléctricos y motores de combustión alternativos.

Igualmente, se describen los equipos de medición presentes, tales como dinamómetro, tacómetro y pinza eléctrica, que miden par, régimen de giro del motor, voltaje de las baterías y corriente presentes en el circuito, respectivamente. Del análisis de las curvas características iniciales de los motores Gasbike Storm y Turnigy Rotomax 80cc, se obtendrán resultados que serán de gran utilidad para la competencia EcoShell Marathon. El motor eléctrico sin escobillas Turnigy Rotomax 80cc será el elemento principal de propulsión del vehículo y el motor Gasbike Storm se empleará para alimentar el sistema eléctrico del motor Turnigy Rotomax 80cc. Los parámetros identificados en las pruebas del motor eléctrico determinarán la propulsión del vehículo y el tiempo de operación.

2. Fundamentos de diseño

A continuación, se describen los componentes del banco USB Prony, diseñado en la Universidad de San Buenaventura Bogotá, que permite caracterizar motores de combustión interna y eléctricos porque cuenta con una estructura móvil que permite acoplar diversos sistemas de propulsión. Es importante realizar la caracterización de los motores, porque solamente de esta forma se puede conocer a profundidad el modo de

funcionamiento, puntos máximos y mínimos de par y potencia a diferentes rpm y, en el caso de los motores eléctricos, variaciones de par y potencia con el voltaje de la fuente de energía.

Inicialmente se describe el diseño del banco de pruebas a los motores Turnigy Rotomax 80cc y 4T Gas Bike, porque hacen parte de la planta motriz del vehículo híbrido diseñado en la Universidad para la competencia EcoShell Marathon [3]. Sin embargo, se destaca que el banco de pruebas es flexible para la caracterización de diversos motores. A continuación, se presentan las características de los motores Turnigy Rotomax 80cc y 4T Gas Bike, sobre los cuales se enfocó el diseño del banco y la experimentación.

2.1 Motor Turnigy Rotomax 80cc

Es un motor eléctrico sin escobillas utilizado principalmente en aeromodelismo o aplicaciones de demanda de potencia media. Se destaca por brindar potencias cercanas o superiores a muchos motores de combustión interna, debido a que su potencia es de 6600 W y su par máximo de 2030 N.m [4]. Tiene la ventaja del usar energía más limpia, que evita el uso de combustibles y demanda menos requerimientos de mantenimiento, en comparación con los motores de combustión interna. En la Figura 1 se muestra el motor Turnigy Rotomax 80cc con la bancada a la que será sujeto en el banco de pruebas. Por otro lado, en la Figura 2 se muestra un esquema del motor con sus principales dimensiones físicas detalladas en milímetros.



Figura 1. Motor Turnigy Rotomax 80cc acoplado a la bancada

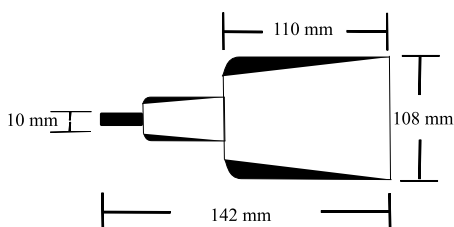


Figura 2. Dimensiones físicas del motor Turnigy Rotomax 80cc

El motor será objeto de estudio tomando como parámetros iniciales los datos proporcionados por el fabricante sobre sus especificaciones mecánicas, las cuales se tendrán en cuenta para la caracterización y obtención de sus propias curvas. En la Tabla 1 se muestran las especificaciones del motor Turnigy Rotomax 80cc.

Tabla 1. Especificaciones mecánicas del motor Turnigy Rotomax 80cc [4]

Kv (rpm/V)	195
Peso (g)	1916
Corriente máxima (A)	150
Resistencia (mh)	0
Voltaje máximo (V)	52
Potencia (W)	6600

De acuerdo con las especificaciones del motor, para obtener el par máximo se requiere una batería de 44.4 V, sin embargo, con el dispositivo de medición de fuerza, que se encuentra instalado en el banco, no es posible registrar el par máximo de 2030 N.m., por lo que, para obtener los resultados preliminares presentados aquí, se utilizarán baterías de 22.2 V. Con el voltaje de una batería de estas características se esperarí registrar una velocidad de rotación calculada con la ecuación (1). Posteriormente, el resultado se verificará con las pruebas realizadas y medidas del tacómetro dispuesto para dicha medición.

$$rpm = 195 \frac{rpm}{V} * 22.2 V = \boxed{4329 rpm} \quad (1)$$

2.2 Motor 4T Gas Bike

El motor Gas Bike Storm tiene operación mecánica de 4 tiempos y está diseñado para implementación en medios de transporte con demanda baja y media de empuje. En la Tabla 2 se muestran las principales características mecánicas del motor y en la Figura 3 el motor Gas Bike 4T (izquierda) en vista superior.

Tabla 2. Especificaciones mecánicas del motor Gas Bike 4t Storm

Par [N.m] @4500 rpm	2.4
Potencia [kW] @6800 rpm	1.2
Cilindraje [cm^3]	49
Peso [kg]	5.5
Consumo de combustible [g/kWh]	480
Dimensiones [m]	0.38 x 0.28 x 0.28
rpm	8500



Figura 3. Motor Gas Bike 4T

3. Banco de Pruebas USB Prony

Este banco permite obtener, por medio de distintos sistemas y componentes, las curvas características de motores de combustión interna y eléctricos. Estas curvas evalúan variables como par, potencia y consumo en función del régimen de giro del motor. Es importante destacar que, para el análisis de los resultados que se obtengan del banco de pruebas, la potencia en los motores de combustión interna aumenta respecto a la velocidad de rotación, hasta llegar a la velocidad nominal cuando comienza a disminuir. Por ello, la medición de la potencia implica un trabajo por unidad de tiempo, que se verá representado por el producto de una fuerza por una distancia, que, multiplicado por la velocidad angular, permite obtener la potencia útil entregada por el motor [5].

Por otro lado, el par motor en este tipo de motores es bajo cuando se tienen las velocidades de rotación mínimas y máximas, es decir, que los valores más altos de par se obtienen en velocidades de giro intermedias y, dependiendo de la velocidad a la que se genere el punto máximo de par, se podrá definir si el motor es de tipo elástico o no. La

elasticidad de un motor mide la relación que hay entre la entrega de potencia del motor a bajas y medias revoluciones, en comparación con las que entrega a altas revoluciones, en condiciones de plena carga [6]. De esta manera, el motor se considera poco elástico cuando la elasticidad es inferior a 2, para valores entre 2 y 2.5 se tiene una elasticidad media y para valores mayores a 2.5 es un motor muy elástico. Determinar este parámetro permitirá finalmente realizar un estudio sobre el comportamiento que podría tener el auto diseñado, trabajando con el motor de combustión interna. Si se comparan dos motores montados en un mismo vehículo, será más elástico el motor que permita recuperar y acelerar enérgicamente sin necesidad de recurrir en exceso al cambio de marcha, por lo que su comportamiento ante variaciones de carga será mejor [7].

Finalmente, el consumo específico de combustible es una de las curvas representativas de los motores de combustión interna, este parámetro se mantendrá casi constante para un rango de velocidades y aumentará drásticamente a velocidades de giro muy altas. A continuación, se describen los componentes y equipos de medición utilizados para el estudio del funcionamiento y obtención de curvas características de motores de combustión interna y eléctricos. Se mostrará y describirá cada una de las partes del banco de pruebas, así como la interconexión entre dichos componentes.

3.1 Estructura Banco de Pruebas

El banco cuenta con una estructura construida totalmente en perfil cuadrado de acero estructural, acoplada a dos varillas roscadas de 25.4 mm, las cuales permiten variar la altura de los elementos principales del banco. Estos elementos se encuentran soportados en una subestructura, igualmente construida en acero estructural.

3.2 Sistema de Fricción

Con el fin de medir el par generado por el motor dispuesto en el banco, se cuenta con un sistema de freno similar al de un automóvil. Este se compone de un freno de disco acoplado a un bocín y una mordaza con accionamiento hidráulico. El sistema de fricción se acciona a la bomba hidráulica unida a la mordaza por una línea hidráulica. Esta bomba permite controlar el cierre de la mordaza y tener el nivel de carga deseado sobre el motor. A continuación, se describen los componentes y la unión mecánica del sistema de freno.

- *Conjunto Disco - Mordaza.* El freno cuenta con una mordaza y un disco de freno de automóvil, acoplados como se muestra en la Figura 4. En el interior del disco se encuentra un bocín que, a partir de 4 tornillos, permite transmitir el par de forma directa desde el eje del motor hacia el eje del disco.



Figura 4. Conjunto disco-mordaza del banco de pruebas

El eje del motor transmite el par a través de un acople al eje del disco que conecta el bocín y el disco. Por otro lado, la mordaza se encuentra conectada a una estructura móvil, que consta de un eje que soporta dos vigas acopladas a la mordaza. El eje de esta estructura se encuentra alineado longitudinalmente con el eje del disco y del motor, lo

cual permite que la trayectoria de giro de la mordaza sea la misma del disco, para obtener un grado de carga simétrico en el área que entra en contacto con las pastillas de freno.

- *Sistema de freno.* Cuenta con una mordaza de freno que funciona a partir de una bomba hidráulica de 11 onzas de capacidad, ya que envía fluido a la cámara de la mordaza y genera un movimiento lineal para cerrar las pastillas de freno. Por ello, este sistema será el encargado de accionar la bomba que contiene y restringe el paso del fluido de freno al actuador de la mordaza. En el banco de pruebas se encuentra disponible un sistema de freno de un automóvil que tiene los siguientes componentes:
 - Depósito de fluido de freno
 - Bomba de restricción y liberación de fluido de freno
 - Sistema de accionamiento de bomba hidráulica
 - Mordaza
 - Disco de freno

Para controlar el nivel de frenado fue necesario diseñar un sistema que permitiera empujar de forma manual el pistón de la bomba hidráulica, de tal forma que permitiera o restringiera el paso de líquido de freno, así mismo, de la determinación del modo de funcionamiento mecánico del sistema. Para tener un sistema de fácil lectura y manipulación, se utilizó una herramienta de sujeción con un eje roscado. Esta herramienta se sujeta a la bomba, tal como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Sistema de freno apertura y cierre de mordaza ubicado en el banco de pruebas

En el centro de la herramienta se encuentra un eje roscado y alineado con la entrada del pistón de la bomba, de tal manera que al girar generará una presión sobre él, lo que permite el paso del líquido de frenos. Para identificar los giros del eje roscado se establecerá una superficie de referencia en la perilla del eje de forma hexagonal, por lo que se pueden identificar sus caras fácilmente, tal como se presenta en la Figura 6.

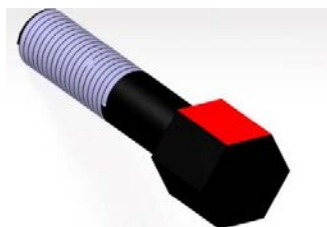


Figura 6. Superficie resaltada como cara principal para determinar relación de giros del eje y cierre de mordaza. Esquema realizado en software CATIA®

La relación se determinará conociendo que la apertura total o distancia entre pastillas, cuando la mordaza está completamente abierta, es de 12 mm y el espesor del disco es

de 11,1 mm. A partir de pruebas experimentales se determinó que, por cada giro y medio de la cara demarcada del hexágono, la mordaza presenta un cierre de 1 mm. En la Figura 7 se muestra la relación de giros del eje respecto al desplazamiento o cierre de la mordaza.

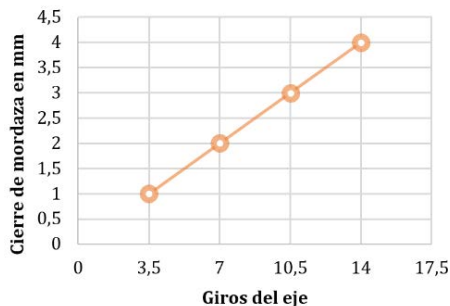


Figura 7. Relación giro de superficie de perilla y cierre de mordaza

La distancia total entre las pastillas y el disco es de 0,9 mm, por lo que cada pastilla tendrá una tolerancia hacia el disco de 0,45 mm. Dado esto, con 3.5 giros o menos, se obtiene una acción de frenado media y baja porque se tendría una fricción parcial sobre el disco. Con más de 3.5 giros la acción de frenado sería alta y se daría la mayor carga de freno al movimiento del motor.

3.3 Elementos de medición

El Banco USB Prony permite probar motores de combustión interna y eléctricos, por lo que será necesario que los dispositivos de medición se puedan acoplar a los dos tipos de motores. A continuación, se describen los elementos dispuestos en el banco para obtener las curvas características de los motores.

- *Tacómetro digital Prova 150.* Es un tacómetro de medición de dos métodos: contacto y óptico. Cuenta con una pantalla digital de control en la que muestra en tiempo real las mediciones por cualquiera de los dos métodos. En el banco, el tacómetro se dispone de tal forma que las pruebas se realicen utilizando el método óptico, para evitar que la persona que este operado tenga contacto directo con las partes móviles de mismo. El tacómetro deberá apuntar directamente a una cinta reflectiva ubicada sobre el eje motor. El rango para mediciones ópticas es de 10 a 99999 rpm, con una precisión de 0.004%, que es equivalente a más o menos dos dígitos mostrados. Por otro lado, el tacómetro cuenta con un software que permite registrar y monitorear los datos obtenidos de la velocidad de giro del eje en función del tiempo, lo que facilita relacionar las velocidades de giro obtenidas durante las pruebas con parámetros tales como potencia y consumo. En la Figura 8 se muestra la disposición y ubicación del tacómetro en el banco de pruebas, al instalar el motor Turnigy Rotomax 80 cc.

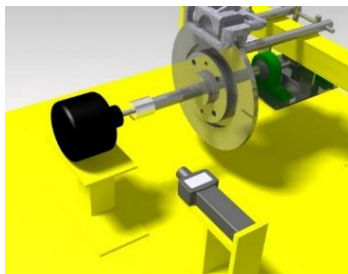


Figura 8. Ubicación perpendicular al eje del motor para medidas del tacómetro Prova 1501. Esquema realizado en CATIA®

Para obtener una adecuada medición del tacómetro, se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros técnicos brindados por el fabricante en el manual de operación. Dichas características se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Características técnicas del tacómetro Prova 1501 [8]

Rango óptico (rpm)	10-99999
Distancia de medición (mm)	50 a 300
Fuente de alimentación	4 baterías AA- 1.5 V
Temperatura de operación (°C)	0 a 50
Peso (g)	190

- *Sistema medición de fuerza.* El registro del par motor se da a partir de un brazo de palanca conectado a la mordaza, como se muestra en la Figura 9. Este sistema de medida permite acoplarse al sentido de giro del motor, porque las vigas que soportan la mordaza están dispuestas de forma simétrica, lo que permite cambiar la ubicación del brazo de palanca. Igualmente, dependiendo del motor se tendrá que ubicar el dinamómetro más cerca o más lejos, respecto al centro de medida.

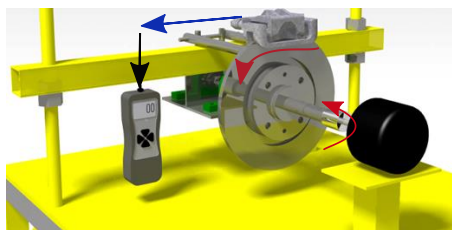


Figura 9. Esquema de funcionamiento y movimiento de los componentes del freno Prony para la obtención de par motor. Realizado en software CATIA®

El dinamómetro se ubicará en una base modular, la cual permitirá regular su altura de tal forma que este se ajuste a la del motor y demás elementos del banco. Actualmente, se cuenta con el dinamómetro digital DS2-110, que tiene una batería Ni-MH recargable, además de una pantalla LCD que muestra en tiempo real la fuerza registrada. El dinamómetro toma la fuerza a través de un eje encargado de recibir y trasladar la fuerza a los sensores, además, permite realizar la medición de la fuerza, ya sea en tensión o compresión. En la Tabla 4 se muestran las características técnicas del dinamómetro.

Tabla 4. Características técnicas del dinamómetro DS2-110 [9]

Precisión	± 0.2 %
Unidades de medida	Lbf, kgf, N
Fuente de alimentación	Batería Ni-MH
Temperatura de operación (°C)	0 a 40

La limitante del dinamómetro durante las pruebas del banco radica en la fuerza máxima que puede registrar el instrumento, la cual es de 500 N. Este valor para motores de combustión interna menores a 55 hp, para lo que fue diseñado el banco de pruebas, no presenta mayor problema. Sin embargo, motores eléctricos como el Turnigy Rotomax 80cc pueden generar un par superior al aceptable por este equipo. Por esta razón, actualmente las pruebas de este motor y el registro de curvas se deberían realizar con una sola batería, para proporcionarle únicamente la mitad de la energía que acepta y requiere este motor. Ahora bien, en la Figura 9 se muestra disposición de los elementos empleados al ensayar el motor Turnigy Rotomax 80 cc en el banco USB Prony, y como se da la transmisión del par producido desde el eje del

motor al disco. De acuerdo con esto y el nivel de freno dispuesto en la mordaza, se transferirá el movimiento en cierto grado a la mordaza, la cual está conectada al brazo de palanca, que descenderá para tocar el dinamómetro y registrar la fuerza.

- *Pinzas milimétricas y controlador de velocidad.* Estos instrumentos se utilizarán únicamente al realizar pruebas con motores eléctricos. Al utilizar baterías de LiPo, es necesario tener un control de su voltaje, porque si llega a un valor inferior al nominal se verían comprometidas las celdas de carga. En la Figura 10 se muestran las pinzas milimétricas con las que cuenta el banco. Estas pinzas tienen un rango de operación de tensión entre 400 mV y 1000 V y un rango de medición de corriente de 2 A a 20 A.



Figura 1011. Pinzas milimétricas

Por otro lado, dentro del circuito que se emplea para probar los motores eléctricos, es necesario utilizar un controlador de velocidad electrónico, encargado de regular la velocidad de rotación del motor eléctrico y el voltaje que ingresa al motor a través de la entrega de energía en tres fases [10]. El uso de los controladores de velocidad ESC como elemento de conexión entre el controlador y el motor, se da porque permiten variar de forma mucho más suave y más precisa la velocidad del motor, y de manera mucho más eficiente en comparación con las variaciones de tipo mecánico utilizadas anteriormente utilizando una bobina y un brazo de palanca [11]. En este caso, se hará énfasis en el controlador de velocidad utilizado por el motor Turnigy Rotomax 80 cc y que se muestra en la Figura 11. Es un Turnigy dlux de 250 A que no cuenta con BEC, y con el que, de acuerdo con las características presentadas en la Tabla 5, se realizará el montaje con el motor.



Figura 1112. Controlador electrónico de velocidad Turnigy dlux

Tabla 5. Especificaciones controlador de velocidad Turnigy dlux

Máxima corriente continua (A)	250
Máximo pico de corriente (A)	275
Baterías	Li-po: 6-14 celdas NiMH: 18-42 celdas
Máximas rpm	200000
Peso (g)	456

4. Método de ensayo

Para el desarrollo del método de ensayo se entenderá que una variable es la característica de un objeto que puede ser observada, medida y analizada [12]. En este caso, la variable de interés será el par generado por el eje del motor montando en el banco

de pruebas. Por otro lado, un factor será un parámetro de interés que puede llegar a producir un efecto sobre la variable que se quiere estudiar. Existen distintos factores dentro del análisis, algunos de ellos son los factores controlables, los no-controlables y los estudiados [12]. Los factores controlables son variables que se pueden fijar en un punto o nivel de operación; los no-controlables son variables que no se pueden controlar durante la operación normal del proceso; y los estudiados son las variables que se investigan en el experimento para observar cómo afectan o influyen la variable de interés.

En el diseño de experimentos es importante determinar el número de pruebas que se harán, con el fin de enfocarse en la variable dependiente, en este caso el par. A mayor número de repeticiones de las pruebas hay un mayor número de datos, con los cuales comparar y disminuir los errores de medición e influencias no-controladas de factores que pudieran estar presentes. Sin embargo, dependiendo del proceso es conveniente proponer un número de pruebas para no malgastar recursos. Con el fin de determinar el error presente en las curvas obtenidas, dado por los elementos de medición y otras inconsistencias en las pruebas experimentales, es necesario realizar un estudio de las variables que afectan los datos obtenidos. Esto con el objetivo de determinar el número de pruebas necesarias para alcanzar un error menor al 10%. Este porcentaje de error es aceptable, teniendo en cuenta que el banco de pruebas en el que se realizarán las pruebas tiene distintas partes móviles y mecánicas, que pueden influir en los resultados obtenidos.

Teniendo en cuenta esto, se determinó que el método más adecuado es el *diseño factorial 2k*, porque permite explorar una zona escogida del dominio experimental [13]. Este método se utiliza particularmente en las primeras etapas experimentales de un proyecto, especialmente cuando se tienen distintos factores que afectan el análisis. Dado que únicamente existen dos niveles para cada uno de los factores, se asume que la respuesta es aproximadamente lineal sobre el rango de los factores escogidos [14]. El método de ensayo *2k* se utilizará en general para cualquier prueba que se realice en el banco de pruebas, sea para motores de combustión interna o eléctricos. La diferencia radicará fundamentalmente en los factores estudiados para cada uno de ellos. Para el desarrollo del método, en el caso de los motores eléctricos, se seleccionará como factor estudiado al voltaje de la batería, como factor no-controlable al desgaste que sufren las pastillas de freno y posibles desajustes en el sistema de freno y como factor controlable a la medición del dinamómetro.

A continuación, se describe el desarrollo del método de ensayo *2k* al realizar pruebas con el motor Turnigy Rotomax 80 cc. De acuerdo con lo establecido, las baterías de LiPo, con las que se cuentan con un voltaje máximo de 22.2 V, y con las pruebas experimentales, el voltaje de no debe descender de 21 V. El segundo factor de estudio se medirá respecto al desgaste producido al finalizar cada una de las pruebas, teniendo en cuenta que el espesor de las pastillas de freno es de 13 mm, que, de acuerdo con especificaciones técnicas el espesor, no debe ser menor a 7 mm. Finalmente, el valor entregado por el dinamómetro se podrá controlar a partir de la estructura que sostiene el dinamómetro, porque permitirá variar la altura y/o posición respecto al eje del dinamómetro y el brazo de palanca. Esta distancia podrá variar entre 10 y 50 cm desde la base del banco de pruebas y la altura dependerá de la base construida para sujetar el motor al banco.

Teniendo en cuenta lo anterior, el dominio experimental propuesto para este caso expresa los valores mínimos y máximos que pueden tomar cada uno de los factores establecidos. En la Tabla 6 se muestra el dominio experimental de cada uno de los factores seleccionados. De acuerdo con el método de ensayo seleccionado se podrá conocer el efecto de un factor en la toma de datos global. Por cada uno de los factores seleccionados

se realizarán dos pruebas, por lo que, en este caso, será necesario ejecutar ocho pruebas variando cada uno de ellos entre el nivel máximo y mínimo, lo que permitirá definir si el efecto depende del valor que tomen los otros factores. Siendo así, en la Tabla 7 se muestra la matriz de experimentos para determinar el porcentaje de influencia que tendrá cada factor en la variable.

Tabla 6. Factores y dominio experimental en la toma de datos para un motor eléctrico en el banco de pruebas USB Prony

Factores	Dominio Experimental	
	Nivel (-)	Nivel (+)
Ubicación del dinamómetro (cm)	10	50
Sistema de Freno (mm)	7	13
Voltaje de la batería (V)	21	22,2

Tabla 7. Matriz de experimentos de un diseño factorial 2^3 , plan de experimentación y respuestas medidas aplicadas a la toma de datos del motor Turnigy Rotomax 80 cc

Matriz de Experimentos				Plan de experimentación		
				Ubicación del dinamómetro (cm)	Sistema de Freno (mm)	Voltaje de la batería (V)
Prueba	x1	x2	x3			
1	-	-	-	10	7	21
2	+	-	-	50	7	21
3	-	+	-	10	13	21
4	+	+	-	50	13	21
5	-	-	+	10	7	21
6	+	-	+	50	7	22,2
7	-	+	+	10	13	22,2
8	+	+	+	50	13	22,2

Una vez realizadas las pruebas, se obtienen ocho respuestas que se pueden combinar para obtener el valor medio y la interacción entre los tres factores. Para encontrar esta interacción se nombra al factor ubicación del dinamómetro, el sistema de freno y el voltaje de la batería, como A, B y C, respectivamente. El valor medio de cada uno se encuentra a partir del cálculo de la media de las cuatro pruebas con el nivel más bajo y de las cuatro con el nivel más alto.

Siguiendo el método 2^k se considera el efecto estimado para cada una de las interacciones en las pruebas. La suma de cuadrados permitirá encontrar el porcentaje de error con el que contribuye cada una de las combinaciones en las pruebas. Este método toma como referencia un cubo para generar las posibles combinaciones entre los factores establecidos. En las ecuaciones (2), (3) y (4) se muestran las expresiones base de las combinaciones, que permitirán encontrar el efecto estimado de cada uno de los factores.

$$A = \frac{1}{8}[a - 1 + ab - b + ac - c + abc - bc] \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{8}[b + ab + bc + abc - 1 - a - c - ac] \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{8}[c + ac + bc + abc - 1 - a - b - ab] \quad (4)$$

De acuerdo con estas ecuaciones, en la Figura 12 se muestra un esquema de las combinaciones establecidas para el método de ensayo 2^k . Con los valores de par obtenidos en cada una de las pruebas, para encontrar el efecto estimado, se realiza una suma de cuadrados para cuantificar un error puro a partir de la diferencia de la suma de cuadrados de las combinaciones planteadas en la Figura 12. Con ello se encuentra el porcentaje de contribución de cada uno de los factores a partir de la ecuación (5). Este proceso se repite para cada una de las pruebas realizadas.

$$\%Error = \frac{A*100}{Total} \quad (5)$$

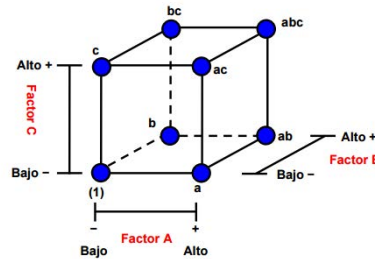


Figura 12. Interacciones en el método 2^3

Con los resultados se podrán establecer el porcentaje de error obtenido en la medición del par, a partir de cada uno de los factores establecidos. Es importante tener en cuenta que la diferencia de aplicar este método, en pruebas con motores de combustión interna, será el factor de la medición del voltaje de las baterías. En el caso de estos motores, el factor será reemplazado por el nivel de combustible con el cual cuenta el motor.

5. Análisis de resultados

En esta sección del informe se exponen los resultados obtenidos en las pruebas experimentales, así mismo, las curvas características del motor con los parámetros de par, potencia y rpm.

5.1 Tasa de descarga motor Turnigy Rotomax 80 cc

Como parte del proceso para conocer las curvas características del motor Turnigy Rotomax 80 cc, es necesario conocer el comportamiento de la velocidad angular o de giro del motor, en función del voltaje de las baterías. Los resultados que se muestran a continuación se obtuvieron utilizando un batería de LiPo de 22.2 V de 6 celdas. Durante las pruebas realizadas el voltaje inicial fue de 24 V y el voltaje final promedio fue de 22 V. Es importante destacar que las baterías utilizadas no pueden tener un voltaje nominal inferior a 21 V, porque se dañarían sus celdas. En la Figura 13 se presenta el comportamiento de las revoluciones por minuto en función del tiempo, lo que permite conocer la tasa de descarga de las baterías. Adicionalmente, se puede observar que después de los 1000 segundos se presenta un pico de caída en las revoluciones del motor, debido a que, para no afectar las celdas de la batería, se obliga a detenerse.

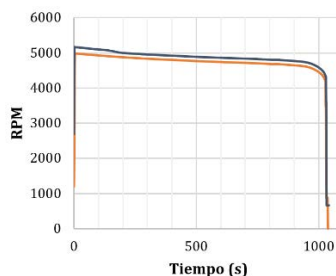


Figura 1313. rpm vs Tiempo

6. Opciones de mejoramiento

Actualmente, el banco de pruebas USB Prony se encuentra en un proceso de selección de componentes, que permitirán una adquisición de datos más precisa. Como primera

medida se deberá contar con un dinamómetro o mecanismo de medición de fuerza que permita medir un mayor rango, porque para el caso del motor eléctrico Turnigy Rotomax 80 cc, el par de 2030 N.m. requeriría un brazo de palanca de un metro y medir una fuerza de al menos 2000 N, la cual supera en cuatro veces la fuerza máxima posible del dinamómetro DS2-110.

Por otro lado, el banco de pruebas aún no cuenta con un sistema de medición de combustible, el cual deberá ajustarse a distintos motores de combustión. Además, el sistema permitirá que los estudiantes, profesores y/o interesados en hacer uso del banco, realicen la lectura del gasto másico de combustible de forma sencilla, con el fin de realizar un posterior análisis a este tipo de máquinas térmicas. En relación con las pruebas enfocadas a los motores de combustión interna, se planteará la adquisición de un sistema de medición de gases contaminantes, porque el nivel de contaminación que producen los motores a probar es de especial interés para su aplicación en cualquier vehículo.

Para los motores eléctricos, el uso de baterías LiPo limita las pruebas que se pueden realizar, debido a que el tiempo de uso del motor se ve restringido por los 1000 segundos que tarda aproximadamente el motor en llevar a las baterías a un voltaje cercano a 21 V. Por lo que se planteará el uso de una fuente que proporcione un voltaje continuo al motor; no obstante, optar por este método cambiará las condiciones de operación del banco y el método de ensayo propuesto para el motor eléctrico.

7. Conclusiones

De acuerdo con el diseño y elementos con los que dispone el banco de pruebas USB Prony, las pruebas experimentales que se pueden realizar en él permitirán la caracterización de motores eléctricos y de combustión interna alternativos, para un rango máximo de 6000 W o 55 hp, respectivamente.

Por otro lado, el diseño y construcción del banco de pruebas se realizó de tal manera que permita acoplar fácilmente otros equipos de medición para motores de combustión interna, tales como un sistema de gasto másico de combustible y uno de medición de composición de gases en el caso de los. Para los motores eléctricos: un sistema de voltaje continuo, porque el uso de baterías de LiPo limita las pruebas experimentales por el cuidado que requieren.

Finalmente, el método de frenado o fricción utilizado actualmente por el banco, no es el más preciso, porque cuenta con diversas piezas mecánicas y/o móviles, en comparación a otros tipos de freno, como el hidráulico o eléctrico. Por ello, este tipo de freno requiere un programa de mantenimiento más constante. Este aspecto influirá en los resultados obtenidos con el banco de pruebas, porque, por ejemplo, el desgaste de las pastillas será uno de los parámetros que intervienen en los resultados, dado que el nivel de fricción obtenido por el sistema no será el mismo con las pastillas teniendo un espesor cerca al mínimo permitido. Por tanto, la influencia de estos parámetros se deberá encontrar a partir del método de ensayo propuesto.

Referencias

- [1] Tesla Motors. (2016). [Model S](#).
- [2] Pontevedrés, G. (2015). [¿Qué es el par motor? ¿Qué tiene que ver con la potencia? ¿Cuál importa más?](#). Online [Feb 2016]
- [3] Cerpa, R. et al. (2015). [Diseño y Selección del Sistema de Propulsión para un vehículo urbano aplicado a la competencia EcoShell Marathon](#). Ingenium 17(33), pp. 41-53.

- [4] http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_25410_Turnigy_RotoMax_80cc_Size_Brushless_Outrunner_Motor_195kv_.html [Dec 2015].
- [5] Merchán, C. (2004). *Determinación de la potencia y el torque en motores de combustión interna mediante la técnica de la aceleración libre*. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander.
- [6] González, D. (2012). *Motores CFGM*. Madrid: Agapea.
- [7] González, D. (2015). *Motores Térmicos y sus sistemas auxiliares*. Madrid: Parainfo.
- [8] http://www.prova.com.tw/product_detail.asp?seq=27 [Dec 2015].
- [9] <http://www.tecnimetalsa.es/dinamometro/dinamometro%20digital/dinamometro%20digital%20IMADA%20serie%20DS2.htm> [Dec 2015].
- [10] http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_25202_Turnigy_dlux_250A_HV_14s_60v_ESC.html [Dec 2015].
- [11] Ingale, V. & Mulani, U. (2015). *Quad Copter Controlling Using Android*. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering 3(6), 5856-5864.
- [12] Sánchez, G. (2009). *Medición del ruido en la línea de transmisión eléctrica generado por electrodomésticos, para aplicaciones de PLC*. Trabajo de grado. Universidad de las Américas, Puebla.
- [13] Carlson, R. (1991). *Design and optimization in organic synthesis*. USA: Elsevier.
- [14] Montgomery, D. (2012). *Design and analysis of experiments*. Nueva York: Wiley.

23. Deformación en el campo magnético terrestre como variable para la localización de dispositivos móviles en interiores

**Carlos Gómez
Natalia Torres**

Fundación Universitaria Agustiniana. Bogotá, Colombia

1. Introducción

Dados los resultados documentados por Gómez [1] sobre la optimización del método de localización por *fingerprinting* de potencias RSSI, se decide estudiar una nueva variable que pueda ser usada para tener información de localización y navegación: la propagación del campo magnético terrestre dentro de los edificios. Esta temática tiene algunos antecedentes interesantes que plantean el uso de distintas variables para la localización de dispositivos en interiores. Hashimoto [2] publica un trabajo en el que propone el desarrollo de un sistema de navegación interior para las personas con discapacidad visual, mediante la aplicación de un acelerómetro para medir la distancia, un giroscopio y un magnetómetro para medir y predecir la dirección de desplazamiento. Ando y Graziani [3] proponen una metodología que usa múltiples sensores que, analizados por una central inteligente, pueden identificar las estructuras u objetos en interiores. Hunaiti [4] propone un sistema de comunicaciones incorporadas en técnicas de navegación.

Este trabajo presenta los resultados obtenidos en un estudio de caso hecho sobre un espacio de interiores, que también fue objeto de estudio de localización por análisis de potencia de radiación de redes WiFi.

2. Antecedentes

Empleando cuatro puntos de acceso WiFi, Bahl y Padmanabhan [5] localizan un computador portátil con una resolución media de 2 a 3 metros. Es un sistema que localiza y es capaz de seguir a los individuos dentro de un edificio. Funciona recogiendo y procesando niveles de señal de diferentes estaciones base, colocadas de forma que se superpongan las áreas de cobertura dentro de la zona de interés. Combina medidas empíricas con un simple modelo de propagación de señales para determinar la localización. El método empírico es superior en precisión y el modelo de propagación hace que el despliegue sea sencillo. Desde la primera versión ha habido muchas mejoras del algoritmo de *fingerprinting* empleado para mejorar su precisión, por ejemplo, en [6] se propone una técnica de *clustering* para lograrlo.

Para intentar minimizar los efectos causados por los cambios medioambientales se determinó la localización del usuario en dos fases: 1) en la primera se utiliza la forma tradicional de analizar los valores obtenidos con el patrón de valores, almacenado en la fase de entrenamiento para poder identificar una localización general: 2) en la segunda se aplica regresión logística para obtener mayor precisión. El sistema de calibración adaptativa permite reentrenar y actualizar los mapas de nivel de señal de forma dinámica, para hacerles frente a las fluctuaciones de señal [5].

Una de las soluciones comerciales de localización más reconocida, que emplea WiFi, es Ekahau Positioning Engine (EPE), que se encarga de estimar la localización e incluye diversos algoritmos y métodos patentados para calcular una localización precisa en tiempo real. Para funcionar correctamente, EPE necesita conocer el área de cobertura de cada punto de acceso WiFi y las características y patrones del entorno radioeléctrico en el

que se va llevar a cabo la localización. Esta información se obtiene mediante la herramienta Ekahau Site Survey Tool [6].

Gómez [1] realizó un estudio de los errores presentes en la localización de dispositivos WiFi por medio de técnicas de análisis de *fingerprinting* de potencias RSSI, logrando reducir la distancia de error respecto a trabajos anteriores. Sin embargo, deja documentado el elevado costo computacional cuando todo el método es procesado por un teléfono inteligente y, por consiguiente, los altos tiempos de respuesta necesarios para efectuar dicha localización.

Gennady Berkovic [7] presenta un abordaje usando múltiples sensores de dispositivos móviles y analizando su interacción mediante el uso de filtros de partículas FP. Con la aparición de nuevas fuentes de datos en teléfonos inteligentes, esta arquitectura permite utilizarlos en la solución híbrida, para mejorar la precisión y la disponibilidad de posicionamiento. La implementación del PF contiene tres etapas: propagación, actualización o corrección y remuestreo, que se repiten continuamente. Hay una etapa más, inicialización de la nube de partículas, que se ejecuta una vez. En la etapa de propagación, las coordenadas y el título de cada partícula se propagan utilizando el modelo de movimiento peatonal. Los datos desde el módulo PDR se utilizan como entrada de la etapa de propagación [7].

El objetivo del PDR en el sistema de navegación es realizar predicción del movimiento relativo del usuario y la estimación de una orientación de su móvil actual. El enfoque se basa en el modelo de movimiento peatonal para que una trayectoria en un plano se divida en distintos pasos. Este enfoque permite disminuir suficientemente el efecto de errores de medición sobre el error total del posicionamiento y simplifica un procedimiento de configuración y calibración continua de sensores. Los datos de entrada del algoritmo son las mediciones del acelerómetro 3D, el giroscopio y el sensor magnético. Las medidas de los sensores se filtran y sincronizan; los datos filtrados se utilizan en operaciones posteriores, que incluyen la estimación de la detección y el comportamiento de los pasos de las personas. La valoración del comportamiento de los pasos incluye parámetros de orientación de la siguiente manera: el cambio del ángulo de movimiento de partida de usuario y la orientación del móvil usando una matriz de transformación a un sistema de coordenadas respecto al plano horizontal [7].

El módulo de *fingerprinting* geomagnético utiliza mediciones del campo magnético. El magnetómetro 3D de un móvil mide el campo magnético en el sistema de 3 coordenadas. Como el móvil se puede orientar arbitrariamente en la mano del usuario, las mediciones se transforman al sistema de coordenadas horizontal y los ángulos de orientación de dispositivos, necesarios para la transformación, se estiman por el PDR (Figura 1).

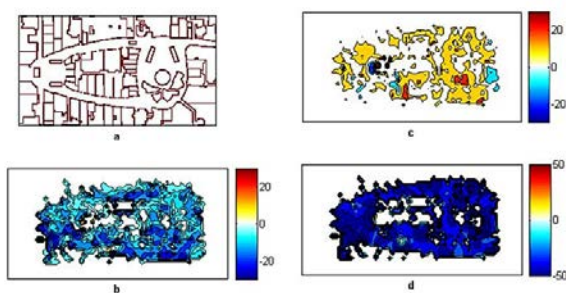


Figura 1. a) Fragmento de un plano, b) componente X de campo magnético del plano, c) componente Y de campo magnético del plano, d) componente Z de campo magnético del plano. Las escalas de color están en μT [7]

3. Uso del Campo Magnético para obtener información de localización en interiores

La tierra actúa como un enorme imán esférico, rodeado por una capa magnética. Este campo magnético tiene una configuración que hace que los polos geográficos norte y sur, y los polos norte y sur magnético, no sean iguales. Sin embargo, el campo magnético se puede caracterizar por una dirección y una intensidad que pueden ser medidos. El campo magnético B es una magnitud vectorial y lo puede producir una carga puntual en movimiento o un conjunto de cargas en movimiento, es decir, por una corriente eléctrica. La unidad de campo magnético en el Sistema Internacional es el tesla (T), que se define como el campo magnético que ejerce una fuerza de 1 N (newton) sobre una carga de 1 C (culombio), que se mueve a velocidad de 1 m/s dentro del campo y perpendicularmente a las líneas de campo. El campo magnético se propaga por toda la superficie del planeta y, en espacios interiores, sufre deformaciones producto de la interacción con otros campos creados por equipos electrónicos, circuitos eléctricos y presencia de materiales ferrosos.

Los dispositivos móviles modernos cuentan con un sensor de intensidad de campo magnético: el magnetómetro. El primer magnetómetro fue creado en 1833 por Carl Friedrich Gauss y, durante el siglo XIX, notables desarrolladores incluyeron el Efecto Hall como forma de medida de campos magnéticos, que sigue ampliamente en uso en la actualidad. Los magnetómetros se pueden dividir en dos tipos: escalares y vectoriales, que se usan principalmente para la medición del campo magnético terrestre y en estudios geofísicos, para detectar anomalías magnéticas de diferentes tipos. En la actualidad, los magnetómetros han sido miniaturizados con el objetivo de ser incorporados en circuitos integrados a bajo costo. También ha aumentado su uso como brújula en dispositivos electrónicos, tales como los móviles o tabletas [8].

El magnetómetro toma valores de intensidad de B en tres ejes, que se consideran como fijos al cuerpo del dispositivo móvil. Se debe tener en cuenta que el eje Z + está apuntando lejos de la parte delantera y siempre es perpendicular a la cara del dispositivo móvil. El eje X se ubica a lo largo de la longitud corta y el eje Y se ubica a lo largo de la longitud de alto, como se aprecia en la Figura 2.

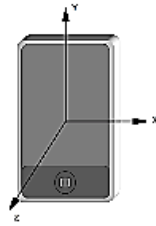


Figura 2. Magnetómetro en Teléfonos inteligentes

El magnetómetro, además de medir el campo magnético de la tierra, puede ser utilizado para verificar la presencia de imanes permanentes u otras fuentes de campos electromagnéticos. En general, algunos campos magnéticos son causados por instalaciones eléctricas, aparatos y maquinaria pesada de potencia. Hay dos tipos de campos magnéticos: estáticos y dinámicos [9].

3.1 Estudio de caso: Análisis de deformación del campo magnético

Para las mediciones de campo magnético terrestre se usa un teléfono inteligente con sistema operativo Android y un sensor de campo magnético (μT), que toma muestras en 3 dimensiones: x , y , z . Debido a su construcción, constituido por un sensor en cada eje (dimensión), el magnetómetro arroja una medición en unidades de μT por cada una de ellas. Así en cada una de las mediciones se tiene:

B_{xj} = Intensidad del campo magnético en el eje X, del punto j
 B_{yj} = Intensidad del campo magnético en el eje Y, del punto j
 B_{zj} = Intensidad del campo magnético en el eje Z, del punto j

Dado lo anterior, es posible diferenciar cada una de las mediciones y caracterizar el comportamiento de cada uno de los ejes de las 3 dimensiones. Sin embargo, cada movimiento del teléfono genera cambios proporcionales del componente de cada eje. En esa situación es útil el cálculo de la intensidad total B de campo magnético, tal como se muestra en la ecuación (1).

$$B = \sqrt{B_{xj}^2 + B_{yj}^2 + B_{zj}^2} \quad (1)$$

Usar B en las medidas de campo magnético permite tener en cuenta las 3 dimensiones que usa el magnetómetro y, adicionalmente, reducir errores por movimientos del dispositivo. La recolección de datos de la intensidad de Campo Magnético B se realiza siguiendo la siguiente metodología:

1. Recoger datos para 5 segundos en cada punto establecido y marcado, apuntando siempre al norte magnético con ayuda de la brújula.
2. Transferir datos cvs a una hoja de cálculo.
3. Procesar y analizar las muestras matemáticas y estadísticas.

Para obtener los datos del sensor del magnetómetro, que recoge el teléfono inteligente, se utiliza el archivo cvs que organiza por tiempo y eje cada una de las muestras y se puede usar en hojas de cálculo. Después de realizar el muestreo, se efectúa un análisis estadístico para detectar las medidas atípicas. En este caso se realizó el análisis de *boxplot* a cada una de las muestras del campo magnético en cada punto. *Boxplot* (Figura 3) muestra datos atípicos de las mediciones fruto de condiciones ambientales y hasta la metodología de recopilación de las muestras. Sin embargo, si se omiten esos valores atípicos se obtienen muestras de mucha información, que permiten caracterizar cada punto de medición. El análisis *boxplot* también permite entender la simetría y la dispersión de las muestras.

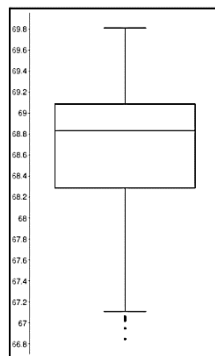


Figura 3. Ejemplo de análisis de *boxplot* para mediciones de campo magnético

Aun cuando las gráficas de *boxplot* arrojan mediciones atípicas, no están tan lejanas de los límites de la caja. De esta manera se pueden omitir esas mediciones atípicas para caracterizar una única medida de B en cada punto. Luego de este filtro estadístico se calculó la media aritmética de las intensidades de campo magnético B en cada punto, según la ecuación (2).

$$\bar{B} = \frac{\sum B_j}{n_j} \quad (2)$$

Donde j representa cada punto del espacio estudiado. El estudio de caso se realizó en un espacio cerrado de interiores de 56m², ubicado en un entorno urbano típico de unidades habitacionales o de trabajo, es decir, que no contiene fuentes de contaminación electromagnética de gran amplitud, tales como motores industriales, o tendidos eléctricos de alta y media tensión. La Figura 4 muestra el mapa arquitectónico del lugar estudiado.

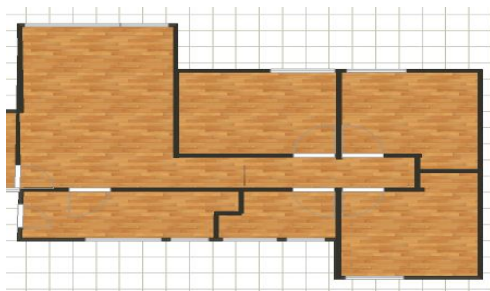


Figura 4. Plano arquitectónico del espacio estudiado

Kalyan [9] indica que las perturbaciones del campo magnético constituyen fuentes de información para la localización en espacio de interiores y resalta la relevancia de esta variable. Esto lo demuestra a través de un experimento basado en un estudio en un pasillo con diferentes niveles de campos magnéticos que se distinguen uno del otro. Para este caso, en las medidas de campo magnético en un espacio abierto sin deformaciones, se espera que en un recorrido en línea recta el campo magnético sea estable, como el de la Figura 5.



Figura 5. Recorrido representado y resultado de un punto de medición estable



Figura 6. Evidencia de marcas magnéticas en la zona 1

En la Figura 6 se representa un recorrido lineal por un espacio, donde se puede evidenciar una anomalía de campo magnético debido a ciertos tipos de materiales, tal como se puede evidenciar en los picos que se generan en la gráfica generada por el magnetómetro. Como el magnetómetro captura la anomalía, se puede detectar la presencia de la columna con cableado eléctrico, que genera un pico en la gráfica, y el otro más bajo causado por la ventana (Figura 7).

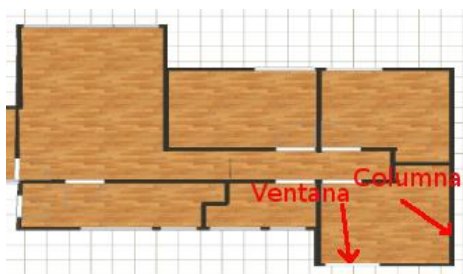


Figura 7. Ubicación de las huellas de campo magnético en la zona 1

Algunas variaciones del campo magnético, generadas dentro de los edificios, se deben a la presencia de componentes tales como hierro, cobalto o níquel, y también por estructuras de acero, sistemas de energía eléctrica y aparatos electrónicos [9]. Estas variaciones se identifican como anomalías que proporcionan un perfil o huella magnética única de lugares dentro de los edificios donde existen. Para este caso se usa un corredor específico, que se podría caracterizar por su perfil de intensidad de campo magnético y otras estructuras que muestran altos valores del campo a lo largo de los corredores.

Las muestras tomadas en el espacio de interiores permiten caracterizar el comportamiento del campo magnético de dicho espacio y realizar el levantamiento de un mapa de calor, como se muestra en la Figura 8, con el cual se puede evidenciar cómo se comporta el campo magnético en la estructura civil que se tiene como laboratorio. Este mapa magnético ilustra las intensidades del campo magnético B en el espacio interior.

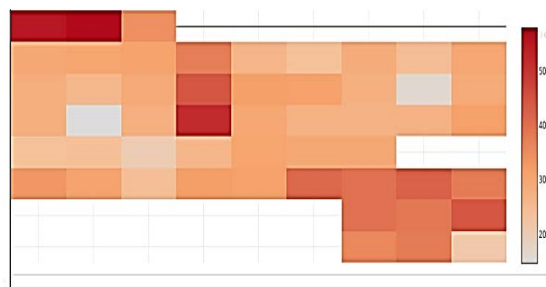


Figura 8. Mapa de calor del campo magnético

Los colores más fuertes evidencian la presencia del campo magnético con mayor intensidad (*marca magnética* diferenciable) y los colores más claros el campo magnético con menor intensidad, que también presenta un comportamiento atípico y que ayuda a distinguir el punto en el ambiente. Este mapa servirá de mapa de calibración para el análisis de localización de un dispositivo móvil.

Dada la necesidad de comprobar los resultados obtenidos en el caso de estudio y la teoría expuesta por Kalyan [9], se realizan mediciones en un espacio diferente al documentado. En este caso, un pasillo de un entorno comercial con gran presencia de columnas de cableado eléctrico y material ferroso. Se realiza un muestreo de campo magnético durante dos días en un pasillo en un espacio de interiores, como se ve puede observar en la Figuras 9 y 10.



Figura 9. Pasillo comercial largo. Espacio 2 Punto 1

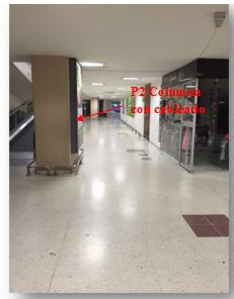


Figura 10. Pasillo comercial largo. Espacio 2 Punto 2

Para observar la continuidad del campo magnético generado por los diferentes tipos de materiales, se procedió a hacer un muestreo de cinco segundos en los puntos donde se presentaban marcas magnéticas, cuyos resultados se detallan en las Figuras 11 y 12.



Figura 11. Variaciones y anomalías presentadas por el campo magnético



Figura 12. Variaciones y anomalías presentadas por el campo magnético

3.2 Perturbaciones del campo magnético para localizar dispositivos móviles

La utilidad de las mediciones de campos magnéticos es poder encontrar deformaciones claras, que constituyan marcas inequívocas de las características físicas de un lugar en el espacio estudiado. Para esto se entiende que el campo magnético terrestre tiene un valor típico que oscila entre los 20 a 70 μ T. En el estudio de caso, en el espacio de interiores ubicado en la ciudad de Bogotá, se determinó que un valor usual es de 30 μ T. Para este caso se entiende por anomalía cuando el valor de la intensidad del campo magnético aumenta el doble o más del valor típico, o disminuye la mitad o menos.

Por lo anterior, el mapa de calor de la Figura 8 muestra claramente ciertos puntos donde la intensidad de B es mayor o igual a 60 μ T y menor o igual a 15 μ T. Constituyendo huellas inequívocas que pueden indicar la cercanía de un equipo móvil a esos puntos. La Figura 5 muestra el escenario típico de un espacio en el que el campo magnético terrestre no se deforma y su valor típico es de 30 μ T. Desafortunadamente, en estos casos no es posible identificar un punto inequívoco de localización en un espacio cerrado, por lo que la clave está en determinar las huellas de campo magnético.

Existen puntos de referencia invisibles que se podrían identificar y utilizar con eficacia, tal como en el caso de las marcas magnéticas, donde se encuentra que algunos de las columnas perturban el campo magnético de forma constructiva o destructiva, tal como se observa en la Figuras 11 y 12. La detección de estas anomalías en el campo magnético ayuda a su ubicación específica dentro de un área delimitada, por ejemplo, especificar las anomalías presentadas por la marcas que generan las variaciones del campo magnético a lo largo de un pasillo, permite identificar con precisión su ubicación en él, como columnas con mucho material ferroso y otras con cableado eléctrico, como se observa en las Figuras 9 y 10. La presencia de aparatos electrónicos que se encuentren energizados constantemente, también pueden ser fuente de referencia en la localización precisa.

4. Metodología propuesta

Dadas las ventajas y las limitantes de usar el análisis de campos magnético en interiores, se propone la metodología reflejada en la Figura 13.

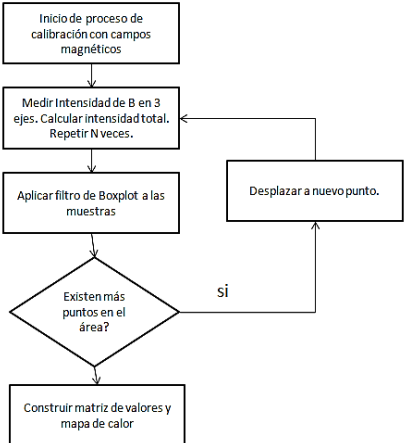


Figura 13. Metodología de calibración

Con el fin de que la información del campo magnético sirva para una localización más precisa en el mismo espacio, en la etapa de localización es necesario acotar a un área específica por medio de un método específico. Dicho método puede ser el de *fingerprinting* WiFi que, dado su alto costo computacional, puede ubicar el dispositivo móvil en un cuarto específico y, dado su bajo costo computacional, el análisis de campo magnético dará la ubicación dentro del cuarto de forma continua y repetitiva, como el caso que se representa en la Figura 14.

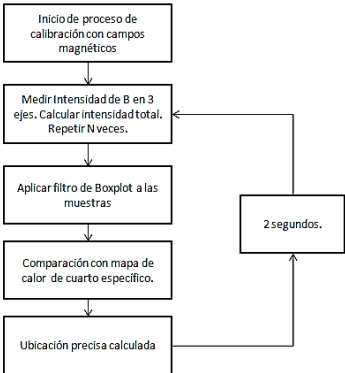


Figura 14. Metodología de localización continua

5. Limitaciones

El estudio basado en campos magnéticos tiene unas fuentes de interferencia física esporádicas de origen común. La presencia de elementos que contengan imanes fijos, tales como altavoces o unidades de almacenamiento rígido, hacen que las medidas puntuales de intensidad B cambien drásticamente. Afortunadamente, la incidencia de ese tipo de interferencia se restringe a pocos centímetros, porque la tasa de disminución de densidad de campo magnético, a medida que se aleja de un imán, se comporta de forma logarítmica, como se aprecia en la Figura 15.

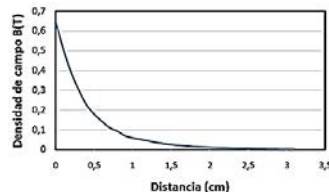


Figura 15. Reducción significativa en la densidad de campo magnético B a medida que aumenta la distancia, respecto a la superficie superior del imán [10]

Al hacer una prueba del cambio brusco en la densidad de campo magnético B en un punto fijo (sin mover el magnetómetro), se aprecian cambios abruptos como los de la Figura 16. Si bien la Figura muestra que un objeto inesperado que se acerque al magnetómetro producirá una variación no documentada y que vuelva errónea la localización, en la práctica dichos objetos aparecen de forma fortuita y no son habituales. Sin embargo, constituyen una limitación no predecible y además, difícilmente compensable.

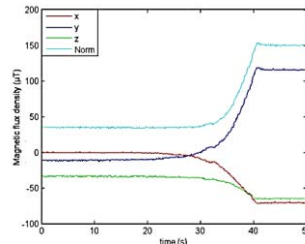


Figura 16. Interferencia producida al acercarse un disco duro [11]

6. Trabajos futuros

Este presente trabajo evidencia la factibilidad de utilizar la variable de amplitud de campo magnético como información complementaria para la localización de un dispositivo móvil en un espacio de interiores, con lo que se abren campos para investigaciones tales como:

- Desarrollo de un aplicativo para teléfonos inteligentes capaz de hacer muestreos WiFi y Campo Magnético, para almacenamiento local y transmisión a *cluster* de procesamiento.
- Diseño de un software centralizado en servidores externos, capaces de automatizar el procesamiento estadístico de las muestras: detección de valores atípicos, descarte de fuentes problemáticas y caracterización eficiente de datos.
- Estudio de la incorporación de nuevas variables, tales como las de los sensores inerciales (giroscopio y acelerómetro), para detectar movimiento y los desplazamientos del usuario, variables indispensables en un sistema de navegación.

- Con la información de los sensores y las calibraciones hechas de los espacios, implementar filtros estadísticos que logren unir probabilidades de desplazamiento.

7. Conclusiones

Se pudo evidenciar las deformaciones de campo magnético terrestre debidas a la presencia de electrodomésticos, columnas y materiales ferrosos. Se entienden como deformaciones los cambios constructivos o destructivos en la intensidad y dirección del campo magnético, que crean marcas magnéticas que hacen mucho más fácil la diferenciación del ambiente. Es posible construir un mapa de la caracterización de un espacio completo para evidenciar las marcas magnéticas, que es conocido como mapa de calor de la intensidad de campo magnético.

La metodología WiFi aplicada permite identificar rápidamente la habitación donde se ubica el dispositivo y el campo magnético permite identificar el lugar dentro de esa habitación. La metodología del estudio y muestreo de campo magnético es una variable complementaria para la investigación de WiFi.

El tiempo de procesamiento de los datos de intensidad de campo magnético, basado en la infraestructura de un teléfono inteligente estándar, es fácilmente satisfecha dado que constituye el procesamiento de una única variable por punto de medición. Así, el campo magnético se constituye como una variable que puede ser procesada en tiempo real y puede ser pieza importante en la construcción de un modelo de navegación en interiores.

Debido a que algunas deformaciones de campos magnéticos están asociadas con el funcionamiento de equipos electrónicos, pueden ser fuente de inestabilidades en las huellas magnéticas. Se propone como trabajo futuro un estudio sobre los errores y sus propagaciones en este tipo de caracterizaciones.

Dado que el análisis de campo magnético solamente analiza una variable, es útil para determinar la ubicación de un dispositivo en un área pequeña. Para áreas grandes es necesario apoyarse en técnicas más complejas, tales como el *fingerprinting* WiFi, la ubicación por reconocimiento de imágenes, realidad aumentadas, código QR, RFID, entre muchas otras que ayudan a posicionar el dispositivo en un área específica, pero cuyo costo computacional no es tan bajo como la de la alternativa presentada en este trabajo.

Referencias

- [1] Gómez, C. (2015). [Estudio de errores en la localización en espacios interiores, de dispositivos de dispositivos móviles por medio de tecnologías WiFi](#). En Encuentro internacional de Educación en ingeniería. Cartagena, Colombia
- [2] Hashimoto, H., Magatani, K. & Yanashima, K. (2001). [The development of the navigation system for visually impaired persons](#). In Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (pp. 1481-1483). Istanbul, Turkey.
- [3] Ando, B. & Graziani, S. (2009). [Multisensor strategies to assist blind people: A clear-path indicator](#). IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 58(8), pp. 2488-2494.
- [4] Hunaiti, Z. Garaj, V. & Balachandran, W. (2009). [An assessment of a mobile communication link for a system to navigate visually impaired people](#). IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 58(9), pp. 3263-3268.
- [5] Bahl, V. & Padmanabhan, V. (2000). [RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System](#). Proceedings Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (pp. 775 -784). Tel Aviv, Israel.
- [6] Ruiz, F. (2011). [Localización y autocalibrado simultáneo con sistemas de posicionamiento local ultrasónicos](#). Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá.
- [7] Berkovic, G. (2014). [Accurate and reliable real-time indoor positioning on commercial smartphones](#). Proceedings Intern. Conf. on Indoor Positi. and Indoor Navigation (pp. 670-677). Busan: South Korea.

- [8] Garcia, S. (2013). [Diseño y construcción de magnetómetro triaxial para análisis y experimentación de aislamientos magnéticos](#). Trabajo de grado. Universidad Carlos III.
- [9] Pathapati, K. (2011). [Indoor localization using magnetic fields](#). Dissertation Doctoral. University of North Texas.
- [10] Herrera, L., Alarcón, A. & Rivas, E. (2013). [Diseño de un generador de flujo axial usando el método de elementos finitos](#). *Redes de Ingeniería* 4(2), pp. 6-15.
- [11] Vandermeulen, D., Vercauteren, C. & Weyn, M. (2013). [Indoor localization using a magnetic flux density map of a building](#). *Proceedings of the Third International Conference on Ambient Computing, Applications, Services and Technologies* (pp. 42-49). Porto, Portugal.

24. Estado del arte y aproximación metodológica a la evaluación de la innovación de productos en organizaciones del sector de las telecomunicaciones

Miguel Roldán A.¹

José L. Giraldo²

Alba L. Betancur³

¹Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín, Colombia

²Universidad Autónoma Latinoamericana. Medellín, Colombia

³Asociación IngeniaSER. Medellín, Colombia

1. Introducción

De acuerdo con la revisión de la literatura y a estudios regionales relacionados, evaluar la innovación de productos y servicios se convierte en una actividad relevante en las organizaciones, para desarrollar ventajas competitivas y alcanzar éxito económico. Sin embargo, los estudios sobre la evaluación de los productos innovadores con respecto a su eficacia y eficiencia en las organizaciones, especialmente en las del sector de las telecomunicaciones, han sido escasos y poco claros.

Telecomunicaciones se denomina al conjunto de tecnologías que permiten la adquisición, producción, almacenamiento, tratamiento, comunicación, registro y presentación de información, en forma de voz, imágenes y datos contenidos en señales de naturaleza acústica, óptica o electromagnética. Las tecnologías incluyen la electrónica como base que soporta el desarrollo de las telecomunicaciones, la informática y la audiovisual. La innovación se considera como sinónimo de producir, asimilar y explotar con éxito una novedad en las esferas económicas y sociales, de forma que aporte soluciones inéditas a los problemas y permita responder a las necesidades de las personas y de la sociedad, un ejemplo de esto es la telefonía móvil.

Sin lugar a dudas, el rápido desarrollo e innovación en las nuevas TIC es claramente responsable del surgimiento de una nueva economía, que contribuye a crear lo que se conoce como la Sociedad de la Información. La OECD [1] estima que, en la mayoría de los países desarrollados, más del 50% del PIB se genera sobre la base de inversiones en productos y servicios de alta tecnología, fundamentalmente en TIC. En este sentido, las crecientes inversiones en equipos informáticos, en investigación y desarrollo y en formación técnica, ponen de manifiesto la importancia del conocimiento y la gestión de la información en el desarrollo económico de los países. Es así como las dimensiones y variables para evaluar, mediante escalas y medidas, la innovación de un producto en el entorno competitivo global y dinámico de hoy, son cada vez más relevantes, principalmente como resultado de tres tendencias: la competencia internacional, la fragmentación de mercados diversos y exigentes y los rápidos cambios tecnológicos en las organizaciones [2].

Este trabajo se estructura de la siguiente manera: innovación, definiciones más relevantes de acuerdo con los diferentes autores; tipos de innovación, las tipologías de innovación más representativas; y valoración de la innovación, se identifican las dimensiones y variables más adecuadas para evaluar la innovación de productos y servicios. En metodología para la identificación de variables, escalas y medidas se detallan tres fases: 1) revisión de la literatura, 2) determinar las variables, y 3) evaluar las variables, que influyen en la evaluación de la innovación de productos y servicios en las organizaciones del sector de las telecomunicaciones. Por último, se exponen las conclusiones, los agradecimientos y las referencias utilizadas.

2. Contexto teórico

2.1 Innovación

Una de las primeras definiciones de innovación aparece en Schumpeter [3], quien analiza la importancia económica de la innovación. En su definición destaca la relación estrecha entre innovación e invento, que, necesariamente no son el mismo concepto. Las innovaciones implican desarrollo de los inventos, institucionalización de nuevos métodos de producción, o introducción de nuevos productos en el mercado. Recientemente, se ha definido innovación como la conversión de ideas en productos, procesos o servicios que tienen éxito en el mercado [4]. Estas ideas pueden ser tecnológicas, comerciales y/u organizativas, por lo que se puede distinguir entre innovaciones tecnológicas y no-tecnológicas. Las primeras implican productos, servicios y procesos nuevos o mejorados gracias a la tecnología, mientras que las no-tecnológicas consisten en nuevas formas de organización, de gestión de la empresa o nuevos comportamientos en el mercado [4].

En la literatura existen otras definiciones de innovación, que dependen de la perspectiva adoptada por los autores. Por ejemplo, en [5] se define como la creación de un producto y servicio que es nuevo para una unidad de negocio. Adicionalmente, en [6] se conceptualiza como la adopción de una idea o un comportamiento nuevo en una organización. Mientras que para [7] puede ser una combinación de viejas ideas, percibidas como nuevas por los individuos implicados. La primera conceptualización de innovación aplicada a la invención o producto fue propuesta por Jewkes [8] y otros autores [9-13] la definen como el componente tecnológico para el desarrollo de las naciones.

Se puede concluir que la mayoría de las definiciones reiteran la novedad de la creación o mejora que supone la innovación. De hecho, se considera que la innovación es un factor fundamental para el éxito de las empresas y, en última instancia, para el crecimiento de las economías nacionales [4]. Por lo tanto, la definición que se adopta para este trabajo es: consiste en la introducción de un producto (bien o servicio) nuevo o significativamente mejorado [4]. Lo que implica la introducción de nuevas prácticas internas en las organizaciones y que, además, aporta al desarrollo económico y sostenible de las regiones.

2.2 Tipos de innovación

En la práctica, las organizaciones difieren tanto en el tipo y grado de innovación, como en el impacto que tiene en la construcción de ventajas competitivas en el mercado [5, 14-16]. Sin embargo, en [17] se indica que las tipologías de innovación más extendidas son las que utilizan, como criterio de clasificación, la naturaleza de la innovación o su radicalidad. Por ejemplo, el Manual de Oslo [4] explica que, si la innovación implica características nuevas o significativamente mejoradas del servicio ofertado a los clientes, es una innovación de producto o servicio; pero, si la innovación implica métodos, equipo o conocimientos nuevos o significativamente mejorados utilizados para la mejor prestación del servicio, es una innovación de proceso.

Si la innovación implica el uso por vez primera de métodos organizativos nuevos en las prácticas de negocio de la empresa, en la organización del trabajo o en las relaciones externas, es organizativa; pero, si el objetivo es incrementar el volumen de ventas o el precio del producto posicionándolo mejor en el mercado o mejorando su reputación, se trata de innovación comercial [4]. Otras clasificaciones de la innovación incluyen:

- *Según su objeto* [4, 18]: innovación de producto, innovación de proceso, innovación de insumos e innovación de mercado. Una innovación de producto aporta un bien o servicio nuevo, o significativamente mejorado, en cuanto a sus características técnicas,

su uso u otras funcionalidades. La mejora se logra con conocimiento o tecnología, con mejoras en materiales, en componentes, o con informática integrada. Para considerarlo innovador, un producto debe presentar características y rendimientos diferenciados de los productos existentes en la empresa, incluyendo mejoras en plazos o en servicio.

La innovación de proceso, concepto aplicado tanto a los sectores de la producción como a los de distribución, se logra mediante cambios significativos en las técnicas, los materiales y/o los programas informáticos empleados, que tengan por objeto la disminución de los costos unitarios de producción o distribución y mejorar la calidad, la producción y la distribución de productos nuevos o sensiblemente mejorados. Las innovaciones de proceso incluyen también a las nuevas o sensiblemente mejoradas técnicas, equipos y programas informáticos, utilizados en las actividades auxiliares de apoyo, tales como compras, contabilidad o mantenimiento. La introducción de una TIC nueva o sensiblemente mejorada, es una innovación de proceso si está destinada a mejorar la eficiencia y/o la calidad de una actividad de apoyo básico.

La innovación de insumos hace referencia a la modificación de las características o uso de nuevos materiales. De otro lado, la innovación de mercado consiste en utilizar un método de comercialización no utilizado antes en la empresa, que puede consistir en cambios significativos en diseño, envasado, posicionamiento, promoción o tarificación, siempre con el objetivo de aumentar las ventas. La variación en el método tiene que suponer una ruptura fundamental con lo realizado anteriormente. Los cambios de posicionamiento pueden consistir en la creación de nuevos canales de venta, tales como el desarrollo de franquicias, la venta directa, las modificaciones en la forma de exhibir el producto o la venta de licencias de uso. Los cambios en promoción suponen la modificación en la comunicación utilizando nuevos soportes, sustitución del logo, los sistemas de fidelización y la personalización de la relación con el cliente. La tarificación hace referencia a sistemas de variación de precios en función de la demanda o de las opciones ofrecidas.

- *Según el impacto* [19]: innovación incremental e innovación radical o disruptiva. La incremental implica pequeños cambios dirigidos a incrementar la funcionalidad y las prestaciones de la empresa que, si bien son poco significativas aisladamente, cuando suceden continuamente de forma acumulativa pueden constituir una base permanente de progreso. De otro lado, la innovación radical implica una ruptura con lo establecido; crea nuevos productos o procesos que no pueden entenderse como una evolución natural de los ya existentes. Es la clase de innovación que se produce cuando un innovador lanza al mercado una innovación sencilla, conveniente, accesible y asequible, que transforma por completo una industria y genera otra totalmente nueva a través de una propuesta de valor alternativa bien diferenciada (Tabla 1).

Tabla 1. Tipos de innovación incremental y radical [4]

Tipos de innovación	Definición según manual de Oslo
Innovación radical de producto	Es un producto cuyo uso, características, atributos, propiedades de diseño, o uso de materiales y componentes difieren significativamente de los productos fabricados con anterioridad. Tales innovaciones pueden implicar nuevas tecnologías o basarse en la combinación de las existentes.
Innovación incremental de producto	Es un producto existente cuyo desempeño ha sido aumentado o mejorado.

- *Según su origen* [20]: innovación externa e innovación interna. Para llevar el concepto de innovación a su máxima y más eficaz expresión, resulta fundamental lograr

mecanismos que permitan que las ideas internas y externas trabajen colaborativamente, para que las empresas puedan aplicar lo que se está desarrollando, en la red y en el mundo, a su idea fundamental de negocio. Así, la innovación externa es incorporada desde el exterior, desarrollada en otra ubicación y es transferida o implementada. Mientras que la innovación interna se genera a partir de las ideas de los miembros de la organización, o bien a través de un programa organizado de investigación y desarrollo.

En este sentido, algunas teorías [21, 22] coinciden en que el tipo de innovación más relevante es la de productos y servicios, toda vez que representa la introducción de algo nuevo para la organización, que impacta directamente sus procesos y tipo de mercado, a la vez que añade valor a los clientes y contribuye al desarrollo del conocimiento de las organizaciones y de la región. Por lo tanto, evaluar la práctica de cualquiera de los tipos de innovación que se describen en [3, 4], ha demostrado ser un tema complicado de abordar en el alcance de sus definiciones, debido a las dificultades que se presentan en la limitación de sus fronteras. Dadas las consideraciones anteriores, se hace evidente la importancia que tiene evaluar la innovación de productos y servicios en las organizaciones. En la Tabla 2 se incluye un resumen de definiciones de innovación de productos.

Tabla 2: Definiciones de innovación de productos [26]

Fuente	Innovación de productos y servicios	Aspecto relevante de la aproximación
[21]	El producto puede ser un bien, un servicio, un lugar, una persona o una idea.	La innovación no está limitada a los cambios en las características del producto. Normalmente, implica cambios en el proceso de entrega y en la interacción con el cliente.
[22]	La aplicación de técnicas y herramientas prácticas para generar cambios grandes y pequeños a productos, procesos y servicios que da como resultado la introducción de algo nuevo para la organización, que añade valor a clientes y que contribuye al conocimiento disponible para la organización	Las empresas de servicios tienden a invertir menos en activos inmovilizados para la innovación y gastan menos en la adquisición de patentes y licencias.
[23]	El producto es la oferta con que una compañía satisface una necesidad	La tecnología no es lo más importante para el desarrollo de nuevos servicios
[24]	El producto es todo bien o servicio susceptible de ser vendido y depende de la línea, la marca y la calidad.	Las innovaciones de productos y servicios no requieren mucha I+D
[25]	Cualquier cosa que se pueda ofrecer a un mercado para su atención, adquisición, uso o consumo, y que pudiera satisfacer un deseo o necesidad, incluye objetos físicos, servicios, personas, lugares, organizaciones e ideas.	Las innovaciones en servicios son más fáciles de imitar que otros tipos de innovaciones
[26]	La innovación de productos y servicios no es simplemente la creación de algo nuevo, es también un remedio para la solución de un conjunto de problemas de la organización.	La falta de trabajadores bien formados suele ser una barrera frecuente para la innovación en empresas de servicios, que en empresas de manufacturas.

En conclusión, una característica común a todas las innovaciones es que, para identificarse como tal, deben ser introducidas en el mercado, como es el caso de la innovación de producto, o deben ser aplicadas en las operaciones de la empresa, como el caso de las innovaciones de proceso, método de organización y comercialización [4].

2.3 Valoración de la innovación

Evaluar la innovación surge del interés general y del bienestar social que se deriva de la introducción de productos y servicios nuevos y/o mejorados. Este interés se ha ido afianzando gracias a la notable producción de estudios sobre los efectos sociales y económicos del cambio tecnológico [27]. Además, dado que las políticas necesitan basarse

en evidencias empíricas [4], valorar la innovación se convierte en una actividad relevante para que sean efectivas en las organizaciones. Para valorar se requieren escalas y medidas y, en este sentido, las de la innovación se vuelven necesarias para entender las variables y su relación con el desarrollo económico de los países [4].

La OCDE [4] ha realizado notables esfuerzos para estandarizar las definiciones, escalas y medidas de innovación, entre los que incluye la realización de la primera encuesta de innovación estandarizada en los países de la Unión Europea. Desde la primera edición, el Manual de Oslo estimuló la evaluación de la innovación como un proceso, fomentando la recolección de datos y variables, que pudieran fundamentar la construcción de escalas y medidas para evaluar la innovación de productos mediante su correlación y comparación, para que le sean útiles a los países para el análisis, en especial a los desarrolladores de políticas [28].

Tabla 3. Factores claves y obstáculos para evaluar la Innovación de Productos y servicios

Fuente	Factores Claves	Principales obstáculos
[29]	Actividades de I+D Capacitación del personal de gestión Diseño y transferencia de tecnología Inversión en bienes de capital Participación personal en actividades de innovación Aprovechamiento de las tecnologías Desarrollar actividades innovadoras	Conocimiento Costos
[4]	Demanda, mercado, competencia, producción, base de conocimiento. Introducción de TIC, ciclo de vida, mejoras de calidad, flexibilidad, éxito en el mercado, reducir costos. Capacidades de producción, iniciativas comerciales, lanzamiento de productos, reemplazar productos que se estén quedando obsoletos. Aumentar la variedad de bienes y servicios Desarrollar productos que no dañen el medioambiente Aumentar o mantener la cuota de mercado Introducir productos en nuevos mercados, mejorar la calidad de los productos y servicios.	Costos Conocimiento Mercado Institucionales Falta de demanda Innovaciones previas
[30]	Variables relacionadas con el sector Variables de la región (ubicación geográfica) Redes de interacción, adquisición de tecnología Conocimiento, políticas públicas Cultura externa	Institucionales Conocimiento Costos
[31]	Pertinencia, riesgo asumido (empresarial y financiero) Generación y desarrollo de innovaciones Aspectos financieros, sostenibilidad del proceso, documentación del proceso, impacto. Protección a la innovación, reconocimientos	Costos Falta de demanda Institucionales
[32]	Capacidad de I+D Capacidad de toma de decisiones de innovación Capacidad de servicios Capacidad de destinación de capital Capacidad de desarrollo de productos y marketing	Conocimientos Falta de demanda Costos Mercados
[33]	Capacidad de adquisición de tecnología Capacidad de manufactura Capacidad de gestión estratégica de la innovación de productos y servicios. Capacidad de marketing	Conocimientos Mercados Costos
[34]	Complejidad novedad tecnología Tiempo de desarrollo, tamaño del mercado Crecimiento del mercado Costos de desarrollar innovación	Costos Conocimiento Mercado

La Tabla 3 muestra los factores que los diferentes autores han tenido en cuenta para la evaluación de la innovación de productos y servicios en las organizaciones. Además, muestra la importancia de los productos y de la innovación al interior de las

organizaciones y los factores que se deben fortalecer con el desarrollo de los mismos. Para este trabajo se adoptan los factores planteados por el manual de Oslo [4], toda vez que pueden proporcionar valiosa información para identificar las fuerzas que fomentan la actividad innovadora de las organizaciones. Se identifica, además, que la competencia, la demanda y los mercados son los incentivos principales para las innovaciones de productos y servicios en las organizaciones.

Sin embargo, actualmente son pocos los estudios que comparan el desempeño innovador de los países, con base en los indicadores elaborados bajo las directrices del Manual de Oslo y en menor escala del Manual de Bogotá [35]. La mayor parte se limitan a comparaciones de países desarrollados [4], o a comparaciones de países pertenecientes a una misma región geográfica. Por ejemplo, [36, 37] destacan que aún no existe una publicación regular de resultados detallados y combinados de encuestas sobre innovación desarrollada dentro y fuera del ámbito de la UE. Al mismo tiempo que existe una carencia de estudios que comparen el desempeño innovador de países ubicados en diferentes regiones, o que están en diferentes etapas de desarrollo [36]. Adicionalmente, en [13] se identifica que el estado del arte en la evaluación de indicadores de innovación, todavía descansa fuertemente en datos tradicionales de actividades científicas y tecnológicas.

Por otro lado, existen estudios que proponen dimensiones y variables para evaluar la innovación en productos y servicios [38-43]. Entre ellos, el método planteado por [38, 44], donde se propone, a través de escalas y medidas, las dimensiones de eficacia y eficiencia y un conjunto de variables, evaluar la innovación de productos y servicios en las organizaciones para contribuir, de esta manera, a mejorar su desempeño y resultados económicos. Alegre et al. [45] conciben la combinación de las dimensiones eficacia y eficiencia, indicando que la primera evalúa el grado de éxito de una innovación, mientras que la eficiencia evalúa el esfuerzo llevado a cabo para conseguir aquel grado de éxito. La eficacia de la innovación del producto estuvo inspirada principalmente por el instrumento propuesto por la OCDE. En la tabla 4 se muestran las dimensiones eficacia y eficiencia con las variables sobre las que se aplican.

Tabla 4. Aplicación de las dimensiones eficiencia y eficacia [45]

Variables	Dimensiones	
	Eficiencia	Eficacia
Participación de mercado frente a objetivos		x
Apertura de mercados nuevos en el extranjero		x
Entrega puntual en el lanzamiento	x	
Ampliación de presupuesto	x	
Mejor participación en el mercado comparado con la competencia		x
Desarrollo del entorno		x
Participación en el mercado masivo		x
Participación del mercado extranjero		x
Sustitución de los productos		x
Apertura nuevos de productos		x
Mejoras de productos		x
Apertura de nuevos mercados		x

Además, la eficiencia de la innovación del producto estuvo basada en una comparación con empresas competidoras, según las métricas: desarrollo de proyectos de innovación de mediano tiempo, costo medio por proyecto de innovación y grado de satisfacción global del proyecto de innovación. El contexto global está dominado por un rápido avance de cambios tecnológicos, que reduce los ciclos de vida de los productos, aumenta las demandas del cliente, requiere mayores niveles de productividad y mejores requisitos de

calidad dentro de una competencia global feroz [46]. En este contexto, particularmente para las organizaciones y sus conocimientos intensivos, la innovación tecnológica se considera un elemento clave para mantener el mejoramiento continuo de sus ventajas competitivas [47].

Entonces, se puede concluir que, para conseguir altos rendimientos en la innovación del producto, las organizaciones necesitan profundos análisis de la dinámica de la innovación, vista en términos de productos bien definidos y su implementación en la estrategia de la organización. Adicionalmente, lo más importante es pensar en herramientas dinámicas, para evaluar la eficacia y la eficiencia en la innovación de productos de forma continuada y permanente. En la Tabla 5 se muestra un resumen detallado de autores, criterios más utilizados y otras medidas para valorar la innovación.

Tabla 5. Valoración de la innovación [38, 44]

Fuente	Criterios	Medidas (dimensiones)
[41]	Rendimiento financiero, rendimiento técnico; rendimiento de cliente	Fp: rendimiento financiero; Tp: rendimiento técnico; Cp: rendimiento de cliente
[38]	Rendimiento del producto, el rendimiento operativo y producto eficiencia, respectivamente	Ece: eficacia; Eca: eficiencia
[42]	Rendimiento financiero, rendimiento técnico; rendimiento de cliente; rendimiento de mercado, rendimiento de producto	Fp: rendimiento financiero; Tp: rendimiento técnico; Cp: rendimiento de cliente; Mp: rendimiento de mercado; Pp: rendimiento de producto
[43]	Rendimiento de ventas; rentabilidad; realce de oportunidades	Sp: rendimiento de ventas; Pr: rentabilidad; Eo: ventana de oportunidades
[39]	Rendimiento de producto, rendimiento operacional	Pp: rendimiento de producto, Op: rendimiento operacional
[38, 44]	Detalles de dimensiones y variables para la evaluación de la innovación de productos y servicios en las organizaciones	Fp: rendimiento financiero, Tp: rendimiento técnico; Cp: rendimiento de cliente; Mp: rendimiento de mercado; Pp: rendimiento de producto, Op: rendimiento operacional; Ece: eficacia; Eca: eficiencia; Sp: rendimiento de ventas; Pr: rentabilidad; Eo: ventana de oportunidades

En general, todas las medidas influyen directamente en la innovación de productos y servicios, toda vez que aportan información fundamental para medir la eficiencia y eficacia de la innovación en el mercado y el grado de aceptación de los consumidores. En la ciudad de Medellín se ha identificado que el crecimiento de la base de las organizaciones del sector servicios tiene una alta dependencia del desarrollo, el crecimiento, la eficiencia y el éxito innovador de los productos, que puedan generar las organizaciones del sector de las telecomunicaciones [48].

Sin embargo, actualmente se identifican limitaciones y brechas en el conocimiento y uso de instrumentos, que permitan evaluar la innovación de productos y servicios en las organizaciones de la ciudad, especialmente en las telecomunicaciones. Esto hace necesaria y manifiesta la identificación de dichos instrumentos, de manera que posibiliten la eficiente evaluación de la innovación de producto, toda vez que en la actualidad las

innovaciones no se identifican ni se valoran claramente. de tal forma que permitan entender y verificar su dinámica y solamente se intuyen empíricamente algunos comportamientos [48]. Esto genera un impacto negativo en la competitividad y crecimiento de las organizaciones, impidiendo que aporten activamente al desarrollo y progreso de la región y, lo más importante, ha retrasado significativamente su participación en el contexto mundial de innovación en productos y servicios [49].

Por lo tanto, actualmente son pocos los estudios que comparan el desempeño innovador de los países con base en indicadores estandarizados, mientras que, la mayor parte, se limitan a comparaciones de países desarrollados, o de países pertenecientes a una misma región geográfica. Aún no existe una publicación regular de resultados detallados y combinados de encuestas sobre innovación, desarrollados dentro y fuera del ámbito de la UE, o de estudios que comparen el desempeño innovador de países de diferentes regiones o en diferentes etapas de desarrollo.

El estado del arte en la evaluación de indicadores de innovación todavía se basa en datos de actividades científicas y tecnológicas. Se identifican limitaciones y brechas en el conocimiento y uso de instrumentos, que permitan evaluar la innovación de productos y servicios en las organizaciones del sector, especialmente en el de las telecomunicaciones. Esto genera un impacto negativo en la competitividad y crecimiento de las organizaciones. Por lo que, en ciudades orientadas el sector servicios, es importante avanzar en la identificación y evaluación de las variables que influyen en la innovación de productos y servicios en general y, especialmente, en las organizaciones del sector de las telecomunicaciones. Identificando actividades de desarrollo de productos y servicios, sus características y las dificultades para evaluar su actividad innovadora, las dimensiones para dicha evaluación con las variables adecuadas, además de sus escalas y medidas.

3. Metodología

Identificar las variables, escalas y medidas que permitan evaluar la innovación de productos y servicios en las organizaciones, requiere, en principio, de investigación cualitativa de tipo exploratorio, que dé respuestas al *Qué y Cuáles* son las más adecuadas en cada contexto. Además, para identificar características, propiedades y técnicas de recolección de información para valoración de las variables. Aquí, se plantea un estudio de caso como metodología para desarrollar estas actividades.

Según [50], el estudio de caso es una investigación empírica que estudia un fenómeno contemporáneo dentro de su contexto de la vida real, especialmente cuando los límites entre el fenómeno y su contexto no son evidentes claramente. Una investigación de estudio de caso trata con una situación técnicamente distintiva, en la que hay muchas más variables de interés que datos observacionales y, como resultado, se basa en múltiples fuentes de evidencia y se beneficia del desarrollo previo de proposiciones teóricas que, en esta temática, corresponden a la identificación y determinación teórica de las variables y a la recolección y análisis de datos [51]. El procedimiento metodológico propuesto para la realización del estudio de caso comprende las siguientes fases [38, 52, 53]:

3.1 Fase 1. Revisión de la literatura

1. Selección de Casos: es importante para la construcción teórica. De acuerdo con [54], el número de casos a estudiar en una investigación no está definido y no existe un número ideal. En cada situación, el investigador debe escoger el número que le permita obtener datos relevantes para cada investigación.

2. Diseño de Instrumentos: El estudio de caso requiere protocolizar las tareas, instrumentos y procedimientos que se van a ejecutar. El protocolo de estudio de caso es un documento en el que se materializa el diseño de la investigación [55]. En las entrevistas semi-estructuradas el entrevistador despliega una estrategia mixta, alternando preguntas estructuradas con preguntas espontáneas, lo que permite hacer comparaciones gracias a la parte detallada de las respuestas de los diferentes entrevistados. Mientras que la parte libre permite profundizar en las características específicas del entrevistado, por ello, permite mayor libertad y flexibilidad en la obtención de información pertinente del problema. Estas entrevistas están orientadas a los expertos que intervienen en la evaluación de la innovación de productos y servicios en la empresa objeto del estudio. Adicionalmente, los aportes de [38, 44] permiten proponer variables que influyen en la innovación de productos y servicios en una organización.

3.2 Fase 2. Determinar las variables

1. Obtención de los datos: se recomienda la utilización de múltiples fuentes de datos y el cumplimiento del principio de triangulación, para garantizar la validez interna de la investigación [43]. Esto permite verificar si los datos obtenidos a través del diseño de instrumentos y las diferentes fuentes de información, guardan relación entre sí (principio de triangulación) [55].
2. Tabulación e interpretación de los datos: los datos obtenidos a partir de las fuentes primarias y secundarias se tabulan empleando una herramienta ofimática de hoja de cálculo, a través de funcionalidades como las tablas dinámicas. Igualmente, se utilizarán herramientas informáticas para análisis semántico, tales como Atlas.ti, cuyo objetivo es facilitar el análisis cualitativo de, principalmente, grandes volúmenes de datos textuales y, posteriormente, su interpretación [56].

3.3 Fase 3. Evaluar las variables

1. Análisis global: es la comparación permanente de la literatura con los datos obtenidos para la codificación de los mismos. Para este análisis se recomienda el uso de códigos para organizar los datos recolectados [57], realizar repetidas lecturas para las transcripciones y notas de campo [58] y hacer una constante comparación entre los conceptos sugeridos por la literatura y los códigos y categorías que emergen de los datos recolectados [59].
2. Construcción teórica: se efectúa un análisis de la información con el propósito de interpretar las relaciones encontradas entre las variables establecidas, con base en el marco teórico y los códigos y categorías obtenidos en el análisis global. Intentar explicar por qué existen dichas relaciones conduce a la comprensión del fenómeno estudiado [55]. La interacción entre el marco conceptual y la dinámica de la investigación proporciona la oportunidad de generar teoría y conocimiento [60].
3. Conclusiones generales e implicaciones de la investigación: en este tipo de investigación corresponden a las variables que influyen en la innovación de productos y servicios en la organización, con sus respectivas escalas y medidas de valoración.

4. Conclusiones

Una característica común a todas las innovaciones es que, para identificarlas como tal, deben ser introducidas en el mercado, como una innovación de producto, o aplicadas en

las operaciones de la empresa, como las innovaciones en procesos, métodos de organización y comercialización.

Pocos estudios comparan el desempeño innovador de los países con base en indicadores estandarizados, la mayor parte están limitados a comparaciones de países desarrollados, o pertenecientes a una misma región geográfica. Por lo que aún no existe una publicación regular de resultados detallados y combinados de encuestas sobre innovación, desarrolladas dentro y fuera del ámbito de la UE, o de estudios que comparen el desempeño innovador de países de diferentes regiones o etapas de desarrollo.

El estado del arte en la evaluación de indicadores de innovación todavía se basa en datos de actividades científicas y tecnológicas. Se identifican limitaciones y brechas en el conocimiento y uso de instrumentos, que permitan evaluar la innovación de productos y servicios en las organizaciones de la región, especialmente en el sector de las telecomunicaciones, lo que genera un impacto negativo en la competitividad y crecimiento del mismo.

En ciudades orientadas el sector servicios es importante avanzar en la identificación y evaluación de las variables, escalas y medidas, que influyen en la innovación de productos y servicios en las organizaciones en general, especialmente en las organizaciones del sector de las telecomunicaciones. Para identificar las actividades propias del desarrollo de productos y servicios, hay que identificar las características de estas actividades, así como las dificultades actuales para evaluar la innovación.

Mediante el estudio de caso y con base en [38, 44], se identifican las variables que influyen en la innovación de productos y servicios en una organización del sector de las telecomunicaciones en Medellín, y las escalas y medidas para valorarlas. En este tipo de investigación se utiliza el estudio de caso, una metodología que permite desarrollar un análisis holístico y contextualizado teniendo en cuenta la complejidad del sistema de variables que integran el problema.

Referencias

- [1] OECD (2015). [Estudios económicos de la OCDE COLOMBIA](#). OCDE Publicaciones.
- [2] Wheelwright, S. & Clark, K. (1992). [Competing through development capability in a manufacturing-based organization](#). Business Horizons 35(4), pp. 29-43.
- [3] Schumpeter, J. (1939). [Business cycles](#). Cambridge: Cambridge University Press.
- [4] OECD (2007). [Manual de Oslo](#). OCDE Publicaciones.
- [5] Tushman, M. & Nadler, D. (1986). [Organizing for innovation](#). California Management Review 28(3), pp. 74-92.
- [6] Damanpour, F. & Gopalakrishnan, S. (1998) [Theories of organizational structure and innovation adoption: the role of environmental change](#). Journal of Engineering and Technology Management 15(1), pp. 1-24.
- [7] Van de Ven, A.; Polley, D. & Venkataraman, R. (2001). [El viaje de la innovación. El desarrollo de una cultura organizativa para innovar](#). Oxford: Oxford University Press.
- [8] Jewkes, J., Sawers, D. & Stillerman, R. (1958). [The sources of invention](#). USA: St. Martin's Press.
- [9] Edquist, C. & Lundvall, B. (1993). [Comparing the Danish and Swedish systems of innovation](#). In Nelson, R. (Ed.), National Innovation Systems: A Comparative Analysis (pp. 265-298). New York: Oxford University Press.
- [10] Freeman, C. (1995). [The national system of innovation in historical perspective](#). Cambridge Journal of Economics 19(1), pp. 5-24.
- [11] Dosi, G. (1988). [Sources, Procedures, and Microeconomic Effects of Innovation](#). Journal of Economic Literature 26(3), pp. 1120-1171.
- [12] Nelson, R. (1993). [National innovation systems: a comparative analysis](#). Oxford: Oxford university press.
- [13] Godin, B. (2008). [Innovation: the History of a Category](#). Project on the Intellectual History of Innovation Working 1, pp. 1-67.

- [14] Zaltman, G., Duncan, R. & Holbek, J. (1973). *Innovations and organizations*. New York: Wiley.
- [15] Henderson, R. & Clark, K. (1990). *Architectural innovation: The reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms*. *Administrative Science Quarterly* 35(1), pp. 9–30.
- [16] Damanpour, F. & Gopalakrishnan, S. (2001). *The dynamics of the adoption of product and process innovations in organizations*. *Journal of Management Studies* 38(1), pp. 45–65.
- [17] Damanpour, F. (1991). *Organizational innovation: A meta-analysis of effects of determinants and moderators*. *Academy of Management Journal* 34(3), pp. 555–590.
- [18] Porter, M. (2003). *The economic performance of regions*. *Regional Studies* 37(6–7), pp. 545–546.
- [19] Buitelaar, W. (1988). *Technology and work: Labour studies in England, Germany and the Netherlands*. London: Gower Publishing Company.
- [20] Malaver, F. & Vargas, M. (2004). *Los procesos de innovación en América Latina: aportes para su caracterización*. *Academia, Revista Latinoamericana de Administración* 33, pp. 5–33.
- [21] Stanton, W., Etzel J. & Walker B. (2007). *Fundamentos de marketing*. USA: McGraw-Hill.
- [22] O'Sullivan, D. & Dooley, L. (2009). *Applying Innovation*. Boston: SAGE Publications.
- [23] Perreault, W. & McCarthy, J. (2001). *Basic Marketing: A Global Managerial Approach*. USA: McGraw-Hill.
- [24] Romero, A. (1997). *Servicios a empresas, innovación y competitividad industrial: Un análisis para la Unión Europea*. *Economía Industrial* 313, pp. 129–140.
- [25] Kotler, P. (2003). *Marketing Management*. New York: Prentice Hall.
- [26] Kotsemir, M., Abroskin, A. & Meissner, D. (2013). *Innovation concepts and typology—an evolutionary discussion*. Higher School of Economics Research Paper WP BRP. 5.
- [27] Solow, R. (2013). *Technical Change and the Aggregate Production Function*. *The Review of Economics and Statistics* 39(3), pp. 312–320.
- [28] Marins, L., Anlló, G. & Schaaper, M. (2013). *Estadísticas de innovación: el desafío de la comparabilidad*. En RICYT (Eds.), *El Estado de la Ciencia 2012* (pp. 65-79). Buenos Aires, Argentina.
- [29] Baptista, M. (2004). *Indicadores de innovación en Uruguay (1998-2000): Balance metodológico y principales resultados empíricos*. *Revista CTS* 2(1), pp. 167-186.
- [30] Becheikh, N., Landry, R. & Amara, N. (2006). *Les facteurs stratégiques affectant l'innovation technologique dans les PME manufacturières*. *Canadian J. of Administrative Sciences* 23(4), pp. 275–300.
- [31] Torres, E. (2007). *La gerencia emprendedora innovadora como catalizador del emprendimiento económico*. *Revista de Ciencias Sociales*, 13(3), pp. 495-505.
- [32] Wang, C., Lu, I. & Chen, C. (2008). *Evaluating firm technological innovation capability under uncertainty*. *Technovation* 28(6), pp. 349–363.
- [33] Wu, B. & Chen, J. (2010). *Definition, configuration and evaluation of Technology Innovation Capability in Open Innovation paradigm*. In *Proceedings International Conference of Management, Innovation and Technology* (pp. 731–736). Singapore.
- [34] Ahn, K. (2010). *The Relationship Between Learning Orientation and Incremental Innovation, and the Moderating Effect of Tenure*. *Journal of the Korea Safety Management and Science* 12(3), pp. 249–255.
- [35] Jaramillo, H., Lugones, G. & Salazar, M. (200). *Manual de Bogotá: normalización de indicadores de innovación tecnológica en América Latina y el Caribe*. Bogotá: RICYT.
- [36] Anlló, G., Suárez, D. & de Angelis, Y. (2009). *Indicadores de innovación en América Latina: Diez años del manual de Bogotá*. En RICYT (Eds.), *El Estado de la Ciencia 2008* (pp. 91-141). Buenos Aires, Argentina.
- [37] Schwab, K. (2013). *The Global Competitiveness Report 2013–2014*. World Economic Forum. Cologny, Alegre, J., Lapiedra, R. & Chiva, R. (2006). *A measurement scale for product innovation performance*. *European Journal of Innovation Management* 9(4), pp. 333–346.
- [38] Blindenbach, F. & Ende, J. (2010). *Subjective Performance Assessment of Innovation Projects*. *Journal of Product Innovation Management* 27(4), pp. 572–592.
- [39] Cooper, R. & Kleinschmidt, E. (1995). *Performance typologies of new product projects*. *Industrial Marketing Management* 24(5), pp. 439–456.
- [40] Griffin, A. & Page, A. (1996). *PDMA success measurement project: recommended measures for product development success and failure*. *Journal of Product Innovation Management* 13(6), pp. 478–496.
- [41] Hsu, Y. & Fang, W. (2009). *Intellectual capital and new product development performance: The mediating role of organizational learning capability*. *Tech. Forec. and Social Change* 76(5), 664–677.
- [42] Storey, C. & Easingwood, C. (1999). *Types of new product performance: Evidence from the consumer financial services sector*. *Journal of Business Research* 46(2), pp. 193–203.
- [43] Hannachi, Y. (2015). *Development and Validation of a Measure for Product Innovation Performance: The PIP Scale*. *Journal of Business Studies Quarterly* 6(3), pp. 23-35.
- [44] Alegre, J., Lapiedra, R. & Chiva, R. (2006). *A measurement scale for product innovation performance*. *European Journal of Innovation Management* 9(4), 333–346.
- [45] Evanschitzky, H. et al. (2012). *Success Factors of Product Innovation: An Updated Meta-Analysis*. *Journal of Product Innovation Management* 29(Supplement S1), pp. 21–37.

- [46] García, F.; Pelechano, E. & Navas, J. (2011). [El desarrollo de innovaciones tecnológicas estratégicas: el efecto mediador de la complejidad en el sector de la biotecnología en España](#). *Revista Europea de Dirección y Economía de la Empresa* 20(2), pp. 35-52.
- [47] Londoño, A. (2012). [Reconversión Industrial en Antioquia y Políticas para su promoción](#). *Revista Antioqueña de Economía Y Desarrollo* 5, pp. 29-54.
- [48] Banco Mundial (2006). [Informe sobre el desarrollo mundial 2007. El desarrollo y la próxima generación](#). Banco Mundial.
- [49] Aberdeen, T. (2013). [Review Essay: Yin, RK \(2009\). Case study research: Design and methods](#). Thousand Oaks, CA: Sage. *The Canadian Journal of Action Research* 14(1), pp. 69-71.
- [50] Yacuzzi, E. (2005). [El estudio de caso como metodología de investigación: Teoría, mecanismos causales, validación](#). Serie Documentos de Trabajo 296, pp. 1-37. Universidad del CEMA.
- [51] Hannachi, Y. (2015). [Development and Validation of a Measure for Product Innovation Performance: The PIP Scale](#). *Journal of Business Studies Quarterly* 6(3), pp. 23-35.
- [52] Yin, R. (2014). [Case study research: Design and methods](#). USA: SAGE Publications.
- [53] Eisenhardt, K. (1989). [Building Theories from Case Study Research](#). *Academy of Management Review* 14(4), pp. 532-550.
- [54] Martínez, P. (2006). [El método de estudio de caso: Estrategia metodológica de la investigación científica](#). *Pensamiento Y Gestión* 20, pp. 165-193.
- [55] Fernández, L. (2006). [¿Cómo analizar datos cualitativos?](#) *Bulletí LaRecerca*. Universidad de Barcelona.
- [56] Strauss, A. & Corbin, J. (1998). [Basics of qualitative research: techniques and procedures for developing grounded theory](#). USA: SAGE Publications.
- [57] Easterby, M., Thorpe, R. & Jackson, P. (2012). [Management Research](#). USA: SAGE Publications.
- [58] Glaser, B. & Strauss, A. (1967). [The discovery of grounded theory: Strategies for qualitative research](#). Boston: Aldine Publishing Company.
- [59] Cepeda, G. (2006). [La calidad en los métodos de investigación cualitativa: principios de aplicación práctica para estudios de casos](#). *Cuadernos de Economía y Dirección de la Empresa* 29, pp. 57-82.

25. Selección e implementación de un prototipo de estación meteorológica aplicando IoT y herramientas Google

Ángel Rodríguez
John Figueredo

Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Colombia

1. Introducción

Actualmente, los sistemas para el diseño electrónico progresan rápidamente desde la época de la invención del transistor (1947), cuando se cimentaron las bases de la electrónica moderna, generando la posibilidad de miniaturizar los diseños, incluyendo un bajo costo y consumo energético [1]. Además, esta invención generó el desarrollo de circuitos integrados, el microprocesador y los microcontroladores, considerados como las bases de muchos sistemas embebidos en diseño y prototipado electrónico.

Desde la aparición del primer microprocesador (Intel 4004) en 1971, se han fabricado diversos modelos que han mejorado la capacidad de procesamiento de instrucciones por segundo y de almacenamiento [2]. Estos dispositivos proporcionaron un punto de partida a lo que hoy se conoce como microcontroladores, que, básicamente, son un sistema computacional de baja escala inmerso dentro de un *chip*. Los sistemas micro-controlados brindaron la oportunidad de producir desarrollos de bajo costo, tales como electrodomésticos, aplicaciones electrónicas de baja complejidad y controladores de sistemas computacionales. La forma de programar estos dispositivos se basaba en un lenguaje de bajo nivel o máquina, que se constituía de un conjunto de instrucciones complejas, además, los programadores tenían que estudiar la estructura interna (*hardware*) del microcontrolador.

Posteriormente, a inicios del 2000, se empezó a desarrollar software que programara estos dispositivos de manera más fácil. La función principal de este *software* era programar los dispositivos con un lenguaje más parecido al humano. De esta manera se tomó como referencia el lenguaje Basic y C, que ya se habían utilizado en los Computadores [3], lo que facilitó su uso para programar estos dispositivos. Los lenguajes de programación de alto nivel, desarrollados por las empresas, se ligaron a algún tipo de licenciamiento, debido a que era necesario adquirir un *hardware* (tarjeta embebida) de la empresa que desarrollaba el software, u obtener una licencia para programar un microcontrolador específico, situación que provocó que no estuvieran al alcance de todos los estudiantes y programadores [4].

En 2005 Banzhi [5] se propuso cambiar esta situación mediante el desarrollo de cursos para tipo de persona. Su objetivo era lograr que cualquier persona, sin muchos conocimientos en electrónica, lograra llevar a cabo sus diseños. Esta idea se convirtió en lo que hoy se conoce como Arduino, una plataforma de creación de prototipos de código abierto fundamentada en el fácil uso de *hardware* y *software*, capaz de leer y escribir datos en un microcontrolador, basados en *hardware* de bajo costo y accesible casi para cualquier persona. Además, cuenta con una comunidad *online* que permite reutilizar código abierto de otros desarrolladores [6].

Hoy existe un amplio número de dispositivos, tarjetas y/o lenguajes de programación que adoptaron esta nueva tendencia para programar los sistemas embebidos. Por lo que es menos frecuente encontrar programación y diseño de *hardware* directamente sobre un microcontrolador, mientras que los diseños realizados bajo sistemas Arduino o

compatibles con Arduino en estudiantes, ingenieros y aficionados a la electrónica y sistemas computacionales, crece ampliamente.

Por otro lado, los sistemas compatibles con Arduino se han incrementado, debido a la necesidad de ofrecer herramientas similares de diseño y programación para evitar ser rezagadas con esta nueva tecnología. Parte de estos desarrollos lo logró la empresa Particle, que creó un sistema embebido compatible con Arduino, pero enfocado hacia el Internet de las Cosas (IoT), un concepto que se originó en el MIT [7] cuando se investigaba la identificación por radiofrecuencia en red (RFID) que les permitía a los objetos conectarse e intercambiar datos y tecnologías de detección por sensores. IoT también permite tener personas, animales y objetos conectados mediante un identificador único, con el fin de tomar los datos, transferirlos y almacenarlos en tiempo real en la web, con el fin de controlarlos de forma inteligente y eficientemente.

Particle diseño un sistema embebido, llamado Spark Core, que consiste de una tarjeta de bajo costo capaz de conectarse y programarse directamente desde internet, sin la necesidad de una conexión física con un computador y aplicando la interconectividad de los diseños de *hardware* similares a Arduino, pero con la posibilidad de publicar datos a internet con su propia nube [8]. Actualmente, cuenta con su nuevo modelo Photon, que sustituyó la primera versión y que también se conecta por WiFi a internet, además, desarrolló un nuevo modelo (Electron) con características similares, pero su conexión a internet lo realiza mediante SimCard (Figura 1).

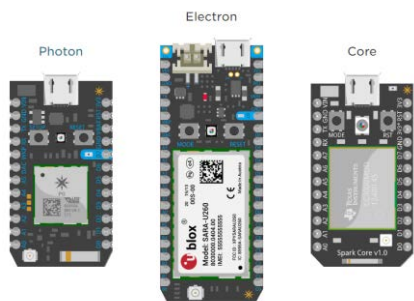


Figura 1. Tarjetas IoT de la empresa Particle [8]

La tarjeta analizada para el desarrollo del presente trabajo es la Spark Core o simplemente Core (Figura 2), porque se ajusta a los requerimientos de la estación.

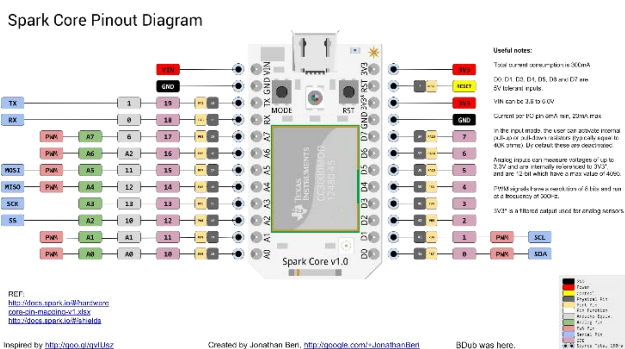


Figura 2. Diagrama de pines Spark Core

Esta tarjeta posee las siguientes características [9]: Procesador ARM 32-bit Cortex™-M3 CPU Core, Frecuencia de operación de 72Mhz, 128Kb de memoria Flash, 20Kb de SRAM, Conversor Análogo a Digital de 12 bits, interfaz USB, comunicación USART, SPI y I2C. Lo que la hace ideal como prototipo con opción de IoT y compatible con Arduino.

Además, cuenta con un total de 18 pines, de los cuales dispone de 8 puertos digitales I/O enumerados del D0 al D7 y 8 puertos analógicos enumerados del A0 al A7, Tx y Rx predeterminados para comunicación serial. Todos los puertos funcionan a 3.3v, menos los pines digitales que pueden admitir entradas de 5v [10].

2. Diseño de la estación meteorológica

2.1 Variables de medición

Las variables a medir en el prototipo de estación meteorológica se ajustaron de acuerdo con las variables de medición que poseen las estaciones comerciales. El primer prototipo de estación mide cerca del 80% de las variables que se encuentran en las comerciales [11], tales como temperatura ambiente, humedad relativa, índice UV, brillo solar, sensor de lluvia y captación de energía solar.

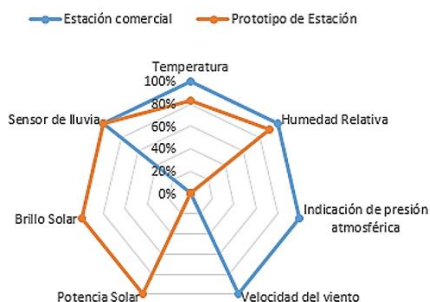


Figura 3. Comparativas estaciones meteorológicas

Las variables se capturan con sensores analógicos y digitales conectados a la tarjeta, que será la encargada de procesar la información de cada uno de ellos y publicarlos en la nube, para luego capturarlos mediante un *script* que permite la lectura de las variables y la publicación en una hoja de cálculo y que servirá como base de datos de la información recolectada. El prototipo de la estación meteorológica se instala en la UNAD CEAD de Acacias, departamento del Meta.

2.2 Diagrama de bloques de la estación meteorológica

El núcleo central lo compone la tarjeta Spark Core, encargada de recibir la información de los sensores, procesarla y, mediante una conexión WiFi, enviarla a la nube de Particle, para luego tomarla mediante la hoja de cálculo y publicarla en una página web. El diagrama de bloques del prototipo se muestra en la Figura 4.

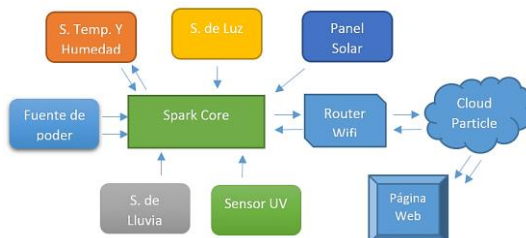


Figura 4. Diagrama de bloques de la estación meteorológica

2.3 Sensores utilizados

- *Sensor de temperatura y humedad.* El seleccionado para la estación es un DHT11 [10] (Figura 5), que tiene un rango de medición de temperatura de 0 a 50 °C, con tolerancia de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ y medición de humedad relativa 20-90%, con tolerancia de $\pm 5\%$.

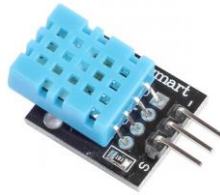


Figura 5. Sensor DHT11

- *Sensor de luz UV.* Es un módulo basado en el sensor S12SD UV [11] (Figura 6), que mide el índice UV en la escala de 0 a 11 y entrega una salida analógica.

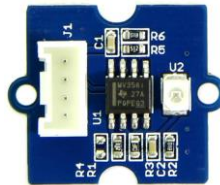


Figura 6. Sensor GUVVA-S12SD

- *Sensor de lluvia.* Es un sensor de tipo analógico [12] [Figura 7], que envía una señal comprendida entre 0V y 3,3V, con tolerancia del 5%, donde 0V indica que no hay agua y 3,3V indica presencia de agua al 100%.



Figura 7. Sensor de Lluvia

- *Sensor de brillo solar.* Consta de un módulo con una fotocelda [13] (Figura 8), que entrega un voltaje de salida de 0,2V a 3.3V, donde 0,2V es brillo solar al 100% y 3,3V 0% de brillo solar.



Figura 8. Sensor fotoresistivo

- *Sensor de potencia solar.* Este sensor se basa en un panel solar gama media de 18V y una potencia de 3W (Figura 9) que, en las pruebas preliminares, mostró una eficiencia del 75% de absorción de energía con respecto a uno de gama alta.

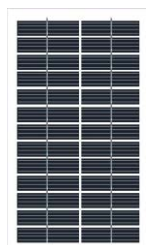


Figura 9. Panel solar

2.4 Prueba de los componentes

En el diseño se realizaron pruebas preliminares a cada uno de los sensores, para lo que fue necesario realizar un programa por cada componente, con el fin de hacer un seguimiento al comportamiento del sensor implementado y para verificar que cumplieran con los parámetros de medida proporcionados por el fabricante.

2.5 Diseño y prototipos

En esta fase se acoplaron cada uno de los componentes sobre un *protoboard*, con el objetivo de identificar posibles cambios y reconfiguración del *hardware*. Se espera que este sistema soporte las pruebas de muestreo a las que serpa sometido durante tres meses.

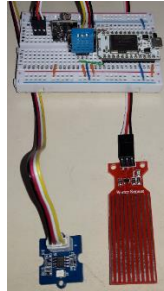


Figura 10. Pruebas sensores

2.6 Procesamiento de datos y Cloud Particle

Los datos capturados se procesaron individualmente, primero se realizaron los algoritmos de lectura de cada uno de los sensores y, posteriormente, debido a que las tecnologías IoT o las páginas web leen datos tipo *string*, se convirtió cada dato y se concatenaron en una sola variable, para poderlos enviar y cargar en la nube de Particle para su posterior procesamiento en la web. La tarjeta Core [14] se caracteriza por tener un identificador único en el mundo de la tarjeta en Cloud de Particle, con el propósito de mejorar la seguridad de la comunicación con cada uno de los dispositivos. Además, Cloud de Particle proporciona un *token* de autenticación que se asigna a cada tarjeta que se conecta a su red.

2.7 Integración de Cloud Particle y Google

Al verificar los datos en la nube, fue necesario integrar los datos con una interfaz web fácil de implementar. Primero se estudió la posibilidad de diseñar una base de datos en un servidor gratuito para evitar costos de almacenamiento. Pero, luego de realizar diferentes pruebas, se vio la posibilidad de utilizar las hojas de cálculo de Google Drive para almacenarla, conociendo de antemano que esta herramienta en línea permite realizar cálculos y gráficas, un entorno útil para graficar las variables del prototipo de la estación meteorológica.

Para integrar la nube y las hojas de cálculo, se utilizó el editor de secuencia de comandos de las mismas, debido a que es un entorno donde se puede programar líneas de código script [15]. En la hoja de cálculo se ejecutan los comandos y se cargan las variables en cada una de las celdas de forma automática, logrando el almacenamiento de ellas cada cinco minutos.

2.8 Procesamiento de datos y gráficos en Google Drive

Los datos adquiridos en la hoja de cálculo por medio del *script*, requieren una adaptación a gráficos, que le permita al usuario leer e interpretar los datos de la estación,

ya sea en tiempo real o revisando el histórico del comportamiento de la información. Para este caso se incluyeron gráficas tipo cronológico y con indicadores [16] (Figuras 11 y 12).



Figura 11. Gráfico cronológico

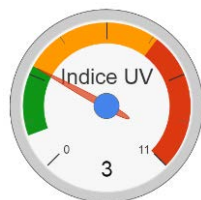


Figura 12. Gráfico con indicadores

2.9 Publicación de resultados en la Web

Las estaciones de meteorología convencionales proporcionan información sobre las variables climáticas que se presentan en su entorno, a su vez, estas variables son publicadas en una base de datos privada o pública para luego ser procesadas por el usuario final. En esta investigación, los datos pueden ser publicados en una página web de dominio público [17]. Para mayor facilidad e integración con la hoja de cálculo, se utilizó la herramienta Google Sites [18], lo que permitió realizar una página web gratuita, con algunas limitaciones, pero suficiente para los datos que se capturan con el prototipo de la estación meteorológica.

3. Prototipo de la estación meteorológica

El prototipo de la estación meteorológica se diseñó de acuerdo con la cantidad de variables a medir y se buscó la forma de integrar todos los componentes en un espacio reducido (Figura 13), para lograr su instalación en una caja pequeña que soportara la intemperie.

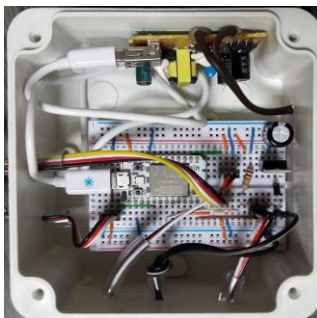


Figura 13. Prototipo de la estación meteorológica

El anclaje de la estación se realizó mediante un tubo metálico insertado en tierra, a una profundidad de 1m, que sobresale 2m del suelo (Figura 14). Este anclaje se hace necesario para darle firmeza a la estructura y evitar daños por condiciones climáticas adversas, tales como tormentas y vientos fuertes.



Figura 14. Instalación del prototipo

3.1 Ubicación del prototipo

El prototipo está ubicado en la UNAD, en el CEAD de Acacías, Meta (Figura 15). Esta ubicación es de importancia para la Universidad y para los habitantes del municipio, debido a que la estación queda visible a la comunidad académica, de forma que puedan observarla y motivarse a utilizar estas tecnologías en otros proyectos y/o investigaciones. Por otro lado, para los habitantes del municipio de Acacías la estación genera otra fuente de información meteorológica local, puesto que el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) tiene solamente una estación meteorológica para el municipio [19].

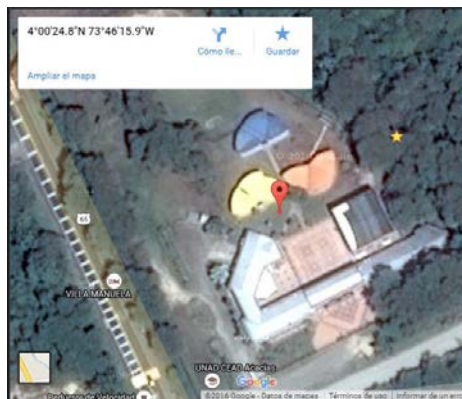


Figura 15. Ubicación del prototipo

3.2 Pruebas y funcionamiento en campo

Las pruebas de la estación se realizaron primero en el laboratorio del CEAD y se basaron en verificar los tipos de conexión de la tarjeta a la nube y en calibrar los diferentes sensores. Posteriormente, se realizaron las pruebas en campo de las mediciones, la conexión y la publicación en la web (Figura 16).



Figura 16. Prueba en campo

4. Resultados y análisis

4.1 Variables

Los datos obtenidos con el prototipo de la estación meteorológica y el sitio Weather.com (Tabla 1), presentan una variación cercana al 6% en humedad relativa y del 2% para la temperatura. Cabe resaltar que, para encontrar el error en la toma de datos, solamente se cuenta con una estación local instalada por el IDEAM y las lecturas de Satélite por Weather.com (Figura 17), lo que implica utilizar equipos móviles para recalibrar la temperatura y humedad de la estación.



Figura 17. Datos del sitio Weather.com

Tabla 1. Comparación datos Prototipo vs Weather.com

Variable	Prototipo	Weather.com
Fecha y hora	07/07/2016 9:07	07/07/2016 9:00
Brillo Solar	75 - (Nublado)	Nublado
Índice UV	4	4
Sensor de Lluvia	Lluvia moderada	Lluvia moderada
Panel Solar	14,05v	N/A
Temperatura	24°C	23°C
Humedad Relativa	91%	83%

4.2 Temperatura y humedad

Estos resultados están muy cercanos a los del sitio Weather.com, lo que implica que el grado de certeza de estos dos parámetros son adecuados para establecer una lectura real. En la Figura 18 se muestra la comparación entre la temperatura y la humedad, donde se puede apreciar que la humedad es alta en el municipio de Acacias: en días soleados cerca del 40%, en nublados cerca del 80% y en lluviosos supera el 90%. Adicionalmente, la temperatura máxima que se ha alcanzado es 32°C, comprendida entre la 1:30 pm y las 2:00 pm; en contraste, el nivel más bajo de temperatura ha sido de 20°C, comprendido entre las 4:00 am y las 6:00 am.

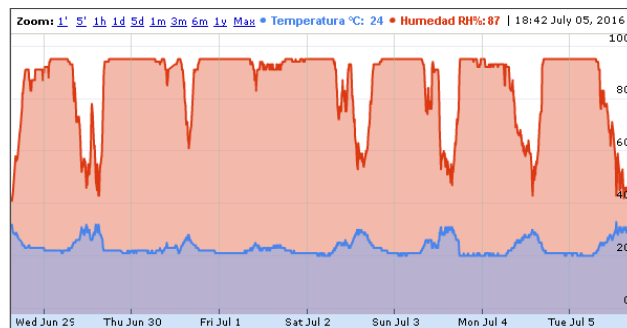


Figura 18. Medición temperatura y humedad [20]

4.3 Índice UV

Los resultados de este índice con el prototipo, comparados con la referencia Weather.com, están desfasados en +1 nivel, es decir, el registro del prototipo está por encima de Weather.com. Además, se evidencia que el índice de UV para el municipio de Acacías es alto (Figura 19): en días soleados y entre las 11:00 am y las 3:00 pm, el nivel se sitúa entre 7 y 9, lo que representa un alto riesgo para la salud [23].

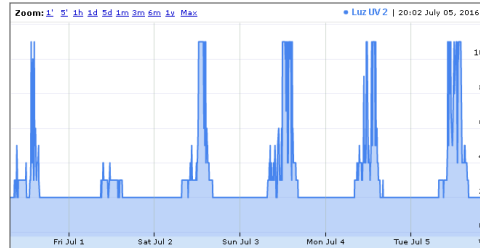


Figura 19. Medición índice UV

4.4 Brillo solar

El sensor de brillo solar indica la cantidad de luz presente en un momento determinado, pero no determina una potencia energética derivada del sol debido a que también captura los datos de luz artificial. El sensor complementa el análisis de datos en conjunto con el de potencia solar para futuras muestras, además, con este sensor se logra determinar la hora en que el sol sale y se pone en el municipio, obteniendo para el mes de junio en promedio las 5:47 am y las 6:10 pm (Figura 20).

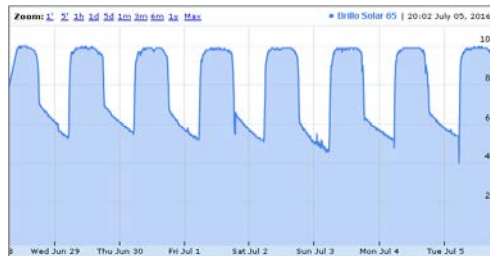


Figura 20. Medición brillo solar

4.5 Potencia solar

Los resultados obtenidos con el panel solar se procesaron para determinar la potencia solar media en el municipio. Este panel funciona dentro de la estación meteorológica como un sensor e indica la potencia en vatios durante el día solar. A partir de esta medición se puede establecer una potencia solar derivada del voltaje medido sobre una resistencia de 10Ω , para lo cual se realizaron los cálculos de potencia ($P=V^2/R$), obteniendo que la máxima en un día soleado se obtiene en las horas comprendidas entre las 10:45 am y las 2:40 pm (Figura 21).



Figura 21. Medición potencia solar

4.6 Lluvia

Estos resultados presentan irregularidades debido a que es necesario recalibrar la inclinación del sensor, debido a que captura datos cuando inicia la lluvia, pero cuando deja de llover el tiempo de asentamiento es demasiado alto, cerca de 2 horas, para retornar a su valor de normalidad. Por otra parte, en el muestreo realizado se observa que se presenta un periodo de lluvias frecuentes (Figura 22), en concordancia con la época de invierno que se presenta en el mes de junio en el municipio de Acacías.



Figura 22. Medición sensor de lluvia

4.7 Conectividad

La conectividad del prototipo con el Cloud Particle depende de la disponibilidad del servicio de conexión de internet y la tarjeta Core. Actualmente, la estación cuenta con internet propio de 1Gb por conexión inalámbrica a la red celular, a través de un dispositivo MiFi. Las pruebas de latencia y conectividad son de 95% en un periodo de 24 horas, con condiciones climáticas óptimas (días soleados, sin lluvia) (Tabla 2), pero, cuando se presentan lluvias, disminuye a 85% (Tabla 3). Esta estadística se obtuvo de acuerdo con los errores presentados por el script para la captura de los datos.

Tabla 2. Errores de conexión día sin lluvia

Mensaje de error	Recuento
Acción no permitida	1
Error en la solicitud para el código devuelto 404 de https://api.spark.io/v1/devices/.../result?access_token=... Respuesta del servidor truncada: { "ok": false, "error": "Problem requesting variable: Timed out" } (usar la opción muteHttpExceptions para examinar toda la respuesta) (línea 4, archivo "Código")	4
Error en la solicitud para el código devuelto 408 de https://api.spark.io/v1/devices/.../result?access_token=... Respuesta del servidor truncada: { "error": "Timed out." } (usar la opción muteHttpExceptions para examinar toda la respuesta) (línea 4, archivo "Código")	35

Tabla 3. Errores de conexión día con lluvia

Mensaje de error	Recuento
El servicio ha utilizado demasiado tiempo del equipo durante un día.	40
Error en la solicitud para el código devuelto 408 de https://api.spark.io/v1/devices/.../result?access_token=... Respuesta del servidor truncada: { "error": "Timed out." } (usar la opción muteHttpExceptions para examinar toda la respuesta) (línea 4, archivo "Código")	196

4.8 Sitio Web

El sitio no presentó mayores inconvenientes en el diseño, ni al añadir las gráficas de las variables, porque se actualiza de acuerdo con la base de datos (Figura 23), además, la presentación de las gráficas con indicadores y cronológicas se actualizan correctamente cuando se visualizan en un computador (Figura 24). Pero se presenta un inconveniente al realizar las consultas en equipos móviles, tales como tabletas o teléfonos, porque las

gráficas cronológicas no cargan debido a la falta de complementos. Esto identifica la necesidad de diseñar una *app* para visualizar correctamente los resultados en estos dispositivos.

Datos Estación Meteorologica UNAD							
Fecha							
A	B	C	D	E	F	G	
1	Fecha	Brillo Solar	Luz UV	Sensor Lluvia	Panel Solar (V)	Temperatura °C	Humedad RH%
2	24/06/2016 15:48:00	74	3	0	0.42	28	65
3	24/06/2016 15:48:33	73	3	0	0.39	27	65
4	24/06/2016 15:49:30	73	3	0	0.40	27	65
5	24/06/2016 15:50:30	73	3	0	0.40	27	65
6	24/06/2016 15:51:30	73	3	0	0.40	27	65
7	24/06/2016 15:52:29	73	3	0	0.40	26	66
8	24/06/2016 15:53:29	74	3	0	0.42	26	67
9	24/06/2016 15:54:30	74	3	0	0.40	26	68
10	24/06/2016 15:55:30	74	3	0	0.40	26	68
11	24/06/2016 15:56:29	74	3	0	0.40	26	69

Figura 23. Datos hoja de cálculo



Figura 24. Imagen página Web

Los resultados obtenidos de cada una de las variables del prototipo son satisfactorios (<https://sites.google.com/site/climaacacias/>). La que presentó mayor dificultad en la captura de los datos fue la conectividad del sistema, debido a que los datos de cada una de las variables se transmiten a través de la conexión a internet de la tarjeta Core. Los sensores del prototipo de la estación meteorológica ofrecen lecturas con las tolerancias y errores relacionadas por el fabricante; las comparaciones con estaciones locales presentan alta incertidumbre, debido a que el IDEAM proporciona una medición de cerca de 2Km de distancia, mientras que Weather.com las realiza satelitalmente cada hora.

5. Conclusiones

Las variables de medición que se trabajaron en la estación meteorológica necesitan ajustarse con un elemento patrón, para realizar las correcciones de cada lectura de los sensores, generar datos con un valor de certeza y proveerlos a la comunidad del municipio de Acacias para su análisis.

La puesta en marcha de este prototipo demostró la necesidad de hacer ajustes a los parámetros de medición, tanto en sensores como en comunicación; además, abre las puertas para realizar una segunda versión que permita guardar datos en el sitio y que sea autosuficiente energéticamente, para no depender de la red eléctrica.

Los sistemas de bajo costo como Particle y Arduino proporcionan a pequeños investigadores grandes herramientas para desarrollar sus prototipos y generar nuevas ideas de negocio, que se pueden implementar en diferentes regiones para tecnificar sus procesos.

Google ha demostrado una alta integración de sistemas, que puede ser aprovechada por las personas sin necesidad de conocimientos especializados en programación, por tal motivo se debe intensificar en las universidades el uso de estas herramientas para la gestión académica e investigativa.

El diseño del prototipo permitió incentivar la investigación en la comunidad de la UNAD, lo mismo que para aplicar nuevas tecnologías, puesto que los estudiantes se acercan preguntando sobre el proyecto mostrando interés en participar y lo conciben como opción de trabajo de grado.

El desarrollo de este proyecto permite visibilizar y proyectar nuevas investigaciones enfocadas en el tema de IoT y telemetría de datos, en procesos productivos de automatización al alcance de pequeñas y medianas empresas.

Se hace necesario integrar las variables con aplicativos móviles, para mejorar la visualización de los resultados entre pequeños productores, campesinos y agricultores, y para consultar los datos que arroja la estación meteorológica. De esta manera se puede aprovechar las ventajas que ofrecen estas tecnologías para monitorear suelos, animales, cultivos y todo tipo de actividades en el campo.

Referencias

- [1] Brinkman, W., Haggan, D. & Troutman, W. (1997). [A history of the invention of the transistor and where it will lead us](#). IEEE Journal of Solid-State Circuits 32(12), pp. 1858-1865.
- [2] Alcalde, P. (2016). [Electrónica Aplicada](#). Madrid: Ediciones Paraninfo.
- [3] Verle, M. (2009). [Microcontroladores PIC - Programación en C con ejemplos](#). Belgrade: MikroElektronika.
- [4] [Arduino](#). Online [Jun 2016].
- [5] Severance, C. (2014). [Massimo Banzi: Building Arduino](#). Computer 1, pp. 11-12.
- [6] [What is Arduino?](#) Online [Jun 2016].
- [7] Evans, D. (2011). [Internet de las cosas](#). Informe técnico Cisco.
- [8] [Particle](#). Online [May 2016].
- [9] Particle. [Spark Core Datasheet](#). Online [May 2016].
- [10] [Pins and I/O](#). Particle. Online [Jun 2016].
- [11] D-Robotics (2010). [DHT11 Temperature & Humidity Sensor](#). Online [Jun 2016].
- [12] Roithner LaserTechnik (2011). [GUVA-S12SD](#). Online [May 2016].
- [13] DIY Robot KEYES. [Water Sensor Module](#). Online [Feb 2016].
- [14] Semba Optical. [GL55 Series Photoresistor](#). Online [Apr 2016].
- [15] [Particle Cloud API](#). Online [May 2016].
- [16] Google. [Calendar Service](#). Online [May 2016].
- [17] Google. [Tipos de gráfico](#). Online [Feb 2016].
- [18] Google. [Cómo insertar un gráfico en un sitio web](#). [Jun 2016].
- [19] Google. [Google Sites makes creating and sharing a group website easy](#). [Apr 2016].
- [20] IDEAM. Online [Jun 2016].
- [21] [Clima Acacias](#). Online [Jun 2016].
- [22] OMS (2003). [Índice UV solar mundial: Guía práctica](#). Ginebra: OMS.

26. Diseño e implementación de un sistema de seguridad inalámbrico para la protección en instalaciones civiles y militares

Ingris Monterrosa G.

Laura Martínez M.

German Goez S.

Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín, Colombia

1. Introducción

El continuo avance de la ciencia y la tecnología en el entorno industrial ha generado cambios notables en los últimos siglos, conllevando a un sinnúmero de innovaciones, entre las que se encuentra las redes de sensores inalámbricos. Estas redes están conformadas por dispositivos llamados nodos cuya función es monitorear condiciones físicas o ambientales de forma rápida, flexible y autónoma [1]. Además, han sido utilizados durante mucho tiempo para dar alertas tempranas con precisión constante capturando y disseminando datos.

Fueron desarrollados originariamente en la Universidad de California, en Berkeley, denominándolos Mica [2]. El desarrollo por esta tecnología ha sido formidable a partir de 1998 con el proyecto Smartdust, que se presentaba como una tecnología emergente conformada por un pequeño computador, una fuente de energía, sensores y un sistema de comunicación. El objetivo era desarrollar la tecnología que cupieran en un milímetro cúbico de volumen. Al finalizar el proyecto no se alcanzó la meta mencionada, pero sirvió como catalizador para innumerables trabajos sobre el tema en todo el mundo.

Los primeros escenarios donde se utilizaron las redes de sensores fueron los ambientes militares [3], donde las investigaciones comenzaron alrededor de 1980 con el proyecto de las redes de sensores distribuidos (DSN), de Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). Esta área es de interés militar debido a que la detección distribuida tiene la ventaja de proporcionar información redundante y, por lo tanto, fiable acerca de las amenazas, así como la capacidad de localizar la ubicación de las mismas. En campos no-militares también se tienen importantes desarrollos, como el proyecto Landslide Detection [4], una aplicación de sensores para la detección y predicción de posibles deslizamientos de tierra, sobre todo en situaciones climáticas de intensas lluvias y nieve derretida. Otro proyecto complementario es Forest Fire Detection [4], dirigido hacia la aplicación de sensores en el monitoreo de incendios forestales. Este tipo de aplicaciones pone como una alternativa viable a los sensores en la prevención y manejo de accidentes causado por el hombre o fenómenos ambientales.

Teniendo en cuenta lo anterior y la expansión de las grandes plataformas industriales y, en muchos casos, su migración a zonas rurales, se ha generado la necesidad de diseñar sistemas más avanzados para mantener la seguridad en zonas determinadas, que complementen los existentes y buscando dar solución a diferentes amenazas. Para esto las redes de sensores han sido una buena alternativa y han ganado un espacio, no sólo en la industria y la domótica, sino también en campos tan diversos como el militar. No obstante, un sensor se vuelve inútil en ausencia de energía y es incapaz de contribuir a la utilidad de la red como un grupo. Por tanto, se hacen grandes esfuerzos en la búsqueda de fuentes de energía renovables o en el diseño de sistemas electrónicos que presenten baja demanda de corriente.

De acuerdo con este panorama, es evidente que la detección de intrusiones se vuelve más complicada en redes de sensores ubicadas en lugares con ambientes hostiles, dado

que el consumo de energía determina la vida de estos y, por lo tanto, la estabilidad de la red [5]. Por eso es importante desarrollar un sistema de redes de sensores que pueda enrutarse y comunicarse entre sí, sin tener que instalar amplias longitudes de cable explorando fuentes alternativas para la generación de energía, en lugar de la electrónica convencional que opera en una fuente de alimentación limitada como las baterías, o sistemas de alimentación por cable.

Como un aporte en este sentido, en este trabajo se presenta un marco teórico sobre las redes de sensores inalámbricos, seguido del diseño de la red y la propuesta metodológica para la implementación de una red de sensores con una fuente de energía alternativa, con el objetivo de garantizar la seguridad en zonas determinadas en ambientes hostiles. Al final se presentan los resultados y el análisis, acompañados de las conclusiones.

2. Sistema distribuido de sensores propuesto

El sistema propuesto en esta implementación para la protección de una zona geográfica específica, con el objetivo de prevenir intrusiones, como un sistema de alerta temprana, se basa en una red distribuida de sensores de presencia asociados a un sistema de comunicación. El sistema distribuido usa una topología de red híbrida, que facilita la versatilidad requerida, ajustándose a las necesidades del terreno y a las pérdidas propias de zonas hostiles para la radio propagación. La red cuenta con un coordinador central, que recibe toda la información de la red, y se complementa con un sistema de posicionamiento global (GPS), que permite distribuir de forma uniforme los sensores y garantiza que no se generen puntos muertos. En la Figura 1 se muestra la distribución de la red.

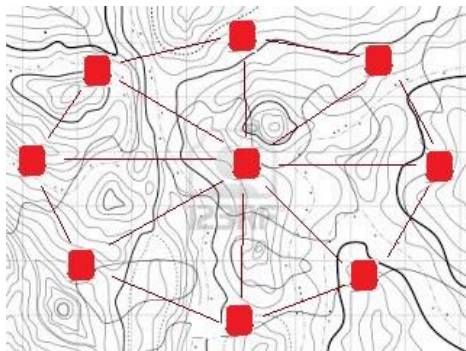


Figura 1. Red de sensores con topología híbrida

2.1 Redes de sensores basados en el estándar 802.15.4

Las redes de sensores basadas en el estándar 802.15.4 son redes que, por su estructura, facilitan la intercomunicación de diferentes sensores. Permitiendo enlazar hasta 65.535 dispositivos en red, además de facilitar la gestión de cada uno de los dispositivos inalámbricos de forma remota.

2.2 Topologías de red soportadas por en el estándar 802.15.4

La topología de red es una de las condiciones principales que se deben tener en cuenta, ya que de ella dependerá un mejor aprovechamiento de la red de sensores, pero, antes de describir las topologías, es importante aclarar que en esta tecnología *zigbee* existen tres dispositivos diferentes: coordinador, *router* y dispositivo final, siendo el primero el encargado de inicializar la red, gestionar la seguridad y controlarla. El *router* se encarga de extender las rutas y, de ser necesario, trazar nuevas; y el dispositivo final es el que permite enviar y recibir datos, pero no tiene ninguna función de encaminamiento.

Teniendo claridad en lo anterior a continuación se describen tres topologías de red soportadas por el estándar 802.15.4 (Figura 2):

1. Estrella. Este tipo de red se compone de un Flange Focal Distance (FFD), que funciona como coordinador, y varios FFD o Radio Frequency IDentification (RFD), que funcionan como dispositivos finales, directamente conectados al coordinador para establecer la comunicación entre los dispositivos finales. Una dificultad de esta red es que su expansión se limita al rango de alcance del coordinador.
2. Malla. En esta topología se puede establecer conexión entre cualquier par de nodos, porque la función del coordinador la realiza el primer *router* que forma parte de la red, además, su fiabilidad es mayor debido a que no depende de un único dispositivo.
3. Árbol. Esta topología se organiza por una estructura jerárquica.

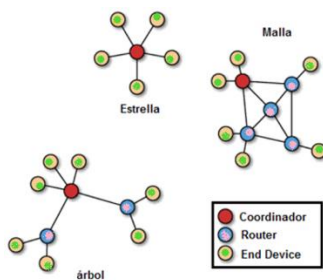


Figura 2. Topologías de red del protocolo 802.15.4 [6]

2.3 Geolocalización de la red de sensores usando GPS

El sistema de posicionamiento global es una herramienta tecnológica ampliamente usada en la localización espacial en el planeta. Funciona mediante una red de 24 satélites en órbita a 22.000 km de altura, con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie de la tierra. El uso de esta tecnología para el posicionamiento de los sensores permite establecer un sistema distribuido, en función de cubrir eficientemente la totalidad del terreno a monitorear en busca de presencias indeseadas.

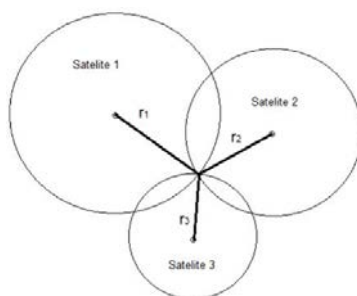


Figura 3. Red de satélites que conforman el sistema de posicionamiento global [7]

2.4 Protocolo de monitoreo de la red de sensores

El estándar IEEE 802.15.4 tiene dos modos de operación: Transparente (AT) y Application Programming Interface (API). La diferencia entre ellos radica en que en modo AT, por cada *byte* enviado se adiciona toda la trama de control necesaria para enrutarlo. Es decir, por cada uno de carga útil, se envían diecisiete de control, lo que se traduce en una eficiencia del 5.8%. Además, en este modo no se tiene control de la red. En el modo API, por cada cadena de datos de control se pueden enviar hasta ciento cuatro *bytes* de información en la carga útil. Además, se tiene control de la red y confirmación de entrega de la información. La trama API se muestra en la Figura 4.

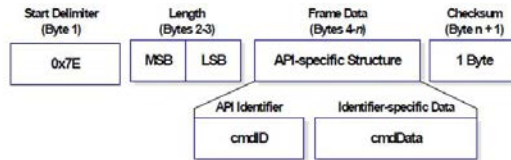


Figura 4. Trama Api [8]

1. Delimitador de inicio. Indica cuando inicia el *frame*.
2. Longitud del *frame*. Indican el número de bytes que se tienen en cuenta para calcular el *checksum*.
3. Datos del *frame*. Especifica la estructura de la trama.
4. *Checksum*. Suma de verificación para control de redundancia, con la cual el modo API protege la integridad de los datos, verificando que no hayan sido corruptos.

3. Diseño del dispositivo inalámbrico

El diseño de la red de sensores determina la presencia de intrusos en un área previamente determinada en ambientes hostiles. El área que se cubre depende del número de sensores que se instalen en la red, porque, debido a la topología que se utilizó, existe la posibilidad que se delimite un área extensa.

3.1 Sistema de carga por panel solar

Uno de los elementos que se utilizó fue la alimentación de la red de sensores por medio de una celda solar, que le brinda autonomía al circuito en cuanto a alimentación energética usando una alternativa. A su vez, la celda solar entrega la carga a una batería que define su capacidad como la cantidad de electricidad que puede proveer a la carga y depende de tres parámetros: 1) régimen de carga, 2) temperatura, y 3) tención final. El panel solar usado es de 2w y dimensiones 80x180 mm (Figura 5).



Figura 5. Panel solar

5. Voltaje típico: 5.5V
6. Corriente típica: 360 mA
7. Voltaje de circuito abierto: 8.2V
8. Máximo voltaje de carga: 6.4V

3.2 Sensor de presencia

Los sensores de presencia o de proximidad son elementos que transforman una señal física en señales eléctricas al detectar un cambio en la señal infrarroja. Deben ser ajustados para que detecten la señal del cuerpo de los seres humanos, porque todos los cuerpos emiten una señal infrarroja (con longitud de onda mayor a la luz visible), que aumenta a medida que lo hace la temperatura, en este proyecto se utilizaron sensores PIR (Figura 6). Este sensor utiliza un lente que se rige por el principio del lente de *fresnel*, que permite la convergencia de los rayos mediante una variación escalonada del ángulo de incidencia del rayo en la superficie, pero conservando el principio de la refracción.

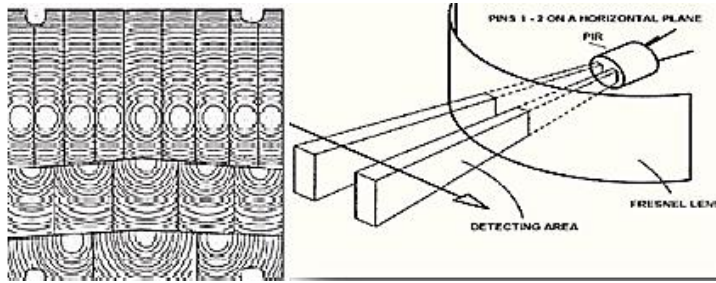


Figura 6. Lentes de fresnel sensor PIR [9]

Con la ecuación (1) se calcula la cobertura del sensor.

$$\cos \phi = \frac{\text{cateto adyacente}}{\text{hipotenusa}} \quad (1)$$

Donde ϕ será el ángulo que proporciona la vista lateral o la vista frontal. Además, tiene dos potenciómetros que permiten ajustar el tiempo entre las mediciones y el ajuste de la sensibilidad de medición, acompañados de tres pines que corresponden a Vcc, señal y GND, respectivamente.

3.3 Dispositivo electrónico, gestión y control de las comunicaciones

Utilizando dispositivos electrónicos, se diseña e implementa un prototipo de red inalámbrica para emitir una alerta temprana ante la presencia de intrusos en áreas hostiles. Estos dispositivos procesan la información, entre los que se cuenta Arduino FIO, que facilita la conexión con los sensores PIR en cada nodo sensorial, enviando los datos adquiridos a través de los módulos inalámbricos Zigbee a la estación base, con la capacidad de monitorear cada nodo sensor e interpretar las señales de los sensores asociados. El módulo microcontrolador usado se muestra en la Figura 7 y sus características se describen en la Tabla 1 [10].

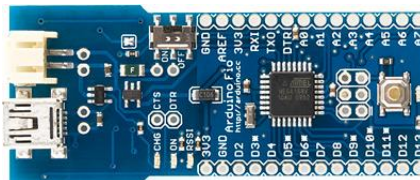


Figura 7. Módulo Arduino FIO utilizado

Tabla 1. Características del Arduino Fio

Microcontrolador	ATmega328P
Tensión de funcionamiento	3.3V
Voltaje de entrada	3.35 -12 V
Voltaje de entrada de carga	3,7-7 V
E/S digitales prendedores	14 (6 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógica	8
Corriente continua para Pin I/O	40 mA
Memoria flash	32 KB (2 KB utilizados por el gestor de arranque)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidad de reloj	8 MHz
Anchura	28 mm
Longitud	65 mm
Peso	9 g

4. Resultados y análisis

4.1 Integración del circuito

El circuito que se muestra en la Figura 8 y es una representación general del sistema integrado final. Se identifica la etapa de carga por panel solar, el sistema micro-controlado encargado de la gestión del dispositivo y se complementa por el sensor de presencia PIR encargado de la detección y, por medio del pin 2 (DOUT), recibir la secuencia de datos [11].

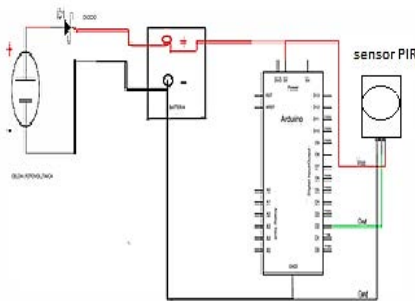


Figura 8. Circuito base de una estación de la red de sensores

4.2 Diseño del protocolo de gestión de información

El protocolo de gestión de información se diseñó para ser enviado al campo de carga útil bajo el modo de operación API. En el campo de la carga útil se envía la información concerniente a los sensores y al estado en general de los dispositivos electrónicos asociados. El protocolo de información de la red se compone de las siguientes tramas:

1. Nivel de energía o carga de la batería <NE>. Mensaje que identifica el nivel de energía y que contiene los campos de la Tabla 2.

Tabla 2. Nivel de energía

Posición	Función
<1>	Régimen de carga o velocidad a la que se descarga
<2>	temperatura
<3>	Tensión de la batería

2. Presencia de intruso <PI>. Contenido de mensaje que identifica presencia de intruso, cuyas posiciones se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Presencia de intruso

Posición	Función
<1>	1 = Presencia 0 = No presencia
<2>	Posición del sensor, latitud
<3>	Posición del sensor, longitud

3. Calidad de enlace <CE>. Trama con los valores de la Tabla 4.

Tabla 4. Calidad del enlace del sensor

Posición	Función
<1>	Perdida de paquetes
<2>	Latencia
<3>	Potencia de la última trama recibida
<4>	Tasa de error

El protocolo para gestionar la información de la red permitió optimizar la carga útil que se envía. Los resultados son satisfactorios porque la red demuestra estabilidad, baja latencia y todos los paquetes enviados fueron entregados. Una de las pruebas consistió en alejar uno de los dispositivos, obligando a que el sensor se deba asociar a uno de los módulos *router* de la red. El resultado mostro la versatilidad de las redes Zigbee en la gestión de los dispositivos que necesitan ser enrutados sin perder la asociación con la red. En consecuencia, se comprueba que es posible instalar sensores alejados en zonas montañosas y selváticas y que, mientras puedan recibir señal de cualquier dispositivo de la red, podrán seguir operando.

4.3 Autonomía del dispositivo por carga y descarga de la batería

Actualmente se utilizan las baterías de litio porque no requieren mantenimiento y tienen un tiempo de vida útil hasta de 10 años sin derrames ni emisión de gases, además, es importante resaltar que, ante las características de los ambientes hostiles de este trabajo, las baterías de litio ofrecen grandes ventajas porque pueden operar en temperaturas altas y bajas, sin que exploten o sufran fallas en su funcionamiento.

Adicionalmente, el material que compone estas baterías permite cargarlas y consumir la energía al tiempo. Como resultado, cada uno de los dispositivos, denominados como sensores inalámbricos, pudo operar en el día mientras cargaba la batería de respaldo y funcionar durante la noche con la carga almacenada. Con el fin de aumentar el tiempo en el que la batería puede sostener el sensor inalámbrico funcionando sin recarga, se optó por establecer cada uno de los módulos en estado dormido. Solamente se activan para reportarse a la red o cuando se genera un evento externo, que lo excita y ocasiona que inicie la transmisión de un reporte de intruso.

5. Conclusiones

En este trabajo se propuso una red de sensores basada en el estándar IEEE 802.15.4, con el fin de proporcionar una geo-cerca de seguridad, en prevención del ingreso de intrusos. Para el diseño de la red sensores se usó una topología tipo *mesh*, que tiene la capacidad de servir como puente entre dispositivos alejados en la red y el dispositivo concentrador de la información.

Con el fin de dar autonomía energética a la red de sensores, a cada uno de los dispositivos se le instaló un sistema de carga por panel solar. Lo que permitió que cada uno de los sensores opere durante la noche y recargue en el día.

También es válido resaltar que con las redes de sensores inalámbricos se pude reducir la infraestructura cableada y electrónica tradicional, reduciendo espacios y costos; además, y luego de las pruebas de transmisión, se puede afirmar que la tasa de errores para un largo periodo de tiempo es baja, lo que la hace confiable la transmisión.

También se puede determinar que el entandar IEEE 802.15.4 (zigbee), ofrece ventajas importantes frente a otras tecnologías en las redes de sensores, porque tiene bajo consumo de energía al mantener dormidos a los nodos cuando no están transmitiendo, además, se encuentran tiene bajo costo en comparación con otras tecnologías.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el grupo de investigación Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales del Instituto Tecnológico Metropolitano, en el marco del proyecto de investigación P14208.

Referencias

- [1] Mourelle, A. (2011). [Detección y seguimiento de personas en entornos indoor empleando redes de sensores con tecnología imote](#). Trabajo de grado. Universidad Carlos III.
- [2] Lacey, A. & Wright, B. (2010). [Occupational employment projections to 2018](#). *Monthly Labor Review* (November), pp. 82-123.
- [3] Sosa, E. (2011). [Contribuciones al establecimiento de una red global de sensores inalámbricos interconectados](#). Disertación Doctoral. Universidad Nacional de la Plata.
- [4] Flores, E. (2012). [Redes de Sensores Inalámbricas Aplicado a la Medicina](#). Tesis de Maestría. Universidad de Cantabria.
- [5] Campaña, S. & Londoño, J. (2013). [Estudio de redes de sensores y aplicaciones orientadas a la recolección y análisis de señales biomédicas](#). *Gerencia Tecnológica Informática* 12(33), pp. 85-99.
- [6] Vera, C. et al. (2015). [Parámetros de configuración en módulos XBEE-PRO® S2B ZB para medición de variables ambientales](#). *Revista Tecnura* 19(45), pp. 141-158.
- [7] GPSTEC. [¿Qué es un GPS Tracker o Dispositivo Tracker de GPS?](#) Online [Feb 2016].
- [8] DIGI International. Online [Feb 2016].
- [9] Luis Llamas. [Ingeniería, Informática y Diseño](#). Online [Feb 2016].
- [10] Arduino. [Arduino Fio](#). Online [Feb 2016].
- [11] Kupwade P. et al (2013). [Wireless Sensor Network Security](#). In Vacca, J. (Ed.), *Computer and Information Security Handbook* (Chapter 16). USA: Morgan Kaufmann.

27. Análisis del desempeño de un sistema prototipo de identificación por radiofrecuencia para controlar el acceso de personal en la alcaldía de Popayán

**Yaneth López M.
Lucero Manquillo L.
Víctor Miramá P.**

Universidad del Cauca. Popayán, Colombia

1. Introducción

Actualmente, existen diversos sistemas de identificación entre los cuales el más utilizado es el código de barras, que se caracteriza por su corto alcance de lectura, baja capacidad, alta interacción humana, incapacidad para hacer lecturas simultáneas y la exigencia de visibilidad entre el código de barras y el lector. Esto lo hace ineficiente para aplicaciones donde se requiere lectura a mayor distancia, alto procesamiento de información con múltiples lecturas de manera simultánea y una mínima interacción humana. Estas limitaciones han forzado la búsqueda de tecnologías de identificación más eficientes, como Radio Frequency Identification (RFID). Esta tecnología ha motivado el desarrollo de un gran número de aplicaciones con funciones específicas, entre las que se cuenta la identificación de personas a través de credenciales con etiquetas RFID integradas [1].

Un caso particular, en el cual la implementación de esta tecnología puede mejorar el proceso de identificación de personal es en la alcaldía de Popayán. Este trabajo tiene como objetivo implementar un sistema RFID que permita hacer un reconocimiento rápido y preciso del personal que ingresa o sale de la alcaldía. En el proceso se requiere el análisis del desempeño del sistema, para definir los mejores parámetros de configuración y comparar el comportamiento de la tecnología RFID en otros escenarios.

2. Tecnología RFID

La Identificación por Radiofrecuencia es una tecnología que utiliza señales de radio para leer a distancia la información contenida en etiquetas en objetos, animales o personas, permitiendo su identificación. Para su funcionamiento requiere etiquetas pasivas, semi-activas o activas, un lector de etiquetas y un computador para observar y procesar la información recibida por el lector (Figura 1). Al interrogar a una etiqueta, un lector puede recibir información como Electronic Product Code (EPC,), que es el número asignado de forma única a cada etiqueta para su identificación en tiempo real [2].

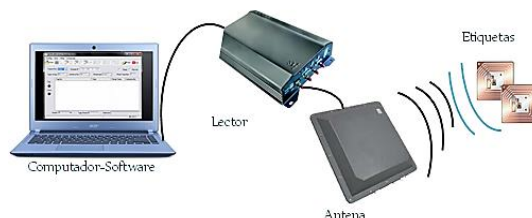


Figura 1. Componentes de un sistema RFID

1.1 Componentes de un sistema RFID

1. *Lector.* Es un dispositivo electrónico encargado de transmitir ondas de radio a la etiqueta para activar el circuito integrado, donde se encuentra almacenada la información y, posteriormente, capturar la respuesta de la misma. La diferencia

esencial con los lectores de códigos de barras radica en que los lectores RFID no necesitan línea de vista para la comunicación lector-etiqueta, solamente es necesario que las etiquetas estén dentro del rango de cobertura del lector para ser energizadas.

Un lector consta de un módulo de radiofrecuencia (transmisor, receptor), una unidad de control (microprocesador e interfaz de comunicación) y una antena para comunicarse con la etiqueta (Figura 2). Estos dispositivos están dotados con interfaces de comunicación estándar, que transfieren la información recibida de la etiqueta a un sistema de procesamiento de datos, tal como un middleware, una base de datos o un controlador, empleando un enlace local o remoto Ethernet, USB, RS232, RS485, WLAN, RF, WI-FI o Bluetooth. También cuenta con sistemas diseñados para trabajar con diferentes lenguajes de programación, tales como .NET, Java y XML, entre otros, que lo hacen una aplicación sencilla para manipular la lectura y escritura de los datos [3, 4].

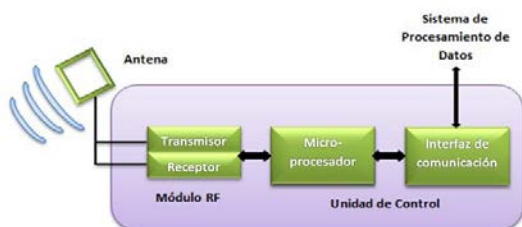


Figura 2. Diagrama en bloques de un lector RFID

2. *Etiqueta.* También llamada *tag* o transpondedor, contiene la información asociada al objeto, animal o persona que la porta y su función es comunicarse con el lector que está transmitiendo señales de radio, para enviar el código EPC almacenado en su circuito integrado. En la Figura 3 se resaltan las partes de una etiqueta RFID pasiva, donde el chip o circuito integrado es un microprocesador que almacena los datos y contiene la lógica de lo que debe hacer para responder al lector; la micro-antena permite recibir energía y transmitir la información de identificación de la etiqueta y el sustrato (Inlay) integra los anteriores componentes. Las etiquetas activas tienen un elemento adicional llamado batería [3, 5].

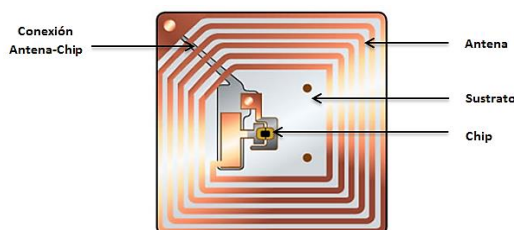


Figura 3. Partes de una etiqueta pasiva

Existen otras características que diferencian las etiquetas, tales como la fuente de energía (activa, semi-activa y pasiva); la memoria (sólo lectura, lectura y escritura, de una escritura y múltiples lecturas); los protocolos de comunicación con el lector; capacidad de procesamiento; características físicas; ciclo de vida y distancia de lectura, entre otros. Los organismos de estandarización se encargan de definir y agrupar estos parámetros para normalizar y regular la producción de dispositivos [3, 5].

3. *Middleware.* El subsistema de procesamiento de datos o middleware es software que reside en un computador y que sirve de intermediario entre el lector y las aplicaciones. Se encarga de filtrar los datos que recibe del lector o red de lectores, de forma que a las aplicaciones software únicamente les llega información útil. El lector convierte la información en un formato descifrado para un computador y el middleware obtiene

los datos de la comunicación lector-etiqueta. Puede registrar los datos descifrados, buscar el ID de la etiqueta en una base de datos, con el fin de ordenar otra acción o incluso insertar información suplementaria en la etiqueta. Además, monitorea el estado de los dispositivos del sistema RFID (de los lectores) y gestiona la infraestructura específica RFID (lectores y etiquetas) y el flujo de información.

1.2 Estandarización y protocolos

Existen diversas organizaciones de normalización en el mundo cuyo propósito es crear uniformidad en la industria de RFID, abordando temas relacionados con el protocolo de interfaz de radio, la estructura de los datos a intercambiar en la comunicación lector-etiqueta, las pruebas que deben cumplir los productos para satisfacer la regulación y el uso de las aplicaciones con RFID [6]. ISO y EPCglobal son ejemplos de estas organizaciones que, en los últimos años, decidieron crear el estándar 18000-6C para definir los parámetros para las comunicaciones de interfaz radio entre 860 MHz - 960 MHz. En este trabajo se emplea un equipo RFID que opera bajo el estándar ISO 18000-6C (Tabla 1) [7]:

- Está diseñado para que los chips de las etiquetas puedan almacenar 96 y 256 bits.
- El lector puede deshabilitar la etiqueta con el comando kill.
- Permite ajustar la velocidad de lectura dependiendo de las necesidades.
- Permite reprogramar las etiquetas.
- En seguridad, cuenta con contraseña para el acceso.
- Se puede utilizar el espectro de forma más eficiente y escribir y leer etiquetas con mayor rapidez y flexibilidad.

Tabla 1. Especificaciones para sistemas RFID ISO 18000-6C

Parámetro	Tipo
Frecuencia	860 - 960 MHz
Codificación en el enlace directo	PIE
Tipo de modulación	ASK (DSB, SSB, PR)
EPC	96/256 bits
Velocidad de transmisión de datos	80 a 640 Kbps
Codificación en el enlace inverso	FM0, Miller coded subcarrier 40 a 640 Hz
Modulación <i>back scattering</i>	ASK o PSK
Tipo de protocolo anticollisión	Protocolo Q
Verificación	16 bit CRC

EPCglobal es una organización sin ánimo de lucro encargada de la industria RFID, para apoyar y establecer estándares para la red EPC y la estructuración del código EPC, un esquema de identificación diseñado para reconocer de forma unívoca cualquier producto en el mundo. El código en sí no guarda información específica de un elemento, sino que el número almacenado en el circuito integrado de la etiqueta actúa como una dirección que permite acceder a la información completa del producto, tal como fecha y lugar de fabricación, fecha de vencimiento, nombre del fabricante, entre otros datos.

1.3 Frecuencias de trabajo

En la tecnología RFID la comunicación lector-etiqueta se realiza de forma bidireccional por medio de ondas electromagnéticas de radiofrecuencia, por esta razón los dispositivos están regulados como unidades de radio. El espectro electromagnético de RFID abarca baja frecuencia (LF), alta frecuencia (HF), ultra alta frecuencia (UHF) y microondas. En este trabajo se utiliza UHF, cuyas características son:

- Opera en la banda de 860 a 960 MHz y microondas en 2.45 GHz o por encima [4].

- La ventaja de trabajar con frecuencias altas es tener una longitud de onda corta, lo que permite antenas de pequeño tamaño y mayor cobertura, logrando alcances típicos de 3 metros en etiquetas pasivas y más de 15 en etiquetas activas.
- La sensibilidad a distintos tipos de materiales en UHF y microondas presenta mal comportamiento frente a los metales, los líquidos y otros materiales, además de los problemas asociados a la desintonización de las antenas de las etiquetas cuando estas se encuentran muy cercanas entre sí, presentando colisiones [9, 10].
- Conforme más alta sea la frecuencia, se puede incrementar la cantidad de información a transmitir y la velocidad de lectura simultánea [10].
- Utiliza acoplamiento electromagnético mediante propagación de la onda electromagnética para alimentar la etiqueta [11].
- La banda UHF no puede ser utilizada de forma global porque no existe un único estándar [4, 9, 11].

1.4 Fenómenos que afectan la tecnología RFID

Pérdidas de los componentes. Los componentes que conforman el circuito para la comunicación lector-etiqueta están expuestos a fenómenos perturbadores que generan ruido o interferencia, ocasionados por obstáculos entre las antenas del lector y las etiquetas. Se presenta atenuación en el nivel de la señal como consecuencia de la mala orientación de las antenas que portan las etiquetas con respecto al lector. Al momento de diseñar y configurar el sistema de comunicación se debe tener en cuenta las condiciones físicas del lector, la etiqueta y las antenas.

Interferencia. En un sistema RFID la interferencia entre sus componentes y la generada por factores externos, es un problema que comúnmente afecta el desempeño del sistema. En una aplicación de este tipo se pueden presentar diferentes tipos de interferencia, tales como interferencia entre etiquetas, entre lectores o debidas a factores externos. Debido a que no todas las aplicaciones son iguales, ni los entornos en los que se encuentra el sistema presentan las mismas características, la medida en que afectan un sistema varían de uno a otro [12].

Colisiones. Se presentan cuando existen varias etiquetas dentro del área de cobertura del lector, ocasionando problemas para determinar en qué momento debe empezar a transmitir cada una. Las etiquetas que cuentan con un protocolo de anticollisión esperan su turno para responder. El protocolo utilizado en el estándar 18000-6C es el Q [13].

3. Diseño e implementación de un sistema prototipo de identificación

Para la realización del sistema prototipo se desarrollaron las fases de la Figura 4.

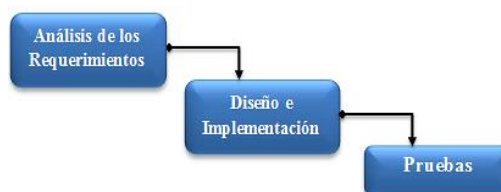


Figura 4. Diagrama de fases

1. *Análisis de los requerimientos del sistema.* En la alcaldía de Popayán el mecanismo de registro utilizado es presentando un carné en la entrada del edificio y con un lector de

código de barras se efectúa el registro. El sistema prototipo de identificación permitirá realizar el registro de forma automática y sin la intervención de terceros; podrá registrar el ingreso o salida de uno o más empleados al tiempo y proporcionará un incremento en la capacidad de lectura del carné, el cual portará una etiqueta RFID.

2. *Diseño e implementación.* La Figura 5 muestra los módulos del diseño, cada uno encargado de realizar una función dentro de la aplicación.



Figura 5. Diagrama de bloques del sistema prototipo

- Módulo de interrogación y recolección de información.** Se determina la manera más adecuada de ubicar los elementos en el escenario de implementación. Para el diseño se tuvo en cuenta los requerimientos del sistema y las condiciones del escenario principal de implementación, en el pasillo de la alcaldía de Popayán. Se ubicó una antena al principio y otra al final del pasillo y el *middleware* se encargó de registrar la entrada o salida del edificio según la ubicación y estado de la etiqueta. Para este diseño se adquirió el kit RFID invengo que trabaja en la banda UHF y soporta el estándar ISO 18000-6C. La Figura 6 muestra el diagrama en bloques de la interacción de los elementos del kit.

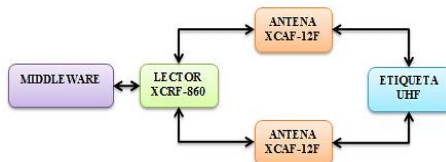


Figura 6. Diagrama de bloques del sistema prototipo

En la Figura 7 se observa la distribución de los elementos en el pasillo de la alcaldía de Popayán, se optó por crear un sistema en el cual las personas puedan ser identificadas solamente con estar en el campo de radicación de la antena.



Figura 7. Pasillo de ingreso de los funcionarios en la alcaldía de Popayán

Después de diseñar el esquema físico del sistema se creó la aplicación software para registrar y procesar los datos obtenidos por el lector al interrogar las etiquetas.

- Módulo de gestión y visualización de información.** En este módulo se creó la aplicación que permitió controlar el acceso de personal y realizar el conteo de las lecturas en tiempos de transmisión programados, se utilizó el lenguaje de programación C# y el entorno de desarrollo Visual Studio 2010, que soporta el lenguaje y tiene un motor de base de datos incrustado SQL Server Compact, que permite el almacenamiento fácil de los datos. No se requiere instalar un servidor de base de datos y tampoco ejecutar un proceso de configuración [14, 15]. Para el diseño hardware propuesto la aplicación tuvo que cumplir los siguientes requisitos:

- Comunicar al lector con el equipo de recolección de información vía USB.
- Facilitar la configuración de las potencias en los puertos del lector.
- Realizar una lectura continua de etiquetas, mostrando las veces que se hizo satisfactoriamente y las que no hubo una lectura exitosa.
- Registrar en una base de datos cuando se produzca un nuevo evento de la etiqueta asignada a un empleado.
- Registrar nuevos empleados en la base de datos y asignarles una etiqueta RFID.
- Mostrar en una tabla el historial de los últimos eventos acontecidos (entrada o salida de una persona).
- Evitar que personas no autorizadas accedan a los datos de la aplicación.
- Guardar en un archivo el registro diario del horario de asistencia de los empleados.
- Enviar el archivo de registro al correo de un funcionario encargado.

En la Tabla 2 se muestran las funciones de la API utilizadas para el código.

Tabla 2. Funciones requeridas

Función	Descripción dentro del proyecto
XCOpen	Habilita el puerto USB por el cual se realiza la comunicación
XCClose	Deshabilita el puerto USB
XCPowerOff	Apaga el amplificador de potencia del lector
XCPowerQuery	Consulta la potencia de cada uno de los puertos de antena del lector, dos, para el sistema prototipo
XCPowerSet	Configura la potencia a cada uno de los puertos de antena del lector
XCIIdentifyEpcCode	Envía la instrucción de lectura del código EPC
XCEpcCodeReport	Recibe los datos del EPC

La Figura 8 muestra el modelo de las funciones que implementa el módulo de gestión y visualización de información. La creación del código estuvo acompañada del diseño gráfico de la aplicación en un formulario en Visual Studio 2010.



Figura 8. Bloques de la aplicación

Las funciones mostradas en la Tabla 2 permitieron la realización del código. Para abrir o cerrar el puerto USB, por el cual se establece la comunicación, se utilizaron las funciones *XCOpen* y *XCClose*, una vez abierto el puerto es posible enviar instrucciones al lector.

El bloque de Configuración de Parámetros permite hacer variaciones de potencia en los puertos donde se conectan las antenas. Para ver la potencia de las antenas se utilizó la función *XCPowerQuery*, y para cambiarla *XCPowerSet*. Estos elementos no están conectados a la base de datos porque no es necesario guardar registro de esta acción, las instrucciones se envían al lector y este las ejecuta.

El bloque Medición de lecturas permite hacerles seguimiento a las lecturas erróneas y exitosas que se generan en un tiempo predefinido de interrogación; esta información se usa más adelante en el análisis del desempeño del sistema. Cuando

se envía una instrucción de lectura del código EPC al lector con la función *XCIIdentifyEpcCode*, el lector se encarga de ejecutar la instrucción y la respuesta se guarda en la variable *Result*. Si el valor es mayor a 0 indica que la función se ejecutó correctamente y la etiqueta está lista para enviar los datos, si el valor es menor o igual a 0 indica un error durante la ejecución de la instrucción. Con *Result>0* se llama a la función *XCEpcCodeReport*, si regresa un valor igual a 1 los datos de la etiqueta se recibieron correctamente, se guardan en un vector y se muestran en la interfaz. El contador de lecturas exitosas se incrementa en 1. Si el valor es diferente de 1, indica que hay un error en los datos y no es posible visualizar el EPC, el contador de errores se incrementa en 1 e internamente se realiza un conteo de las lecturas totales.

Antes de iniciar la lectura se debe configurar un *CheckedListBox* para definir por cuánto tiempo se realizará la operación, su valor por defecto es 1 minuto. Las lecturas de etiquetas solamente se realizarán mientras el contador de tiempo no haya excedido el tiempo configurado.

El bloque Registro y Control de personal sirve para hacer consultas a la base de datos o ingresar nuevos empleados y asignarles una tarjeta RFID. También para realizar el monitoreo de asistencia. El registro de ingreso o salida de personal del edificio se muestra en tiempo real. En este bloque se almacena en la base de datos RFID información personal de los empleados, el EPC de la etiqueta que se les asignó y un registro de los eventos que se han atribuido a cada etiqueta (dentro o fuera). Las tablas que componen la base de datos son:

- Cargos: que se pueden asociar a un empleado.
- Empleados: almacena los datos de un empleado, número de identificación, nombres y apellidos.
- Etiqueta_empleado: asocia la identificación del empleado al EPC de una etiqueta.
- Etiquetas: valor del EPC para un número de etiqueta determinado.
- Eventos: información de todos los eventos que se producen con una etiqueta, también tiene la información del estado de una etiqueta, la antena que hizo la lectura y la hora de entrada o salida.
- Tipo usuario: tipos de usuarios que se pueden definir en la aplicación. Según el tipo de usuario se habilitan o restringen algunas funciones de la aplicación.
- Usuarios: lista de los usuarios que pueden acceder a la aplicación, así como sus datos de autenticación.
- Logs: datos de acceso de una etiqueta asociada a un funcionario, la hora en la que se produjo su registro de entrada o salida.
- Descripción de logs: información que será exportada al archivo de texto.

El bloque Autenticación valida la información ingresada para acceder a las funciones de la aplicación. El registro o salida de un empleado del edificio se realizó valorando una serie de eventos, que pueden ocurrir desde que el usuario se encuentra en la puerta (antena 1) hasta que llega al final del pasillo (antena 2) y viceversa. A continuación, se presenta el desarrollo de la lógica de los eventos.

Manejo de eventos. En esta parte del código se utilizaron estructuras condicionales para tomar decisiones de registro dependiendo de la ubicación de la etiqueta en el pasillo. La aplicación maneja estado para el evento y estado para la etiqueta. Los

estados del evento son: cero, uno y dos. Los estados de la etiqueta son: uno, dos y tres. Casos especiales uno-dos y dos-tres. La fecha y hora está sincronizada con el computador, se actualiza cada 0,5 segundos hasta que se cierra el evento y se registra en la base de datos asignándola a la entrada y salida del funcionario. La Figura 9 muestra el proceso que la aplicación sigue cuando se ingresa o sale del edificio.



Figura 9. Control de entrada y salida

Estado del Evento. Cuando una antena detecta una etiqueta se graba la hora inicial y se registra con estado de evento igual a cero; si después de 0,5 segundos la antena deja de detectarla entonces se cambia el estado del evento a uno, indicando que este es el último evento; si la otra antena detecta la misma etiqueta se registra el nuevo evento y cambia el estado a cero. Si pasados 0,5 segundos la antena dos deja de detectar la etiqueta, el estado cambia a uno y el evento anterior se pone en estado igual a 2, indicando que es el penúltimo y de ahí para atrás todos estarán en dos, así se completa y cierra el evento (Figura 9).

A todas las etiquetas se les revisa el último evento, si están con estado igual a cero se toma la última hora en que fue identificada y se usa para los siguientes cálculos. De esta forma, la aplicación trata de terminar el evento de todas las etiquetas. El estado igual a cero puede deberse a casos especiales en los que alguna de las antenas identifica una de las etiquetas, pero no pasa por la otra antena. Si vuelve a pasar por la misma antena, mira el estado del evento anterior y la hora para actualizarla y, a continuación, realizará el proceso mencionado. Si pasa por la otra antena quiere decir que estaba ubicada en el medio de las dos antenas y se cerrará el evento. Para definir si la persona está entrando o saliendo del edificio se utiliza el estado de la etiqueta.

Estado de la Etiqueta. Los estados uno, uno-dos y dos se manejan como fuera del edificio, y los estados dos-tres y tres indican que está dentro del edificio. La etiqueta se registra cuando es identificada por la antena uno o dos. Pasados 0,5 segundos y si la antena deja de leer el estado de la etiqueta, pasa de uno a dos (en medio de las antenas) y se considera dentro o fuera del edificio, dependiendo del orden de lectura de las antenas. Después de 0,5 segundos y si la otra antena lee la misma etiqueta y esta se aleja de tal forma que no está en el rango de cobertura de las antenas, el estado cambia a tres, registrando a la etiqueta dentro o fuera del edificio. En cada estado se almacena la hora en la base de datos para controlar y actualizar la llegada o salida de la etiqueta según el último evento (Figura 9).

Existen casos especiales, tales como: 1) el usuario ingresa con la etiqueta y se queda parado en la antena uno por más de 0,5 segundos, entonces se cambia el estado de uno a uno-dos (fuera del edificio) y se espera a que la antena dos lo identifique, para seguir el proceso. De lo contrario, si la antena uno deja de leerlo se concluye que no entró. En el momento que vuelva a ingresar la hora se actualiza. 2) El usuario pasa con la etiqueta por los estados uno, dos y se quede dentro del rango de cobertura de

la antena dos por más de 0,5 segundos, se pasa el estado uno a dos-tres (dentro del edificio) y se espera hasta que la antena dos no lo identifique para pasar a estado tres y registrar hora de entrada. Caso contrario, si la etiqueta es leída por la antena uno, se cambia el estado a dos (fuera del edificio) y si la antena deja de leerlo después de 0,5 segundos cambia a estado uno y se registra la hora de salida.

Estos casos se repiten si la etiqueta está dentro del edificio. Además, los eventos se pueden consultar en un listado que se va creando en la pestaña Control de la aplicación. Esta información se guarda en un archivo de texto exportable.

- *Módulo de almacenamiento de información.* Se crearon archivos de registro con la información de los eventos obtenida en el módulo anterior. El listado del control de administrativos y contratistas se almacena por día en un archivo, lo que le permite al personal autorizado y encargado del cumplimiento de horarios laborales, controlar los ingresos y salidas. Estos se pueden enviar a una cuenta de correo electrónico pre configurada.

3. *Pruebas.* En tres escenarios se evaluaron parámetros tales como tiempo de respuesta de las etiquetas, número de lecturas exitosas y erróneas, materiales interferentes y máxima distancia de lectura. En los diferentes casos se varió la potencia.

4. Análisis de resultados

Se evaluó la comunicación lector-etiqueta para determinar qué tan conveniente es la tecnología implementada en la aplicación, para lo cual se realizaron tres pruebas en tres escenarios. Las etiquetas empleadas en las pruebas fueron: AD-232 G2iL, AD-805 Monza 3, AD-824 G2xL/xM, AD-826 Monza 3, AD-827 Monza 3, AD-828 Monza 3 y AD-380iL NXPG2iL. Su tamaño no sobrepasa las medidas de un carné de identificación común. Para la evaluación del desempeño del sistema prototipo se establecieron tres escenarios los cuales se describen en la Tabla 3. En las pruebas se realizó una variación de la potencia del lector de 20 a 30 dBm con incrementos de 1 dB.

Tabla 3. Escenarios de trabajo

Escenarios	Características
1	Las antenas se ubicaron de frente a la pared en un pasillo de la alcaldía, a una distancia de la misma de 226 cm y a una altura de 131 cm.
2	Las antenas se ubicaron de frente a la entrada en el pasillo de la alcaldía, a una distancia de la puerta de 643 cm y a una altura de 131 cm.
3	Las antenas se ubicaron en exteriores, haciendo uso de las instalaciones de la Universidad del Cauca.

1. *Prueba 1: Selección de la etiqueta.* Se eligió la etiqueta de mayor alcance, según la distancia máxima en la cual cada una respondía con su número EPC al lector. Por el espacio en los escenarios 1 y 2 no fue posible realizar todas las variaciones de potencia hasta 30 dBm, porque las etiquetas superaban la distancia de los escenarios. En la Figura 10 se presenta el comportamiento de las etiquetas en el escenario 3, donde se realizaron todas las variaciones.

Se observó un mayor alcance de las etiquetas en el escenario 2, en el que se genera un efecto de guía de onda creando puntos de interferencia constructiva y destructiva entre las que viajan por el pasillo. La onda se refuerza y posee mayor energía para viajar cuando hay interferencia constructiva [10]. La etiqueta AD-805 no mostró cambios significativos al incrementar el valor de la potencia, por lo cual se concluye que la distancia de lectura está limitada por la potencia del lector y la sensibilidad de la

etiqueta. Se eligió la etiqueta AD-232 porque cubre el ancho del pasillo (escenario 1) con una potencia mínima de 20 dBm, el largo del pasillo (escenario 2) con una potencia mínima de 23 dBm y alcanza una distancia de hasta 1154 en exteriores (Figura 10). Por lo tanto, se considera una potencia del sistema de 20 dBm sin materiales interferentes.

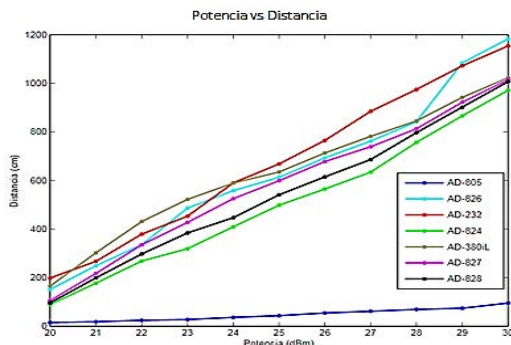


Figura 10. Escenario 3, Potencia vs Distancia

2. Prueba 2: Selección de la potencia de trabajo para la etiqueta AD-232 frente a interferencia. La potencia de trabajo del sistema se seleccionó realizando medidas con la etiqueta AD-232 dentro de materiales interferentes (Tabla 4). Las medidas de distancia tomadas en esta prueba fueron menores a la distancia máxima, aunque en este punto la intensidad de la señal transmitida por el lector es mejor porque energiza continuamente a la etiqueta, garantizando mayor número de lecturas correctas. La Figura 11 muestra el resultado de las mediciones en el escenario 1.

Tabla 4. Materiales interferentes para la prueba

Materiales	Descripción
Metálico	La etiqueta AD-232 se colocó dentro de un estuche metálico
Fluido corporal	La etiqueta AD-232 se llevó en la mano cerrada
Carné	Se utilizó un carné que venía con la etiqueta AD-232
Billetera	El carné con la etiqueta se ubicó en una billetera de lona
Bolso	El carné con la etiqueta en la billetera y en un bolso
Sin material	Etiqueta AD-232

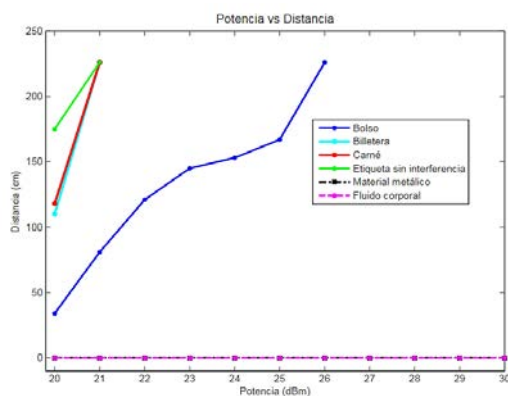


Figura 11. Escenario 1, Etiqueta AD-232 frente a interferencia

Se observa que los materiales metálicos y el fluido corporal anulan la comunicación del lector con la etiqueta para todas las variaciones de potencia. En 21 dBm la etiqueta en billetera, carné y sin interferencia, llega a la máxima distancia del pasillo, 226 cm. Mientras que la etiqueta en el bolso necesita de una potencia transmitida por el lector de 26 dBm. Por lo tanto, se requiere una potencia entre 26 y 30 dBm para garantizar

que el personal pueda portar el carné con la etiqueta dentro del bolso, el peor caso. El material con el que están hechos los objetos utilizados en la prueba influye en la lectura de la etiqueta, porque si es más grueso o denso dificultará la lectura. Se realizaron pruebas para determinar la distancia mínima en la que una etiqueta no es leída por las dos antenas. Para una potencia de 30 dBm se necesita una distancia de 290cm entre las antenas, para garantizar que los eventos programados en el software se cumplan y no se asigne información de entrada o salida incorrecta.

3. Prueba 3. *Medición de lecturas erróneas y exitosas para calcular la FER y la VER a una distancia fija.* Se tomaron medidas de las lecturas exitosas y erróneas que se generan teniendo una distancia fija de 226 cm, que corresponde al ancho del pasillo en la alcaldía. Para tomar las medidas se consideraron los materiales interferentes de la prueba 2 y se varió para cada uno la potencia transmitida de 20 a 30 dBm. Con los resultados obtenidos en las pruebas 1 y 2 se calculó la atenuación. Para el cálculo de la Tasa de Error de Trama (FER) y la Tasa de Error de Bit (BER) se utilizaron los datos obtenidos en las pruebas 2 y 3.

Por otro lado, los sistemas de comunicación inalámbricos pueden presentar *atenuación de la señal* mientras viaja del transmisor al receptor, por lo que el sistema prototipo de Identificación por Radiofrecuencia (RFID) diseñado no es ajeno a esto. A causa de la dispersión de energía en el medio, a medida que la etiqueta se aleja del lector disminuye el nivel de potencia de la señal con la cual se energiza, por lo que es conveniente analizar el grado de atenuación presente en la comunicación lector-etiqueta. Este valor se calculó empleando la ecuación (1) de balance del enlace.

$$P_{rx} = PIRE - L \text{ (Atenuación)} \quad (1)$$

Despejando L de la ecuación (1) se obtiene la ecuación (2).

$$L \text{ (Atenuación)} = PIRE - P_{rx} \quad (2)$$

La PIRE se define con la ecuación (3).

$$PIRE = P_{tx} + G_a - L_{cc} \quad (3)$$

Donde, según los datos del sistema, estos valores son:

P_{tx} : potencia del transmisor, de 20 a 30 dBm.

G_a : ganancia de la antena, 7.15 dBi

L_{cc} : pérdidas del cable coaxial y conectores, 5.554

P_{rx} : potencia de recepción de las etiquetas. Dado que este valor no lo proporciona el fabricante, se tomó su sensibilidad, la cual se calculó con las pérdidas de espacio libre (ecuación 4) obtenidas en el escenario 3 con la prueba 1.

$$l = 32.45 + 20 \log f + 20 \log d \quad (4)$$

En la ecuación (4) se utilizó una frecuencia constante de 927.25 MHz, haciendo que las pérdidas dependan directamente de la distancia entre el lector y la etiqueta. Seguidamente, se promediaron los 10 resultados obtenidos por cada etiqueta y potencia. Las medidas tienen una desviación estándar de 2,636 y un coeficiente de desviación aproximado de 0,021. La Tabla 5 muestra la sensibilidad calculada. Con la sensibilidad de las etiquetas se calculó la atenuación en los escenarios 1 y 2 con la ecuación (1), cuyos resultados muestran que la etiqueta más sensible es la AD-232, con -20.58 dBm, corroborando su elección como la de mayor alcance en pruebas anteriores. La etiqueta AD-805 presenta la sensibilidad más baja, 2,746 dBm, alcanzando distancias inferiores a 100 cm.

Tabla 5. Sensibilidad de las etiquetas

Etiqueta	Potencia(dBm)	Distancia (cm)	Sensibilidad(dBm)
AD-826	20	161	-19,873
AD-232	20	449	-20,58
AD-824	20	107	-17,545
AD-380iL	20	345	-20,242
AD-805	20	15	2,746
AD-827	20	129	-18,991
AD-828	20	118	-18,291

La Figura 12 muestra los resultados de la atenuación para el escenario 2. Sin embargo, al comparar las curvas de la misma etiqueta en los escenarios 1 y 2 se observa que, para el mismo valor de potencia, la atenuación es igual, debido a que la atenuación depende del medio: los dos escenarios se encuentran en el mismo pasillo.

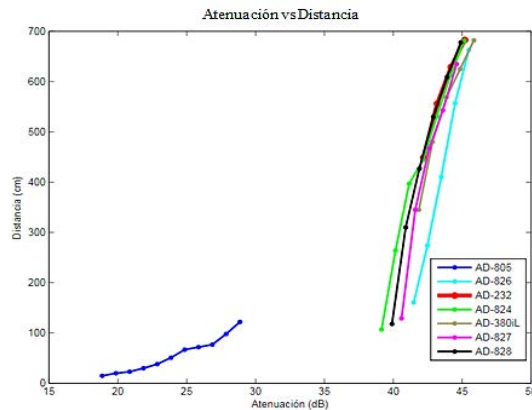


Figura 12. Escenario 2, Atenuación de las etiquetas

En el escenario 2, las etiquetas con mayor sensibilidad llegan más lejos y, por lo tanto, se atenúa más la señal transmitida. A excepción de la etiqueta AD-805 las demás presentan una atenuación aproximada de 41 dB. El incremento de la potencia transmitida hace que el punto máximo de lectura de la etiqueta sea mayor, debido a que la señal tiene que recorrer una mayor distancia sufre una mayor atenuación. El aumento de 1dB en la potencia transmitida representa un aumento aproximadamente de 2,7 % en la atenuación. En la Figura 12 se observa que las etiquetas que tienen una sensibilidad entre -17 y -20 dBm mantienen una atenuación entre 39 y 46 dB. Los puntos graficados en cada curva representan un nivel de potencia, iniciando en 20 dBm con incrementos de 1dB. Así, la etiqueta AD-805, para una potencia transmitida de 30 dBm, alcanza una distancia de 122 cm y experimenta una atenuación de 28.86 dB.

Otra cuestión es que, debido a la ausencia de una función en el demo del kit RFID para medir la Tasa de Error de Trama (FER) y la Tasa de Error de Bit (BER), estos valores se deben encontrar de otra forma. Teniendo en cuenta que la FER se consigue con el número de tramas erróneas sobre el número de tramas totales y que se puede relacionar con BER, se creó en la aplicación software una funcionalidad de monitoreo para programar un periodo tiempo de transmisión, entre el lector y la etiqueta, y contabilizar el número de lecturas exitosas y erróneas transmitidas en ese periodo.

En el lector se considera una lectura exitosa cuando envía una señal de interrogación a una etiqueta y le responde con su número EPC, de manera que el lector lo recibe y lo muestra en pantalla y el contador de lecturas exitosas se incrementa en 1. Cuando la Comprobación de Redundancia Cíclica (CRC) resuelve que hubo un error, el lector pide

una retransmisión a la etiqueta, en este caso el contador de lecturas erróneas se incrementa en 1. La ecuación (5) relaciona la FER y la BER.

$$FER = 1 - (1 - BER)^N \quad (5)$$

Donde N es el número de bits de cada trama enviada y que, para el sistema prototipo, tiene un valor de 184, correspondiente a una trama de 23 bytes, 8 de ellos pertenecientes al EPC. Despejando BER de la ecuación (5) se obtiene la ecuación (6).

$$BER = 1 - 10^{\frac{\text{Log}(1-FER)}{N}} \quad (6)$$

El valor de FER que falta en la ecuación (6) se calculó con el número de lecturas erróneas y totales medidos en las pruebas 2 y 3. Al hablar de lectura se hace referencia a la trama que recibe el lector de la etiqueta. Una lectura errónea es una trama errónea. Con la ecuación (7) se obtuvo FER y para reemplazarlo en la ecuación (6).

$$FER = \frac{\text{Tramas erróneas}}{\text{Tramas totales}} \quad (7)$$

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir de los datos de la prueba 3, en el escenario 1. En la Figura 13 se muestran las curvas de FER vs Potencia del escenario 1. La etiqueta, sin interferencia en el carné y en la billetera, se lee hasta el punto límite del pasillo a una potencia de 21 dBm, mientras que el bolso necesita 26 dBm, 5 dB más de potencia, siendo el peor caso de interferencia de los casos analizados.

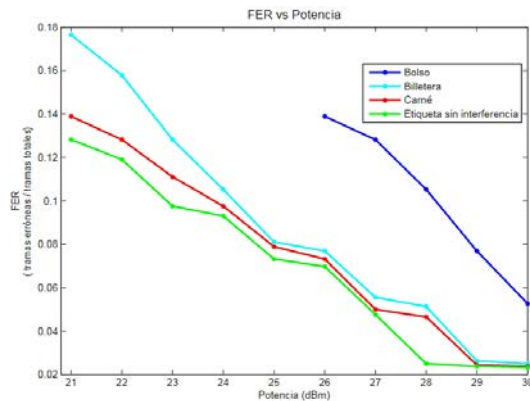


Figura 13. Tasa de Error de Trama (FER) para la etiqueta AD-232

La composición de los materiales juega un papel importante en el grado de interferencia en la comunicación del lector y la etiqueta. Al aumentar la potencia, el porcentaje de lectura de la etiqueta en el bolso se incrementa en 37%, en la billetera 17%, en el carné 14% y sin material interferente 18%, para 30 dBm, indicando que hay mayor número de tramas recibidas correctamente en el lector. En 30 dBm las curvas llegan a valores muy cercanos a cero. Al incrementar la potencia, las tramas erróneas pueden disminuir, incluso ser nulas, aunque esto también depende de factores como la presencia de algún objeto metálico o de muchas obstrucciones entre la etiqueta y el lector.

En la Figura 14 se observan las curvas de BER vs Potencia del escenario 1. Los valores máximos de VER, con los que la etiqueta alcanza el límite del pasillo en 21 dBm, son: 1.05×10^{-3} para la etiqueta en la billetera, 8.1×10^{-4} en el carné y 7.4×10^{-4} sin material interferente y, en 26 dBm, 8.1×10^{-4} para la etiqueta en el bolso. Asimismo, los valores mínimos alcanzados en los cuatro casos son: 1.4×10^{-4} , 1.3×10^{-4} , 1.3×10^{-4} y 2.9×10^{-4} , con la etiqueta en la billetera, en el carné, sin material interferente y en el bolso, respectivamente. Al incrementar la potencia la cantidad de errores disminuye: en el bolso

pasa de una tasa que representa 8 errores por cada 10000 bits transmitidos a sólo 3. De la misma forma, el carné pasa de 8 a 1 error por cada 10000, la billetera pasa de 1 por cada 1000 a 1 por cada 10000 y la etiqueta sin interferencia de 7 a 1 por cada 10000 bits transmitidos. Estos valores muestran que, cuando se incrementó la potencia, disminuyó la BER, algo que se esperaba porque es proporcional a la FER mostrada en la Figura 14.

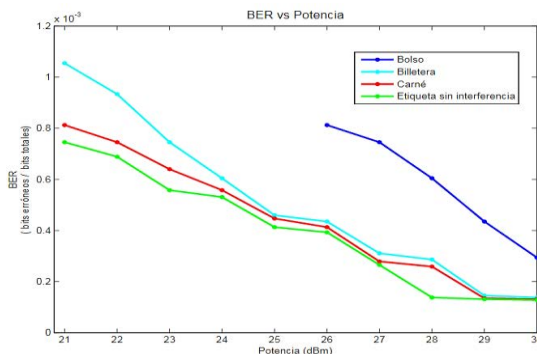


Figura 14. Tasa de Error de Trama (FER) para la etiqueta AD-232

Aunque estos valores no alcanzan el nivel definido en la calidad de los sistemas digitales de 10^{-6} , es bueno para la identificación de etiquetas en el sistema diseñado. En el escenario de implementación se observa que, para la mayoría de los casos, la antena leyó la etiqueta y, cuando no lo hizo, la lectura la realizó la segunda antena, generando el registro en la base de datos del prototipo de Identificación por Radiofrecuencia (RFID).

5. Conclusiones

El sistema prototipo cumple con los requerimientos hardware y software y demostró que la tecnología de Identificación por Radiofrecuencia (RFID) es apta para emplearla en aplicaciones de identificación. Además, beneficiándolas al no requerir de una línea de vista transmisor- receptor y al proveer un alcance de lectura mayor a otras tecnologías, como el código de barras. El análisis realizado a la comunicación entre el lector y la etiqueta mostró que existen factores que influyen en la máxima distancia de lectura que se puede alcanzar, tal como el escenario de implementación del sistema, la potencia de operación del lector y los materiales presentes en el trayecto de la señal.

La atenuación que experimenta la señal es igual para cada valor de potencia en los escenarios 1 y 2, porque se encuentran en el mismo medio (pasillo alcaldía), con una atenuación aproximada de 45 dB para la etiqueta AD-232. Al realizar las pruebas en exteriores se generan más pérdidas, porque hay mayor dispersión de las ondas que energizan la etiqueta, mientras que, en los escenarios interiores, la presencia de la pared o elementos en el trayecto de la señal favorecen o perjudican su intensidad.

Después de evaluar los cuatro casos de lectura, es decir, dentro de un bolso, en una billetera, en un carné o cuando no tiene ningún tipo de interferencia, se encontró que el peor caso se presenta cuando la etiqueta está dentro de un bolso, obteniendo una Tasa de Error de Bit de 2.9×10^{-4} para 30 dBm, mientras que en los otros casos se logró un valor promedio de 1.4×10^{-4} , una disminución de posibilidad de errores de aproximadamente el 50%, por lo tanto, a mayor cantidad de elementos interferentes, habrá menos posibilidades de leer la etiqueta.

Las pruebas de alcance proporcionaron los valores a los cuales debe trabajar el sistema prototipo para lograr un buen desempeño. Se estimó que con una potencia de 26 dBm la

etiqueta puede ser leída en cuatro casos. Sin embargo, se considera que el sistema debe operar con una potencia de 30 dBm ya que a este valor se obtiene la BER más baja, con la posibilidad de generar menos errores en la transmisión.

El análisis de la calidad de transmisión del sistema arrojó una Tasa de Error de Trama y Tasa de Error de Bit con valores altos para potencias entre 20 y 25 dBm, sugiriendo el aumento de la potencia para disminuir el número de lecturas erróneas en la comunicación. A pesar de que no se obtiene una BER de 10^{-6} , en la mayoría de los casos la lectura de las etiquetas se realiza con éxito, porque si la lectura no la hace una antena la hace la otra, registrando el ingreso o salida de una persona y teniendo en cuenta su estado previo.

Referencias

- [1] Ormachea, F. (2006). *RFID y ePC: Aplicaciones*. Revista PUCP 1(1), pp. 1-1.
- [2] Pirrone, J. et al. (2011). *Análisis del uso de etiquetas RFID implantables en seres vivos*. En V congreso latinoamericano de ingeniería biomédica. Caracas, Venezuela.
- [3] Portillo, J. et al. (2008). *Tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID): Aplicaciones en el ámbito de la salud*. Informe de vigilancia tecnológica, Asociación de empresas de electrónica, tecnologías de la información y telecomunicaciones de España, AETIC. Madrid, España.
- [4] Urbina, R. (2011). *Tutorial sobre circuitos RFID*. Trabajo de grado. Universidad de las Américas Puebla.
- [5] RFID Journal. *Tecnología RFID: Introducción*. Online [Jun 2015].
- [6] Montufar, D. et al. (2008). *Diseño e implementación de un prototipo para un sistema de monitoreo de personal basado en RFID (Identificación por Radio Frecuencia)*. Trabajo de grado. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- [7] Cole, P. & Engels, D. (2005). *ID-21st Century Supply Chain Technology*. In AEEMA National Conference. Melbourne, Australia.
- [8] Bueno, M. (2010). *Contribución a los protocolos anticolidión y técnicas de dimensionamiento para sistemas de identificación por radiofrecuencia*. Trabajo de grado. Universidad Politécnica de Cartagena.
- [9] Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. México: Pearson.
- [10] Candel, G. (2006). *Estudio de la identificación por radiofrecuencia (RFID) y desarrollo de software relacionado con el control de la cadena de suministro*. Trabajo de grado. Universidad de Málaga.
- [11] RFID Point (2013). *Frecuencias de Operación*. Online [Jun 2015].
- [12] Herrera, J. & Samá, E. (2005). *Estudio, diseño y simulación de un sistema de RFID basado en EPC*. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Catalunya.
- [13] Campillo, A. (2013). *Sistema de reparto de recursos en un sistema RFID con lectores interferentes y tags móviles*. Trabajo de Grado. Universidad Politécnica de Cartagena.
- [14] MSDN. *Tutoriales de C#*. Online [Jul 2015].
- [15] Archer, T. (2001). *A fondo C#*. Madrid: McGraw-Hill.

28. Diseño de un dispositivo de comunicación para monitoreo y control *on-off* de una red mediante el protocolo de comunicaciones IEEE 802.15.4

Jheison Ríos L.
Víctor Copete A.
David Goez S.

Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín, Colombia

1. Introducción

La comunicación inalámbrica es una de las tecnologías que más desarrollo ha experimentado en las últimas décadas. Aunque es común citar los trabajos de Hertz y Marconi, de finales del siglo XIX, como los pioneros de estos sistemas, el origen de la radio se puede remontar al 1680, con la teoría de Newton sobre la composición de la luz blanca y que fue la base de los sistemas de comunicación inalámbrica [1]. En un sentido amplio y general, se entiende por comunicaciones inalámbricas todas las que suceden entre dispositivos, móviles o no, que intercambian información utilizando el espectro electromagnético [2]. Esta capacidad se ha potencializado desde las comunicaciones a nivel industrial, es decir, redes de sensores, monitoreo y control.

A nivel de servicios al usuario se ha detectado posibilidades de desarrollo y oportunidades empresariales, por ejemplo, en hoteles, clínicas, restaurantes, universidades y centros comerciales, donde se presenta inconformidad entre los clientes y el personal encargado de controlar los equipos receptores de señal (televisores), cuyo servicio depende del pago de tiempo de uso. La razón es la falta de control automático que permita el encendido y el apagado de estos equipos en un tiempo programado, porque, generalmente, el control del tiempo de uso se hace de forma manual, por medio de la sustracción de los cables de alimentación eléctrica o de señal, cuando el tiempo de arrendamiento del equipo se cumple. Esto con lleva a un desgaste operativo en las personas encargadas de mantener el funcionamiento de estos equipos, además, implica pérdidas cuando por diferentes causas el equipo se apaga en el momento oportuno.

Todo esto demuestra la necesidad de implementar un dispositivo que permita controlar automáticamente el tiempo de funcionamiento acordado con el usuario. Una solución podría ser una red de sensores inalámbricos, que se basa en dispositivos distribuidos espaciados autónomos que utilizan sensores para monitorear condiciones físicas o ambientales [3]. Actualmente, y gracias a la domótica, se cuenta con dispositivos automáticos que realizan diversas tareas programadas, tales como sensores de alarma, sistemas de encendidos luces y sistemas de riego. Sin embargo, para los equipos receptores de señal (televisores) no se encuentra una herramienta para administrar el encendido, el apagado y el control de tiempo de forma masiva a través de una red.

Luego del censado, estas herramientas suministran tramas con información que provee conectividad inalámbrica con el mundo de los cables y demás componentes electrónicos en la red. Esas ventajas de la tecnología electrónica se aprovechan en los contextos donde se dificulta construir sistemas, porque la implementación de una red cableada es un obstáculo, entonces, gracias a las redes, cada nodo se conecta directamente al Gateway, o a un nodo de mayor jerarquía, hasta tener comunicación con el mismo. Entre las topologías de redes, los tipos de malla son las que ofrecen mayor confiabilidad porque los nodos pueden conectarse con múltiples nodos en el sistema y buscar el camino más confiable, en condiciones físicas o ambientales para la entrega de la información. La Figura 1 muestra las diferentes topologías que se pueden implementar en una red de sensores.

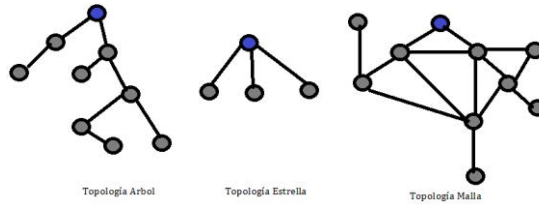


Figura 1. Topología que se pueden implementar en una red de sensores

En este trabajo se presenta el diseño de un dispositivo electrónico asociado a un sistema de comunicación inalámbrico basado en el estándar IEEE 802.15.4, para monitoreo del tiempo de encendido y control *on-off* de una red de televisores con control por tiempo de uso. La organización de este capítulo es la siguiente: en la sección 2 se introducen los modelos de propagación en interiores, en la sección 3 se presenta el sistema electrónico diseñado, en la sección 4 los resultados y el análisis y, finalmente, en la sección 5 se proporcionan las conclusiones sobre los resultados obtenidos y los lineamientos a seguir para futuros trabajos.

2. Modelos de propagación en interiores y topología de red

2.1 Propagación de RF en interiores

Los modelos de propagación *indoor* se pueden clasificar en tres grupos: 1) empíricos de banda estrecha, 2) empíricos de banda ancha, y 3) determinísticos. Los empíricos de banda estrecha se expresan como una ecuación matemática simple, mediante la cual se obtienen las pérdidas de trayecto. Los empíricos de banda ancha (Trayecto Dominante) también permiten predecir las características del ancho de banda del canal (*delay spread*). Por su parte, los determinísticos son métodos de cálculo que simulan físicamente la propagación de ondas de radio. Estos modelos brindan información tanto en banda ancha como en banda estrecha del canal dentro del edificio [4]. Las pérdidas de trayecto en el espacio libre (FPL) en escala lineal se calculan con la ecuación (1).

$$L_0 = \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right)^2 \quad (1)$$

Donde:

- L_0 Son las pérdidas de trayecto en el espacio libre
- λ Es la longitud de onda
- d_0 Es la distancia en metros

Siendo $\lambda = 0.125m$ y $d_0 = 1m$, las pérdidas de trayecto en el espacio libre en *dB*:

$$L_0(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right)^2$$

Por razones prácticas, los tipos de pared están divididos en dos únicas categorías, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de pared para el modelo multi-pared

Tipo	Descripción	Valor [dB]
L_{w1}	pared de la luz: placas de yeso, tableros de partículas o delgadas (<10 cm), muro de hormigón ligero.	3.4
L_{w2}	La pared pesada: grueso (> 10 cm), hormigón o ladrillo	6.9

Para el análisis de pérdidas en interiores se utiliza el modelo de Paredes Promedio, basado en multi-pared Costo-231, en el que se usó la pérdida debido a que obstruye las paredes, entonces se agrega solamente un parámetro L_w (ecuación (2)).

$$L_{dB} = L_{0,dB} + 20\text{Log}_{10}d + k_w L_w \quad (2)$$

Donde k_w denota el número de paredes penetradas. Con el fin de determinar el parámetro L_w , cada pared que obstruye el camino directo entre el receptor y las antenas del transmisor debe tener su pérdida [5].

2.2 Topología de red implementada

La red mesh permite transmitir desde un módulo a otro, que este fuera del rango de alcance, a través de módulos intermediarios que funcionan como enrutadores y que re-direccionan el paquete para que pueda llegar a su destino [6]. Para el desarrollo de esta red se utilizaron 3 módulos Xbee, uno como coordinador y dos como *router*, para lograr conectar los demás dispositivos que estarán por fuera del alcance. A final, se piensa añadir más dispositivos para la red propuesta. En la Figura 2 se ilustra la red mesh diseñada.

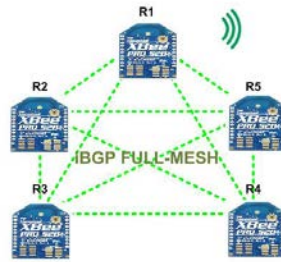


Figura 2. Topología red mesh Zigbee

3. Sistema de monitoreo y control de tiempo

El sistema electrónico está conformado por dos tipos de dispositivos: 1) final, asociado a cada dispositivo a los que se debe monitorear y su distribución corresponde a una topología de red tipo malla, y 2) coordinador, encargado de integrar la red inalámbrica con la intranet, para que todo el sistema pueda ser monitoreado de forma remota.

3.1 Sistema electrónico que realiza la acción de control

El sistema cuenta con diversos elementos, entre los que se cuentan un relé, encargado de controlar la corriente eléctrica de la red 120 VAC, una fuente AC/DC, proveedora principal de energía del sistema, una batería tipo Li-po de 3.7 VDC, que es la fuente de la UPS, y los conectores para el ingreso y la salida de la corriente eléctrica del dispositivo que se quiere controlar, además de una LCD de 2x16, encargada de presentar la información al usuario final. Este sistema se implementó sobre dos impresos diferentes para independizar la etapa de control de potencia y la etapa que contiene el micro controlador y el sistema de comunicaciones. En las Figuras 3 y 4 se muestra el diseño en esquemático y el diseño en *board* del sistema actuador para la etapa de potencia.

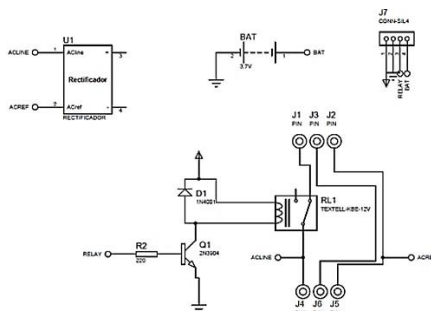


Figura 3. Esquemático de la etapa de potencia



Figura 4. Diseño en board de la etapa de potencia

En las Figuras 5 y 6 se muestra el diseño en esquemático y el diseño en *board*, que integran el sistema microcontrolador y el módulo de comunicaciones, con base en el estándar IEEE 802.15.4.

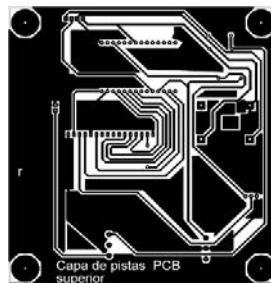


Figura 5. Diseño en board sistema microcontrolador y comunicaciones

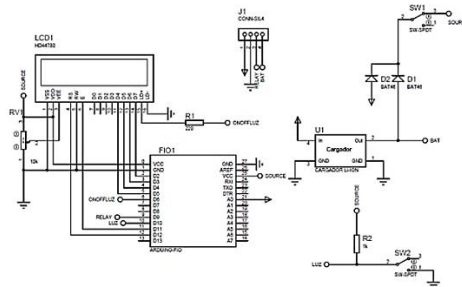


Figura 6. Esquemático sistema microcontrolador y comunicaciones

El Microcontrolador encargado de la gestión del sistema se basa en un Arduino Fio que, como característica principal, integra un microcontrolador ATmega328P y una base, para implementar directamente un módulo Zigbee de MaxString. En la Figura 7 se muestra el módulo usado en el dispositivo propuesto.



Figura 7. Arduino FIO [7]

Después de implementar y probar el funcionamiento individual de cada uno de los impresos, se integran y se prueba su funcionamiento final. La integración se realizó

mediante la conexión de un puerto de 5 pines de atención eléctrica en los impresos y la conexión de la fuente principal de la PCB1 al cargador de la PCB2 por medio de un cable con puertos USB, tal como se observa en la Figuras 8 y 9.



Figura 8. Integración de los impresos



Figura 9. Conexión fuente principal entre los impresos

Luego de la integración de los impresos que conforman la etapa que interactúa con el usuario y ejecuta el control *on-off*, se optó por desarrollar una caja en material de acrílico para darle estética y protección, tal como se observa en las Figuras 10 y 11.



Figura 10. Dispositivo ensamblado en carcasa



Figura 11. Dispositivo ensamblado

3.2 Sistema inalámbrico basado en el estándar 802.15.4

El establecimiento de la red se realiza a través de un módulo de comunicaciones denominado coordinador, que se encarga de iniciarla y proporcionar los parámetros necesarios para que los demás dispositivos se asocien a ella. En la Tabla 2 se muestran las características generas de los módulos de comunicaciones que se usaron en este trabajo.

Tabla 2. Características de los módulos Xbee-Pro ZB [8]

Alcance en interiores/zonas urbanas	40m
Alcance en exteriores/línea de visión	1,6 Km
Potencia de transmisión	50 Mw(17dBm)
Corriente de reposo	<1µA@25°C.
Frecuencia de Operación	2,4 GHz
Velocidad de datos en RF	251 ps

3.3 Protocolo de comunicación para el monitoreo y control

Para la elaboración del protocolo del dispositivo se tuvo en cuenta el estándar IEEE 802.15.4 que utilizan los módulos Xbee-S2 PRO. Para éstos existen varios modos de operación, entre de los que se encuentra el modo transparente, modo de comandos Transparent (AT) y el modo Application Programming Interface (API). Se optó por utilizar el modo API, aunque su manejo a nivel de programación es más complicado, porque permite mayor control sobre la red a la vez que se usa menor tráfico de datos. El modo de operación API es una alternativa al AT que proporciona diferentes opciones para configurar los módulos y tipos de ruteo de los datos. Una aplicación puede enviar datos a diferentes módulos sin cambiar la dirección de destino mediante la configuración del módulo, porque cada trama enviada contiene un campo con la dirección destino.

Además, el modo API permite recibir confirmación de las transmisiones realizadas, con lo que se sabe si un paquete se entrega correctamente o no. En cuanto a la recepción de paquetes, permite identificar al módulo que envió el paquete, porque la trama también incluye la dirección del nodo transmisor. En el modo API las tramas o *frames* (Tabla 3) se envían mediante Trasmisión y Recepción Asíncrona Universal (UART), por lo tanto, tienen que seguir la especificación de una trama UART, como la que se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Estructura de la trama en API [9]

Tabla 3. Identificadores de la trama API que soportan los módulos Xbee

Identificación de la trama API	Valor
Estado de modem	0x8A
Comandos AT	0x08
Comandos AT-Valor de Parámetro de cola	0x09
Respuesta de comando AT	0x88
Solicitud de comando remoto	0x17
Respuesta de comando remoto	0x97
Solicitud de transmisión ZigBee	0x10
Direccionamiento explícito en la trama ZigBee	0x11
Estado de la transmisión ZigBee	0x8B
Paquete recibido- ZigBee	0x90
Indicador explícito de RX - ZigBee(AO=1)	0x91
Indicador RX de los datos IO - ZigBee	0x92
Indicador de lectura - sensores Xbee (AO=0)	0x94
Indicador del nodo de identificación (AO=0)	0x95

Establecido lo anterior, se diseñó un grupo de comandos para el control de los dispositivos finales a los cuales se envía los tiempos y de los que se conoce el estado actual de cada uno, logrando una comunicación *full* dúplex donde las órdenes generadas pueden viajar en ambas direcciones, tanto del coordinador como del dispositivo final.

3.4 Diseño de los campos que contienen la información útil

El registro de datos del protocolo de comunicación está conformado por campos que varían en cantidad dependiendo del tipo de mensaje. Estos campos contienen información relevante sobre el funcionamiento de cada uno de los dispositivos que conforman la red. En las Figuras 13 y 14 se puede observar la lógica del algoritmo implementado para la funcionalidad del dispositivo y en la Tabla 4 se describen los comandos necesarios para el monitoreo.

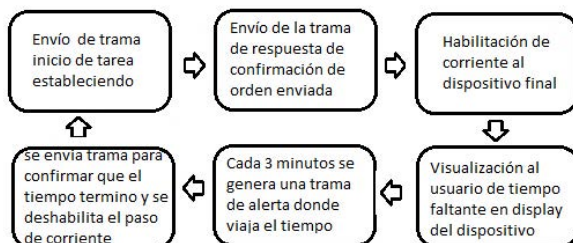


Figura 13. Ejecución del proceso de control de tiempo

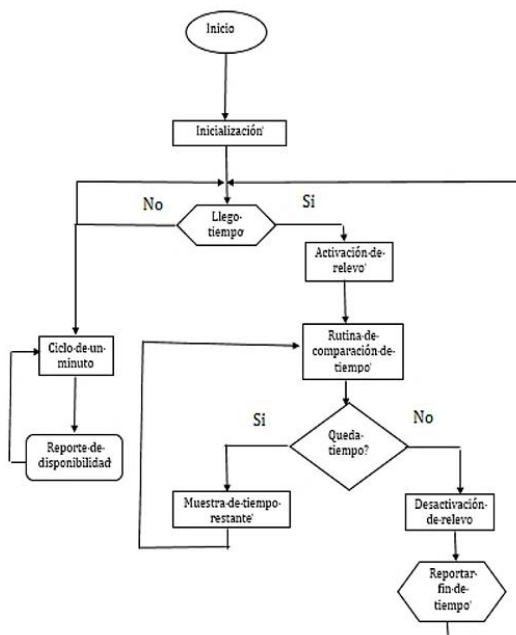


Figura 14. Diagrama de flujo algoritmo

Tabla 4. Comandos protocolo

Comando	Función
TIME <I1>1<F1><I2>2<F2>	TIME <I1>tarea<F1><I2>tiempo en minutos<F2> Comando inicio de tarea y establece tiempo.
TIMEOFF	No contiene valores es un comando para avisar que el tiempo termino
TIMERES<I1>1:20:15<F1>	TIMERES<I1>tiempo restante<F1> Comando que informa al coordinador el tiempo restante luego de la orden emitida esta tarea se realiza cada 3 minutos.
PWOFF<I1>1:20:15<F1>	PWOFF<I1>tiempo actual<F1> Este comando envía al coordinador una señal indicando que la energía se fue y envía el tiempo actual para que se guardado al coordinador
PWON	No contiene valor es un comando que avisa al coordinador que la red eléctrica 110 VAC está funcionando
DEVON<I1>0013A20040E61A2C<F>	DEVON<I1>dirección propia del dispositivo final<F1> El comando le indica al coordinador que está en línea y listo para recibir comandos, esta tarea la realiza cada minuto si no se está ejecutando una orden.

4. Resultados y análisis

En la implementación de la fase experimental para determinar las pérdidas de señal en el área de los dispositivos transmisores, se usaron los módulos XBee S2 PRO, porque, mediante comandos AT, se les puede interrogar, lo que permite obtener de ellos la potencia con la que recibieron la última trama válida. El lugar donde se realizaron las mediciones fue en la Clínica del Norte (municipio de Bello), en los pisos 6, 7 y 8. En la Figura 15 se puede visualizar las instalaciones del piso 7 y en la Figura 16 la distribución de los dispositivos a los que se realiza la medición de potencia.



Figura 15. Piso 7 Clínica del Norte



Figura 16. Esquema de medidas de potencia

Los resultados que se obtuvieron, luego de realizar las medidas de potencia utilizando dos XBee con la configuración en modo AT, se observan en las Tablas 5, 6 y 7. Un XBee se utilizó como coordinador y otro como Router, y el comando aplicado fue ATDB, el cual reporta la potencia en $-dBm$ con que se recibe el último paquete.

Tabla 5. Medición inicio a medio

Piso	Distancia inicio a medio	Potencia Inicio medio -dBm
6	25.74m	89.8
7	25.74m	73.4
8	25.74m	84.6

Tabla 6. Medición medio a final

Piso	Distancia medio a final	Potencia medio a final -dBm
6	25.74m	77.4
7	25.74m	63.4
8	25.74m	83.2

Tabla 7. Medición distancia total

Piso	Distancia total	Potencia total -dBm
6	51.47m	101.8
7	51.47m	102.2
8	51.47m	101.4

Luego de realizar el proceso de medición con los Xbee S2Pro en las instalaciones de la Clínica, se usa el modelo empírico de propagación en interiores que se eligió previamente. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Datos aplicados al modelo

Distancia (d)	Numero de paredes (Kw)	L_{dB}
25.74m	6	88.8dB
51.47m	12	115.23dB

Para la distancia 1 se aplicó la ecuación (3) y para la 2 la ecuación (4).

$$L_{dB} = 40.2 + 20\text{Log}(25.74) + 6 \times 3.4 = 88.81\text{dB} \quad (3)$$

$$L_{dB} = 40.2 + 20\text{Log}(51.47) + 12 \times 3.4 = 115.23\text{dB} \quad (4)$$

Luego se aplica la fórmula de potencia total (ecuación (5)), donde se resta la potencia de transmisión entregada por el Xbee, que se toma de la Tabla, menos las pérdidas L_{dB} que entrega el modelo de paredes promedio, obteniendo la potencia final.

$$P_T = P_I - L_{dB} \quad (5)$$

Donde:

P_T : potencia final

P_I : potencial inicial

L_{dB} : pérdidas para cada una de las distancias

Para las perdidas en la primera distancia la potencia es:

$$\begin{aligned} &= 17\text{dBm} - 88.8\text{dB} \\ &= 71.8\text{dBm} \end{aligned}$$

Para las perdidas en la segunda distancia la potencia es:

$$\begin{aligned} &= 17\text{dBm} - 115.23\text{dB} \\ &= 98.23\text{dBm} \end{aligned}$$

Con base a los datos obtenidos en las pruebas de potencia y aplicando la ecuación (2), se observa cierta similitud en las pérdidas que entrega el XBee con las halladas usando el modelo de WALLS (Tabla 9).

Tabla 9. Comparación de datos obtenidos

Distancia	XBee	WALLS
25.74m	86,2	71.8
51.47m	104,4	98.23

Utilizando la configuración de los XBee en modo API se puede mitigar estas pérdidas, porque se puede utilizar dispositivos intermedios como puente para llegar desde un dispositivo lejano otro dispositivo que, por distancia o pérdidas debidas a la estructura del edificio, no llegan directamente.

5. Conclusiones

En este trabajo se propuso el diseño de un dispositivo de monitoreo y control de tiempo para controlar el encendido y apagado de dispositivos electrónicos de uso comercial. Se logró desarrollar un producto que cumple con características importantes en cuanto a facilidad de manejo, permitiendo controlar el tiempo de uso de televisores que son prestados en arrendamiento a usuarios.

El sistema mostró buen desempeño y robustez frente a errores de transmisión y recepción de datos a través de la comunicación inalámbrica, porque es capaz de diferenciar entre tramas dañadas y tramas con todos sus campos completos. Esto es excelente si se tiene en cuenta que es capaz de procesar correctamente todos los datos provenientes del nodo coordinador de la red (Xbee) que la utiliza.

Dado que la cantidad de nodos de una red conformada por módulos Xbee es una variable aleatoria, fue necesario desarrollar una lógica que permitiera adecuar su implementación a un número indeterminado de nodos de una red, dándole a la herramienta categoría de expansible frente a las necesidades de la aplicación.

Se identifica que las pérdidas que entregan las pruebas de potencia de los XBee S2 PRO, son mayores a las obtenidas al aplicar la fórmula, porque el modelo de paredes promedio no logra interactuar con los diversos componentes que pueden interferir el envío de la señal, aunque el modelo permite tener un acercamiento entre las pérdidas reales y las pérdidas teóricas.

Utilizando la topología malla, con la que trabaja las Redes Mesh, se mitigaron las pérdidas generadas en la transmisión de la señal, debido a que permite amplificar la señal enviada a un dispositivo final, mientras la señal se encuentra con otros dispositivos perteneciente a la red, que puedan retransmitirla actuando como un repetidor.

Como trabajo futuro, es necesario crear una interfaz de usuario que permita agregar mucha más interactividad al administrador en el uso del dispositivo.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el grupo de investigación Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales del Instituto Tecnológico Metropolitano en el marco del proyecto P14208.

Referencias

- [1] Alvarado, J. (2005). [Estudio de las principales técnicas de modulación para el canal de radio](#). Trabajo de grado. Universidad de las Américas Puebla.
- [2] Prieto, J. (2008). [Introducción a los sistemas de comunicación inalámbricos](#). Reporte. Universidad Oberta de Cataluña.
- [3] National Instruments (2009). [¿Qué es una Red de Sensores Inalámbricos?](#) Online [Mar 2016].
- [4] Castellanos, E. et al. (2005). [Análisis de propagación electromagnética en espacios cerrados: Herramienta software en Matlab para predicción y simulación](#). Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada 6(2), pp. 130-137.
- [5] Andrade, C. & Fabris, R. (2010). [IEEE 802.11 WLANs: A comparison on indoor coverage models](#). In Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Alberta, Canada.
- [6] Bligoo. [Xbee serie 2](#). Online [Mar 2016].
- [7] Granados, D. (2014). [Desarrollo de un prototipo inalámbrico de bajo costo para el monitoreo del flujo vehicular](#). Trabajo de grado. Universidad de Costa Rica.
- [8] CIKA. [Módulos Wireless ZigBee](#). Online [Mar 2016].
- [9] Navarro, J. (2008). [Control inalámbrico basado en redes inalámbricas de sensores mediante módulos XBee](#). Trabajo de grado. Universidad Politécnica de Cartagena.

29. Ajuste de curvas: Red neuronal (perceptrón multicapa) vs Regresión simbólica

Rafael Moreno P.

Universidad Libre, Cali - Colombia

1. Introducción

El ajuste de curvas [1, 2] es un método para encontrar una curva, que se aproxime a una serie de puntos dados previamente. En series temporales, tales como el comportamiento del dólar frente al peso colombiano, el comportamiento del caudal de un río durante un año o el crecimiento de las plantas durante una estación, tienen en común que el eje X es una unidad de tiempo y que para un valor de X solamente puede haber un valor de Y . Para el ajuste de curvas se utiliza la regresión no-lineal, que es un procedimiento determinístico. Puede probarse en WolframAlpha [3] o usando Microsoft Excel: se genera el gráfico de dispersión y luego se aplica la opción *Agregar línea de tendencia* [4].

Los métodos no-determinísticos, comparados en este estudio para el ajuste de curvas, son el perceptrón multicapa (un tipo de red neuronal) y la regresión simbólica (basado en los algoritmos genéticos). El primero se considera no-determinístico porque los pesos y los umbrales se inicializan con valores aleatorios, que después son ajustados con el algoritmo de propagación hacia atrás (*backpropagation*) [5]. La regresión simbólica [6] requiere una serie de números aleatorios para inicializar la población, seleccionar dos individuos al azar, determinar cuál tiene el mejor ajuste, copiar el mejor y variar esta copia en forma aleatoria. Se utiliza el método de los mínimos cuadrados para saber cuál de esos métodos tiene el mejor ajuste. Entre más cerca a cero, mejor es la aproximación.

2. El perceptrón multicapa

Para ajustarse a una serie temporal de puntos [7], la primera capa, de lectura, es de una neurona y la última, de salida, también de una neurona. Tendrá dos capas ocultas. Cada capa oculta tendrá cinco neuronas. El factor de aprendizaje es de 0,4. El método de ajuste será el algoritmo *backpropagation*. En la Figura 1 se observa el perceptrón utilizado.

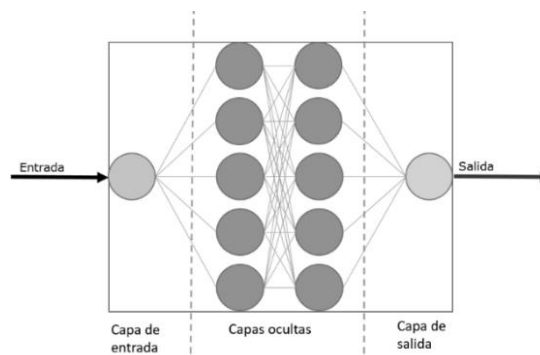


Figura 1. Perceptrón multicapa

3. La regresión simbólica

Con base en algoritmos genéticos, la regresión simbólica se inicia generando una población de N individuos. Cada uno es una ecuación del tipo $y = f(x)$ generada aleatoriamente. Por ejemplo:

$$y = (0.76 * x - \text{abs}(\cos(x * 0.112))) / 0.3417$$

$$y = (\text{sen}(0.76/x) + \text{abs}(\cos(x/0.112))) * (0.18/\text{abs}(\cos(x+0.21)))$$

Las ecuaciones están compuestas por operadores como suma, resta, multiplicación y división, la variable independiente x , constantes que son números generados al azar, uso de paréntesis y funciones como valores absolutos de seno y coseno. Un procedimiento, que combina velocidad y ajuste, consiste en generar aleatoriamente capas de piezas algebraicas, cada una formada por una función, un operando (variable o una constante), un operador y un segundo operando (variable o una constante). En la Figura 2 se puede observar un ejemplo.

Capa [0]	3-x	x-5	7/x	8*x	9-x	12/x	6/x
Capa [1]	[0]/x	7-x	[0]*x	[0]+8	x-7	[0]/2	4/[0]
Capa [2]	4-[1]	x/[0]	6*x	8-x	[0]+3	9*[1]	x-[1]
Capa [3]	3-[0]	8*x	x/[2]	[1]/[0]	9-[2]	x-[0]	[2]-x
Capa [4]	x/[3]	[3]/[1]	[1]*x	[2]/[3]	X-6	x-[2]	[3]/x

Figura 2. Piezas generadas aleatoriamente

Una pieza de la capa 0 se combina con alguna otra de la capa 1, que, a su vez, se combina con alguna otra de la capa 2, y así sucesivamente. Esta combinación de piezas genera la expresión algebraica que es el individuo, tal como se muestra en la Figura 3.

Capa [0]	3-x	x-5	7/x	8*x	9-x	12/x	6/x
Capa [1]	[0]/x	7-x	[0]*x	[0]+8	x-7	[0]/2	4/[0]
Capa [2]	4-[1]	x/[0]	6*x	8-x	[0]+3	9*[1]	x-[1]
Capa [3]	3-[0]	8*x	x/[2]	[1]/[0]	9-[2]	x-[0]	[2]-x
Capa [4]	x/[3]	[3]/[1]	[1]*x	[2]/[3]	X-6	x-[2]	[3]/x

Figura 3. Combinación de piezas

El individuo de la Figura 3 tendría las piezas:

$$\text{Pieza [0]} = 3 - x$$

$$\text{Pieza [1]} = 7 - x$$

$$\text{Pieza [2]} = 9 * [1]$$

$$\text{Pieza [3]} = [1] / [0]$$

$$\text{Pieza [4]} = x - [2]$$

La expresión del individuo sería:

$$y = x - [2]$$

$$y = x - 9 * [1]$$

$$y = x - 9 * (7 - x)$$

Se puede formar otro individuo usando el mismo arreglo bidimensional de piezas. La mutación del individuo es cambiar una pieza por otra de la misma capa.

4. Los ciclos

Para comparar ambos métodos, se toma como base los ciclos que requieren. En el caso del perceptrón multicapa, en cada ciclo, se evalúa toda la serie de puntos de entrada y se compara cada salida con la serie de puntos de salida esperada, posteriormente, se aplica el algoritmo de propagación. En el caso de la regresión simbólica, en cada ciclo se toman dos individuos de la población al azar, se evalúa su aproximación y el de más baja se elimina de la población, dejando un puesto vacante, y el de mejor aproximación se le genera una copia, a la que se le modifica una pieza al azar y luego ocupa la vacante libre.

En la regresión simbólica hay varios factores para ajustar. Para las pruebas se tomó una población de 1000 individuos, cada uno conformado por 10 piezas, y el arreglo bidimensional de piezas tiene 10.000 piezas por capa. El software se puede descargar del sitio: <http://darwin.50webs.com/Espanol/Capit07.htm>.

5. Las pruebas

Prueba uno: hay un grupo de 366 puntos que semejan el rebote de un objeto que, en vez de disminuir, aumenta. Hay cambios bruscos en orientación cuando hay corte en el eje X, como se muestra en la Figura 4.

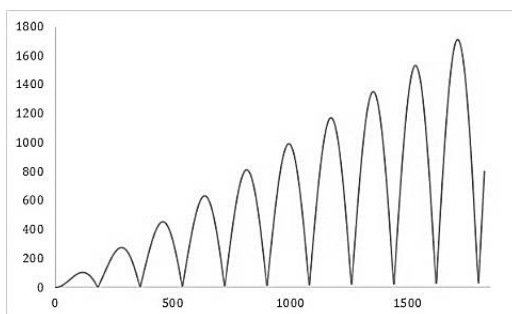


Figura 4. Primera prueba: Rebotes ascendentes

Prueba dos: hay un grupo de 360 puntos que simula una onda creciente (Figura 5) donde no hay cambios bruscos en la dirección.

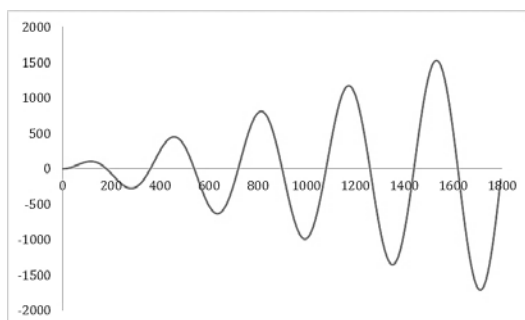


Figura 5. Segunda prueba: Incremento cíclico

Prueba tres: se toma el comportamiento dólar vs peso en 2015 (Figura 6).

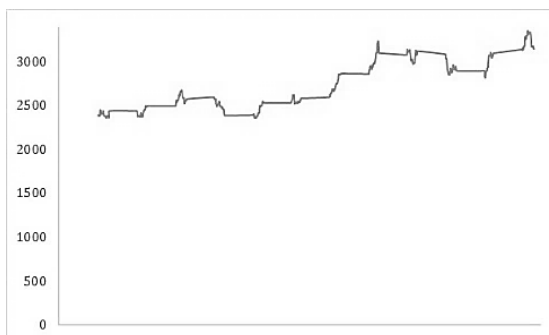


Figura 6. Tercera prueba: Comportamiento del dólar frente al peso

Los datos de entrada y de salida son normalizados entre 0 y 1, la razón es que el perceptrón multicapa trabaja con valores entre 0 y 1 por su función de activación. El perceptrón multicapa tendrá 5 neuronas en cada capa oculta. Cada prueba se ejecutará 10 veces y se usarán desde 10.000 hasta 100.000 ciclos en incrementos de 10.000

Se implementaron ambos métodos usando el lenguaje de programación C# en el entorno de desarrollo Visual Studio 2015 update 2 y el .NET framework 4.5.2, aplicación de consola, no hilos y usando la librería System.Diagnostics, para medir los tiempos. Ambos algoritmos están en el mismo proyecto. Sistema operativo Windows 10 pro (64 bits). Hardware es un Intel Core i7-2600 a 3.40Ghz y 8Gb RAM DDR-3.

6. Resultados

6.1 Primera prueba: Rebotes ascendentes

En la Tabla 1 y la Figura 7 se observan los resultados de la aproximación, y en la Tabla 2 y la Figura 8 los obtenidos con el tiempo. La regresión simbólica presenta mejor comportamiento que el perceptrón multicapa. El perceptrón multicapa tarda aproximadamente 4 veces más que la regresión simbólica.

Tabla 1. Aproximación. Entre más cerca a cero, mejor la aproximación

Ciclos	Perceptrón multicapa	Regresión Simbólica
10 000	11,166	13,309
20 000	12,640	11,831
30 000	8,421	9,802
40 000	14,394	11,155
50 000	8,992	11,412
60 000	7,917	8,650
70 000	8,443	7,686
80 000	9,030	7,140
90 000	11,638	9,285
100 000	10,679	7,756

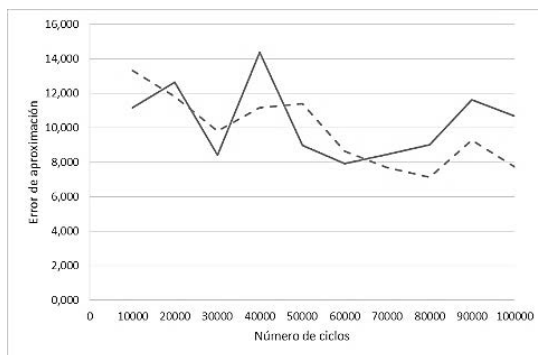


Figura 7. Regresión simbólica en línea punteada; perceptrón multicapa en línea continua

Tabla 2. Tiempo en primera prueba para ambos

Ciclos	Perceptrón multicapa	Regresión simbólica
10 000	9 020	2 429
20 000	18 107	4 654
30 000	27 017	6 750
40 000	36 163	9 002
50 000	45 496	11 087
60 000	54 729	13 444
70 000	63 768	15 336
80 000	73 381	17 737
90 000	81 973	20 006
100 000	89 622	21 637

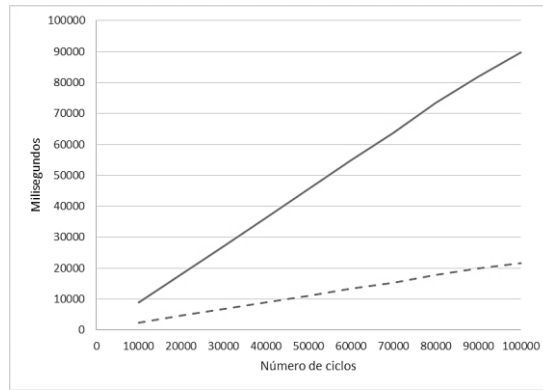


Figura 8. Regresión simbólica en línea punteada; perceptrón multicapa en línea continua

6.2 Segunda prueba

En la Tabla 3 y la Figura 9 se observan los resultados de la aproximación, y en la Tabla 4 y la Figura 10 obtenidos con el tiempo. El perceptrón es, en promedio, 7 veces mejor que la regresión simbólica y tarda aproximadamente 4 veces más.

Tabla 3. Aproximación. Entre más cerca a cero, mejor la aproximación

Ciclos	Perceptrón multicapa	Regresión Simbólica
10 000	2,607	14,001
20 000	1,621	11,702
30 000	1,218	12,332
40 000	1,397	10,673
50 000	1,524	9,619
60 000	0,866	7,048
70 000	0,996	10,073
80 000	0,791	7,276
90 000	0,963	6,247
100 000	2,043	6,189

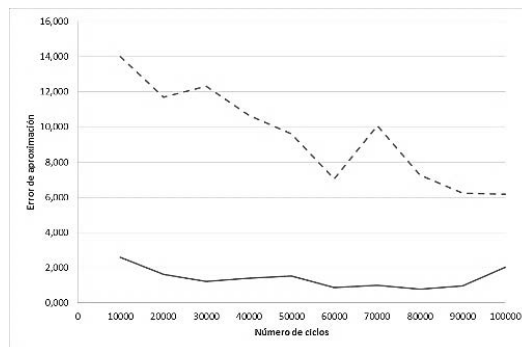


Figura 9. Regresión simbólica en línea punteada; perceptrón multicapa en línea continua

Tabla 4. Tiempo en segunda prueba para ambos

Ciclos	Perceptrón multicapa	Regresión simbólica
10 000	8 909	2 408
20 000	17 901	4 662
30 000	26 621	6 798
40 000	35 548	8 988
50 000	45 021	11 169
60 000	54 234	13 491
70 000	62 724	15 718
80 000	73 012	17 719
90 000	81 596	20 103
100 000	90 564	21 961

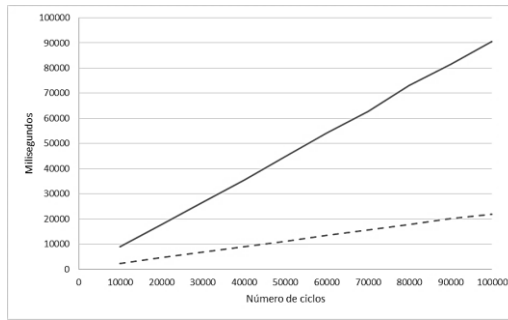


Figura 10. Regresión simbólica en línea punteada; perceptrón multicapa en línea continua

6.3 Tercera prueba

En la Tabla 5 y la Figura 11 se observan los resultados de la aproximación, y en la Tabla 6 y la Figura 12 los obtenidos con el tiempo. El perceptrón multicapa es en promedio 2,7 veces mejor que la regresión simbólica.

Tabla 5. Entre más cerca a cero, mejor la aproximación

Ciclos	Perceptrón multicapa	Regresión Simbólica
10 000	1,550	4,419
20 000	1,379	3,714
30 000	1,235	3,840
40 000	1,213	3,669
50 000	1,139	3,060
60 000	1,191	3,390
70 000	1,177	2,792
80 000	1,146	2,625
90 000	1,096	2,888
100 000	1,091	2,596

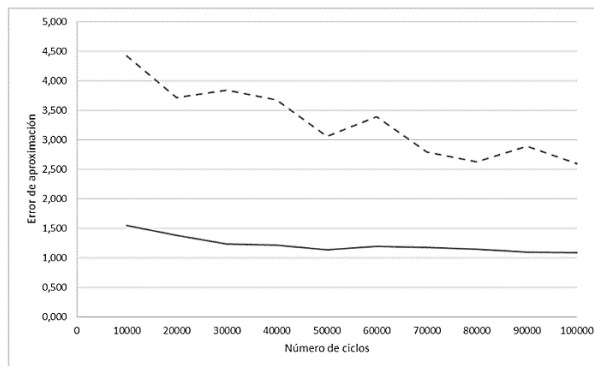


Figura 11. Regresión simbólica en línea punteada; perceptrón multicapa en línea continua

Tabla 6. Tiempo en tercera prueba para ambos

Ciclos	Perceptrón multicapa	Regresión simbólica
10 000	8 531	2 291
20 000	17 327	4 493
30 000	27 005	6 729
40 000	35 918	8 810
50 000	45 152	11 095
60 000	54 325	13 467
70 000	63 502	15 636
80 000	72 379	17 843
90 000	82 152	20 078
100 000	91 603	21 834

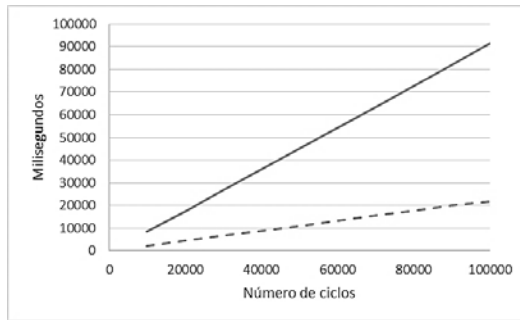


Figura 12. Regresión simbólica en línea punteada; perceptrón multicapa en línea continua

7. Mejorando el perceptrón multicapa

7.1 Primera prueba

En la Tabla 7 y la Figura 13 se observan los resultados de la aproximación, y en la Tabla 8 y la Figura 14 los obtenidos con el tiempo y aumentando a 8 neuronas en cada capa oculta. La mejora es evidente al usar un mayor número de neuronas, pero, en cuanto al tiempo, el resultado es diferente, porque el costo fue doblar el tiempo para el perceptrón multicapa.

Tabla 7. Perceptrón multicapa con más neuronas. Entre más cerca a cero, mejor la aproximación

Ciclos	Perceptrón: 8 neuronas	Perceptrón: 5 neuronas	Regresión Simbólica
10 000	12,265	11,166	13,316
20 000	14,264	12,640	12,094
30 000	7,473	8,421	10,167
40 000	5,251	14,394	11,337
50 000	4,069	8,992	9,832
60 000	6,295	7,917	5,536
70 000	4,617	8,443	8,628
80 000	3,686	9,030	7,648
90 000	3,943	11,638	9,936
100 000	3,275	10,679	5,837

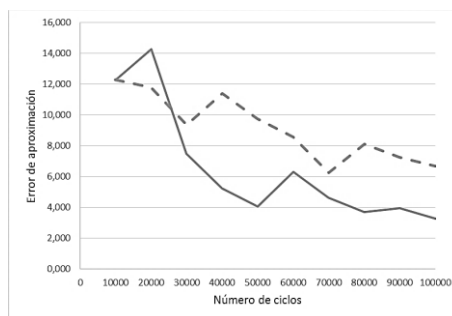


Figura 13. Regresión simbólica en línea punteada; perceptrón multicapa en línea continua

Tabla 8. Tiempo en primera prueba

Ciclos	Perceptrón: 8 neuronas	Perceptrón: 5 neuronas	Regresión simbólica
10 000	19 637	9 020	2 429
20 000	39 226	18 107	4 654
30 000	58 953	27 017	6 750
40 000	79 289	36 163	9 002
50 000	98 139	45 496	11 087
60 000	117 739	54 729	13 444
70 000	140 087	63 768	15 336
80 000	162 896	73 381	17 737
90 000	182 675	81 973	20 006
100 000	201 539	89 622	21 637

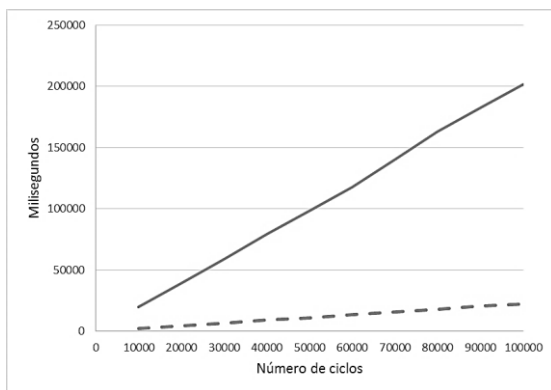


Figura 14. Regresión simbólica en línea punteada; perceptrón multicapa en línea continua

7.2 Segunda Prueba

En la Tabla 9 y la Figura 15 se observan los resultados de la aproximación, y en la Tabla 10 y la Figura 16 los obtenidos con el tiempo, donde se observa que en la aproximación las mejora es evidente.

Tabla 9. Entre más cerca a cero es mejor la aproximación

Ciclos	Perceptrón: 8 neuronas	Perceptrón: 5 neuronas	Regresión Simbólica
10 000	1,126	2,607	14,001
20 000	0,602	1,621	11,702
30 000	0,599	1,218	12,332
40 000	0,905	1,397	10,673
50 000	0,272	1,524	9,619
60 000	0,273	0,866	7,048
70 000	0,333	0,996	10,073
80 000	0,378	0,791	7,276
90 000	0,689	0,963	6,247
100 000	0,568	2,043	6,189

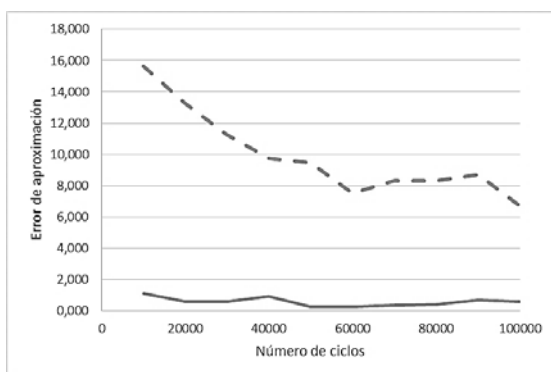


Figura 15. Regresión simbólica en línea punteada; perceptrón multicapa en línea continua

Tabla 10. Tiempo en segunda prueba

Ciclos	Perceptrón: 8 neuronas	Perceptrón: 5 neuronas	Regresión simbólica
10 000	19296	8 909	2 408
20 000	38655	17 901	4 662
30 000	57654	26 621	6 798
40 000	78346	35 548	8 988
50 000	97225	45 021	11 169
60 000	116926	54 234	13 491
70 000	139122	62 724	15 718
80 000	162164	73 012	17 719
90 000	179464	81 596	20 103
100 000	200738	90 564	21 961

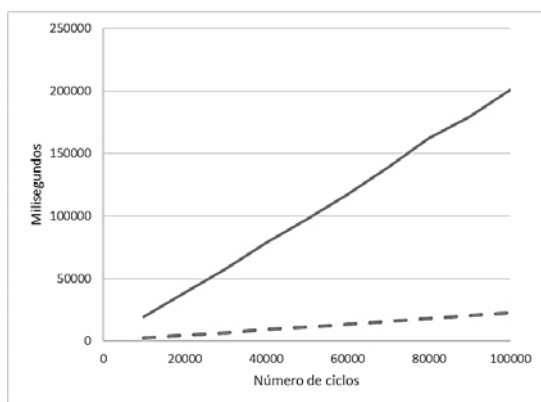


Figura 16. Regresión simbólica en línea punteada; perceptrón multicapa en línea continua

7.3 Tercera Prueba

En la Tabla 11 y la Figura 17 se observan los resultados de la aproximación, y en la Tabla 12 y la Figura 18 los obtenidos con el tiempo.

Tabla 11. Entre más cerca a cero es mejor la aproximación

Ciclos	Perceptrón: 8 neuronas	Perceptrón: 5 neuronas	Regresión Simbólica
10 000	1,565	1,550	4,419
20 000	1,272	1,379	3,714
30 000	1,209	1,235	3,840
40 000	1,182	1,213	3,669
50 000	1,162	1,139	3,060
60 000	1,165	1,191	3,390
70 000	1,122	1,177	2,792
80 000	1,111	1,146	2,625
90 000	1,119	1,096	2,888
100 000	1,108	1,091	2,596

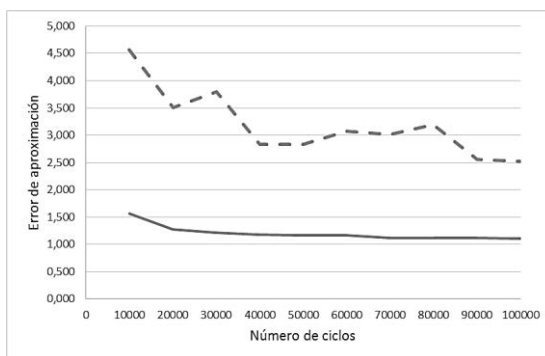


Figura 17. Regresión simbólica en línea punteada; perceptrón multicapa en línea continua

Tabla 12. Tiempo en tercera prueba

Ciclos	Perceptrón: 8 neuronas	Perceptrón: 5 neuronas	Regresión simbólica
10 000	19 539	8 531	2 291
20 000	39 275	17 327	4 493
30 000	58 288	27 005	6 729
40 000	79 938	35 918	8 810
50 000	101 950	45 152	11 095
60 000	117 948	54 325	13 467
70 000	139 911	63 502	15 636
80 000	160 524	72 379	17 843
90 000	183 029	82 152	20 078
100 000	200 461	91 603	21 834

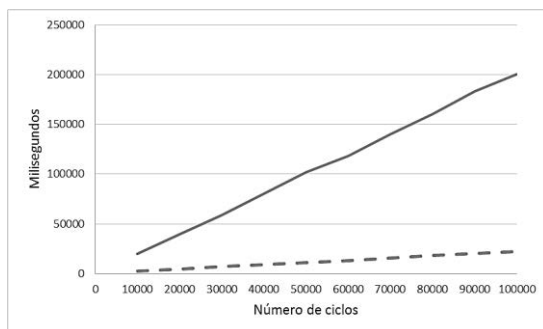


Figura 18. Regresión simbólica en línea punteada; perceptrón multicapa en línea continua

8. Mejorando la Regresión Simbólica

Esta técnica tiene diversos puntos para configurarse: tamaño de la población, número de piezas para cada individuo y por capa. El algoritmo puede variar para tener otras funciones u operadores y tomar tres o más individuos; otro cambio es cómo seleccionarlos en la población, cómo evaluar toda la población y tomar solamente a los mejores y eliminar los peores. A continuación, se hacen las pruebas con el mismo algoritmo, no se cambia la configuración y se aumenta el número de ciclos hasta un millón (de 100.000 en 100.000), para aproximarse al tiempo que tomó el perceptrón de 8 neuronas.

8.1 Primera Prueba

En la Tabla 13 se observan los resultados, donde la regresión simbólica tiene una aproximación notablemente mejor que el perceptrón multicapa.

Tabla 13. Entre más cerca a cero es mejor la aproximación

Ciclos	Regresión Simbólica	Perceptrón: 8 neuronas
100 000	5,837	12,265
200 000	4,187	14,264
300 000	6,897	7,473
400 000	2,944	5,251
500 000	3,961	4,069
600 000	2,671	6,295
700 000	1,151	4,617
800 000	0,638	3,686
900 000	3,306	3,943
1000 000	1,781	3,275

8.2 Segunda Prueba

En la Tabla 14 se observan los resultados, donde la regresión simbólica no logró una aproximación similar a la del perceptrón.

Tabla 14. Entre más cerca a cero es mejor la aproximación

Ciclos	Regresión Simbólica	Perceptrón: 8 neuronas
100 000	8,404	1,126
200 000	5,905	0,602
300 000	5,388	0,599
400 000	4,510	0,905
500 000	3,851	0,272
600 000	4,048	0,273
700 000	4,642	0,333
800 000	2,882	0,378
900 000	5,369	0,689
1000 000	4,511	0,568

8.3 Tercera Prueba

En la Tabla 15 se observan los resultados, donde la regresión simbólica no logró una aproximación similar a la del perceptrón.

Tabla 15. Entre más cerca a cero es mejor la aproximación

Ciclos	Regresión Simbólica	Perceptrón: 8 neuronas
100 000	2,898	1,565
200 000	2,578	1,272
300 000	2,377	1,209
400 000	2,229	1,182
500 000	2,285	1,162
600 000	2,082	1,165
700 000	1,982	1,122
800 000	2,385	1,111
900 000	2,204	1,119
1000 000	1,902	1,108

9. El detalle en cada prueba

Los resultados de las tablas anteriores son un promedio de los resultados de la ejecución de los algoritmos diez veces cada uno. Se nota que varían entre muy cercanos a aproximación cero y muy lejos. La Tabla 16 muestra las 10 ejecuciones en la primera prueba con 100 000 ciclos.

Tabla 16. Resultados en detalle del perceptrón multicapa y la regresión simbólica

Ejecución	Perceptrón: 8 neuronas	Regresión Simbólica
1	1,714	4,653
2	0,938	3,606
3	0,954	7,867
4	1,487	12,108
5	15,088	6,130
6	1,016	4,398
7	6,425	13,141
8	0,888	7,060
9	1,754	7,500
10	2,488	0,295

En las columnas que muestran la aproximación los datos varían ampliamente. Si en lugar de los promedios de las ejecuciones se toma la mejor ejecución de cada algoritmo, los resultados para cada prueba serían los que se muestran en las Tablas 17 a 19.

Tabla 17. Primera prueba. Mejor comportamiento Regresión simbólica

Ciclos	Perceptrón: 8 neuronas	Perceptrón: 5 neuronas	Regresión Simbólica
10 000	9,272	7,915	2,100
20 000	7,385	5,065	5,276
30 000	2,305	4,986	0,691
40 000	1,559	4,177	3,112
50 000	1,387	3,187	0,669
60 000	0,965	3,639	0,206
70 000	1,706	4,231	0,737
80 000	0,779	2,362	0,883
90 000	0,624	2,577	0,428
100 000	0,888	2,412	0,295
Promedio	2,687	2,362	1,440

Tabla 18. Segunda prueba. Perceptrón multicapa de 8 neuronas muestra mejor comportamiento

Ciclos	Perceptrón: 8 neuronas	Perceptrón: 5 neuronas	Regresión Simbólica
10 000	0,382	1,027	11,525
20 000	0,170	0,333	9,751
30 000	0,234	0,185	3,824
40 000	0,158	0,375	5,693
50 000	0,147	0,389	4,661
60 000	0,126	0,200	4,071
70 000	0,094	0,456	3,077
80 000	0,103	0,206	0,679
90 000	0,036	0,246	3,593
100 000	0,096	0,159	4,221
Promedio	0,155	0,358	5,109

Tabla 19. Tercera prueba. El perceptrón multicapa de 8 neuronas es mejor

Ciclos	Perceptrón: 8 neuronas	Perceptrón: 5 neuronas	Regresión Simbólica
10 000	1,410	1,397	3,197
20 000	1,219	1,249	2,643
30 000	1,070	1,161	2,589
40 000	1,031	1,142	2,150
50 000	1,034	0,735	2,094
60 000	1,075	1,145	1,872
70 000	1,027	1,081	2,123
80 000	1,016	1,082	2,015
90 000	0,971	1,022	1,982
100 000	0,982	0,860	1,978
Promedio	1,084	1,087	2,264

Buscando el mejor en cada conjunto de pruebas, el perceptrón fue mayoritariamente mejor, pero, para encontrar el mejor, habría que sumar los tiempos de las ejecuciones, en lo que el costo sería alto, tal como se observa en las Tablas 20 a 22 para cada prueba.

Tabla 20. Tiempos Primera prueba

Ciclos	Perceptrón: 8 neuronas	Perceptrón: 5 neuronas	Regresión simbólica
10 000	196 373	90 195	24 161
20 000	392 260	181 068	45 542
30 000	589 530	270 174	67 382
40 000	792 892	361 632	89 587
50 000	981 387	454 963	110 980
60 000	1 177 386	547 293	133 581
70 000	1 400 868	637 682	156 606
80 000	1 628 957	733 806	181 106
90 000	1 826 748	819 725	204 664
100 000	2 015 385	896 217	222 814

Tabla 21. Tiempos Segunda prueba

Ciclos	Perceptrón: 8 neuronas	Perceptrón: 5 neuronas	Regresión simbólica
10 000	192 964	89 093	24 082
20 000	386 553	179 011	46 218
30 000	576 538	266 213	67 035
40 000	783 463	355 483	90 790
50 000	972 254	450 210	111 304
60 000	1 169 259	542 337	132 303
70 000	1 391 219	627 236	159 167
80 000	1 621 641	730 121	182 266
90 000	1 794 643	815 959	202 575
100 000	2 007 380	905 641	228 666

Tabla 22. Tiempos Tercera prueba

Ciclos	Perceptrón: 8 neuronas	Perceptrón: 5 neuronas	Regresión simbólica
10 000	195 386	85 311	23 928
20 000	392 754	173 271	45 897
30 000	582 881	270 053	68 105
40 000	799 379	359 184	90 701
50 000	1 019 499	451 522	111 805
60 000	1 179 482	543 253	132 200
70 000	1 399 111	635 022	154 223
80 000	1 605 240	723 791	180 668
90 000	1 830 290	821 521	204 666
100 000	2 004 613	916 031	223 321

En las tres pruebas se aprecia el alto consumo de tiempo del perceptrón multicapa de 8 neuronas, frente al de regresión simbólica.

10. Información requerida por cada algoritmo

Por definición, el perceptrón multicapa utilizado en las pruebas hace uso de pesos y umbrales, que son números de tipo *double*. La cantidad para el perceptrón multicapa con 8 neuronas en las dos capas ocultas sería:

- Capa 1 se conecta con capa 2: 8 pesos
- Capa 2 con 8 neuronas: 8 umbrales
- Capa 2 se conecta con capa 3: 64 pesos
- Capa 3 con 8 neuronas: 8 umbrales
- Capa 3 se conecta con capa 4: 8 pesos
- Capa 4 con 1 neurona: 1 umbral

En total requiere $8+8+64+8+8+1 = 97$ valores de tipo *double* que, en C#, equivaldría a $97*64\text{bits} = 6208$ bits. La regresión simbólica hace uso de piezas y cada pieza tiene:

- Una función. Entero. 32 bits
- Variable A. Entero. 32 bits
- Constante. Doble. 64 bits
- Operador. Entero. 32 bits
- Variable B. Entero. 32 bits
- Tipo de pieza. Entero. 32 bits

Una pieza requiere 224 bits y, como una expresión está compuesta de 10 piezas en las pruebas, entonces ocuparía 2240 bits. En cada capa oculta, el perceptrón multicapa de 8 neuronas requiere casi 3 veces más almacenamiento que la regresión simbólica. Cabe aclarar que la implementación en C# fue con el tipo de datos *entero* por facilidad en la codificación, pero, en un examen más detallado del algoritmo, la pieza podría reemplazar el entero por el tipo de datos *char*, que ocupa 8 bits, y el conteo de cada pieza sería:

- Una función. Char. 8 bits
- Variable A. Char. 8 bits
- Constante. Doble. 64 bits
- Operador. Char. 8 bits
- Variable B. Char. 8 bits
- Tipo de pieza. Char. 8 bits

Una pieza requeriría 112 bits, entonces, la expresión que tiene 10 piezas usaría 1120 bits. En este caso, el perceptrón multicapa de 8 neuronas requeriría 5,5 veces más información que la regresión simbólica. Elevando de 10 a 30 piezas la expresión

matemática en la regresión simbólica, se repiten las pruebas para ver si el aumento en información mejora la aproximación. Los resultados para cada prueba se aprecian en las Tablas 23 a 25.

Tabla 23. Primera prueba. Aproximación regresión simbólica con 30 piezas

Ciclos	Regresión: 30 piezas	Regresión: 10 piezas
10 000	13,426	13,309
20 000	12,215	11,831
30 000	10,229	9,802
40 000	10,169	11,155
50 000	10,430	11,412
60 000	10,724	8,650
70 000	9,301	7,686
80 000	7,948	7,140
90 000	10,381	9,285
100 000	8,674	7,756

Tabla 24. Segunda prueba. Aproximación regresión simbólica con 30 piezas

Ciclos	Regresión: 30 piezas	Regresión: 10 piezas
10 000	12,676	14,001
20 000	12,503	11,702
30 000	10,725	12,332
40 000	10,825	10,673
50 000	8,921	9,619
60 000	9,402	7,048
70 000	7,823	10,073
80 000	6,135	7,276
90 000	9,684	6,247
100 000	7,423	6,189

Tabla 25. Tercera prueba. Aproximación regresión simbólica con 30 piezas

Ciclos	Regresión: 30 piezas	Regresión: 10 piezas
10 000	4,528	4,419
20 000	3,768	3,714
30 000	3,139	3,840
40 000	3,576	3,669
50 000	3,245	3,060
60 000	3,036	3,390
70 000	3,147	2,792
80 000	2,868	2,625
90 000	2,831	2,888
100 000	2,572	2,596

En las tres pruebas se triplicó el tiempo usado por la regresión simbólica de 30 piezas, en comparación con el tiempo usado por la regresión simbólica de 10 piezas.

11. Conclusiones

Al aumentar el número de neuronas en las capas ocultas, el perceptrón multicapa mostró ser mejor ajuste de curvas que la regresión simbólica, pero, asumiendo el costo de aumentar el tiempo de procesamiento. Este aumento de tiempo es lineal (no exponencial, ni potencial), por lo que es aceptable.

Por otro lado, la ventaja de la regresión simbólica es ser más rápida y requerir menos almacenamiento, pero su ajuste no alcanza al obtenido por el perceptrón, aunque se incremente el número de ciclos, número de piezas y, llegado al caso, consume más tiempo

que el perceptrón. Se debe considerar que hay varias partes que se pueden mejorar, incluyendo el mismo algoritmo, por lo que no se puede asegurar que esta técnica de ajuste de curvas deba desecharse.

Referencias

- [1] Gurle, K. (2003). [Numerical Methos Lecture 5 – Curve Fitting Techniques](#). CGN-3421 computer methods.
- [2] Arlinghaus, S. (1994). [Practical handbook of curve fitting](#). Boca Raton: CRC Press.
- [3] <http://www.wolframalpha.com/input/?i=curve+fitting>. [Nov 2015].
- [4] Microsoft Office (2016). [Agregar una línea promedio móvil o de tendencia a un gráfico](#). Online [Dec 2015].
- [5] Sathyanarayana, S. (2014). [A Gentle Introduction to Backpropagation](#). Numeric Insight, Inc.
- [6] Zelinka, I. (2004). [Symbolic regression - An overview](#). Tomas Bata University Zlin. Faculty of Technology Institute of Information Technologies.
- [7] Martínez, C. (2011). [Problemas abiertos en la aplicación de la Regresión Simbólica en el pronóstico de series de tiempo](#). Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia.
- [8] Borges, C. & Montaña, J. (2011). [Ajuste de Curvas: Problemas de Regresión](#). Departamento de Matemáticas, Estadística y Computación. Universidad de Cantabria.
- [9] Moreno, R. (2012). [Simulación: Conceptos y Programación](#). Cali: Universidad Libre.
- [10] Nicolas, P. (2013). [Data Modeling using Symbolic Regression](#). Online [Feb 2016].
- [11] García, J. (2010). [Informe Final del proyecto Regresión Simbólica de Funciones Booleanas Usando Evolución Gramatical](#). Universidad del Quindío.

30. Comparación de modelos y estándares de evaluación de calidad para una plataforma de aprendizaje virtual

Ana Álvarez C.¹

Andrea Alarcón A.²

Mauro Callejas C.³

¹Asesoftware. Bogotá, Colombia

^{2,3}Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia

1. Introducción

Las plataformas de aprendizaje virtual hacen parte de una tendencia de la educación, presente desde mediados de los años noventa [1], que le permiten al estudiante, a través del servicio de internet, gestionar o complementar su proceso de aprendizaje mediante el desarrollo de cursos expuestos en dichas plataformas. Una cuestión importante en el proceso es que las herramientas dispuestas para la adquisición del conocimiento cuenten con ciertos criterios de calidad.

Actualmente, existen diversos modelos y estándares que permiten evaluar la calidad del software, por lo que el objetivo de esta investigación es identificar cuáles de los encontrados se ajustan para evaluar una plataforma de aprendizaje virtual, y de esta manera contribuir al mejoramiento de los procesos de enseñanza-aprendizaje. En la literatura se encuentran modelos clásicos como el de Bohem, McCall y Gilb [2], entre otros, los cuales han sido base de nuevas propuestas como las de Dromey, FURPS, GQM, SATC, WebQEM, ISO 9126, IEEE-Std 1061-1998, principalmente. Los modelos y estándares de evaluación de calidad del software, presentan características y estructuras genéricas que permiten realizar comparaciones documentales para identificar el más apropiado para contextos académicos. Estas comparaciones se realizan utilizando las siete etapas del Método de Estudio de Similitud entre Modelos y Estándares (MESME) [3], fundamentando en el estudio de los criterios de cada modelo.

Este capítulo presenta, en primera instancia, algunos de los principales referentes teóricos utilizados en la investigación; posteriormente, se describe la metodología de comparación utilizada y se detalla su aplicación, de tal manera que se identifican las características de los modelos y estándares seleccionados para el estudio. Finalmente, se presentan los resultados y hallazgos de la investigación, en los que el modelo WebQEM, en conjunto con las características de calidad del software propuestas en ISO 9126, presentan la mejor adaptabilidad a la evaluación de plataformas de aprendizaje virtual, con cuyas generalidades se propone una estrategia de implementación.

2. Referentes teóricos

En este apartado se presenta una revisión a los conceptos en los que se fundamenta la temática, principalmente para identificar el concepto *e-learning* y la plataforma virtual de aprendizaje y sus características representativas. También se define calidad del software y las generalidades de los modelos, normas y estándares de evaluación de calidad de estos productos.

2.1 *E-learning*

Este concepto, llevado a su término más simple, se concibe como aprendizaje electrónico, aprendizaje a distancia, aprendizaje en línea, aula virtual, entre otras. El foco central del *e-learning* es guiar el proceso enseñanza-aprendizaje mediante el uso de una

plataforma que utiliza servicios de internet, que le permite al estudiante aprender de manera autónoma contenidos pertenecientes a un curso o temática. Rosemberg [4] lo define como el uso de tecnologías Internet para la entrega de un amplio rango de soluciones que mejoran el conocimiento y el rendimiento. Para él, se basa en tres criterios fundamentales: 1) trabajo en red, 2) interacción con el usuario a través de computadores, y 3) implementación de otros paradigmas de capacitación complementarios a los tradicionales.

2.2 Plataforma virtual *e-learning*

Estas plataformas se convierten en herramientas tecnológicas de apoyo a la enseñanza virtual y permiten compartir recursos didácticos estructurados en cursos en línea, acompañando el proceso desde la elaboración de contenidos hasta la evaluación de adquisición de habilidades y competencias adquiridas en el proceso formativo [5]. Con estas plataformas los estudiantes pueden, además de encontrar material en diversos formatos, presentar actividades acerca de las temáticas abordadas e incluso interactuar con los tutores y/o estudiantes en el aula virtual, de igual manera, les permiten ser autónomos con su tiempo y de paso administrarlo.

2.3 Características de una plataforma de aprendizaje

Las plataformas virtuales de aprendizaje deben cumplir funcionalmente con algunos componentes básicos y comunes [5], de tal manera que su uso conduzca a una transmisión de conocimientos de manera armoniosa, a partir de características como contenido, usuarios, actividades, permisos, organización y estadísticas.

2.4 Calidad de software

Se define como la concordancia con los requisitos funcionales y de rendimiento explícitamente establecidos, con los estándares de desarrollo explícitamente documentados y con las características implícitas que se espera de todo software desarrollado profesionalmente [6], con el fin de garantizar que el producto final responda a las necesidades propuestas y tenga el mínimo de errores posibles. Los atributos de calidad del software basado en web son fiabilidad, usabilidad, seguridad, disponibilidad, mantenibilidad, escalabilidad [7].

2.5 Indicadores de calidad de plataformas virtuales de aprendizaje

Al seleccionar una plataforma de aprendizaje para su implementación en un proceso académico, es necesario identificar algunos indicadores de calidad, para contar con criterios definidos que perfilarán la elección, evitando la subjetividad en el proceso. Entre estos criterios están: calidad técnica, calidad didáctica, calidad comunicacional, calidad organizativa y creativa [8, 9]. Otra clasificación, propuesta por Le Préau [10], clasifica los criterios de calidad en cuatro niveles: 1) técnico, 2) pedagógico, 3) de servicio y 4) global; por su parte, Sangra [11] identifica cinco criterios de calidad en universidades virtuales: 1) oferta normativa, 2) organización y tecnología, 3) materiales, 4) docencia y 5) creación de conocimiento. En esencia, estos indicadores son equivalentes, por lo que se consideran elementos fundamentales para determinar el proceso de comparación entre los modelos seleccionados en esta investigación.

3. Criterios de calidad de plataformas de aprendizaje virtual a nivel educativo

La educación a distancia a través de herramientas en línea ha sido en los últimos años una tendencia en la educación, facilitando a los estudiantes el acceso a contenidos y

aprendizaje a través de estas herramientas, pero es importante resaltar la importancia de la calidad que deben brindar, porque no solamente se orientan a gestionar un curso con una temática y asumir que está bien estructurado, sino que deben tener en cuenta algunos criterios que permitan validar que el curso realmente aporta conocimiento al estudiante. Victor Burgos [25] propone unos criterios de evaluación a nivel del proceso *e-learning* con respecto a tres fases del mismo: diseño, ejecución y evaluación; además, en cada una de ellas se relacionan procesos, acciones y criterios de evaluación, tal como se observa en las Tablas 1, 2 y 3.

Tabla 1. Fase de Diseño

Proceso	Acción	Criterio Evaluación
Definir objetivos acción formativa	Redactar objetivos de acuerdo a la estrategia de la institución y a las necesidades identificadas	Frases cortas y concisas que expresen los objetivos a conseguir
Definir objetivos de aprendizaje de los estudiantes	Redactar objetivos de acuerdo al perfil y el interés del estudiante	Compromiso de cada uno de los participantes con sus objetivos Tabla de relación entre los objetivos de aprendizaje y los resultados esperados
Determinar la factibilidad de que el curso se pueda ofrecer en la modalidad <i>e-learning</i>	Realizar análisis para identificar si <i>e-learning</i> puede alcanzar los objetivos del curso	Tabla comparativa de ventajas e inconvenientes de las modalidades <i>e-learning</i> frente a otras opciones de formación
Determinar beneficios esperados de la acción formativa	Exponer los beneficios esperados Establecer resultados esperados	Lista de beneficios concretos esperados de los participantes Lista de logros esperados por la organización educativa

Tabla 2. Fase de Ejecución

Proceso	Acción	Criterio Evaluación
Determinar costos de acción formativa	Presupuestar costos tanto para la institución como para los usuarios	Presupuesto de costos Calculo del ROI
Desarrollo de la acción formativa	Desarrollar curso de acuerdo a la planificación	Información sobre el proceso a participantes y a la dirección de la entidad educativa Corrección de errores de desviación

Tabla 3. Fase de Evaluación

Proceso	Acción	Criterio Evaluación
Evaluación de la acción formativa	Evaluar la acción a través de los artefactos realizados	Análisis y difusión de resultados
Evaluar diseño e implementación	Valorar mejoras a realizar en el diseño de futuras acciones formativas	Lista de elementos a incorporar, mantener o evitar en futuros diseños de acciones formativas

Con relación a estas fases, se encuentra dos estrategias de evaluación inmersas: 1) a nivel de modalidad y 2) a nivel de programa. La primera define criterios de evaluación clasificados en tres categorías: 1) actores de la formación, en la cual se involucra a los estudiantes que se dirige el curso, conocimiento, dominio y apropiación en la temática por parte de los formadores involucrados en el diseño del programa, y personal de gestión o implementación del programa, 2) medios para el diseño y desarrollo del programa, fundamentalmente costos e infraestructura, y 3) perfil metodológico, forjado a partir de la adaptación de la tecnología para el desarrollo del programa.

En la evaluación a nivel del programa, se plantea el uso del modelo TETRA (Proyecto de aproximación de la tele-formación a PYMES), que plantea una estructura de evaluación

de acuerdo con los siguientes componentes: 1) proceso de evaluación, que se sub-divide en autoevaluación (realizada por un comité interno) y evaluación externa (realizada por un comité externo), 2) indicadores, dirigidos a componentes del programa y al diseño e implementación de los mismos, los cuales incluyen la información relacionada en la Tabla 4, y 3) finalidades, las cuales permiten extraer información para identificar posibles mejoras en el proceso.

Tabla 4. Indicadores dirigidos a componentes

Componente	Descripción
Infraestructuras	Características y formación de los artefactos de tele-formación
Materiales de formación	Adecuación de materiales del estudiante, profesor y coordinador
Organización	Adaptación de funcionalidad del programa
Contenidos y niveles	Adecuación pedagógica del programa de acuerdo con los contenidos
Profesorado	Adecuación de la actuación del tutor
Personal de apoyo	Adecuación de los técnicos de apoyo al programa
Satisfacción del estudiante	En cuanto al desarrollo del programa y la consecución de sus objetivos
Adaptación	De la formación en el lugar de trabajo

La calidad de un curso telemático se presenta en tres dimensiones y de acuerdo con Santoveña [26], cada una está conformada por criterios que permiten su evaluación:

- El factor asociado a la *calidad general*, que se relaciona con la interpretación, importancia, eficacia y eficiencia, versatilidad, manejabilidad, independencia y autonomía, atractividad e interactividad del curso.
- La *calidad didáctica y metodológica*, que incluye los materiales disponibles, características de los contenidos didácticos, calidad en el uso de las herramientas y la capacidad psicopedagógica.
- La *calidad técnica*, que se subdivide en calidad técnica general, asociada a los elementos multimedia, programación, navegabilidad, acceso y diseño, y la calidad técnica en el uso de las herramientas.

Los trabajos académicos sugieren verificar la completitud de los cursos *e-learning* en cuanto a prácticas, ejercicios, actividades evaluativas, actualización, claridad de los objetivos del curso, aplicación de una metodología de desarrollo del curso y que en lo posible involucre casos y problemas reales. Las practicas se deben basar en problemas de la vida real y llevar a cabo la retroalimentación respectiva con el grupo de estudiantes, fomentando de esta manera la motivación en cada participante.

3.1 Modelos de evaluación de calidad en Objetos de Aprendizaje

Los objetos de aprendizaje (OA) son un conjunto de recursos digitales de diferentes tipos (textos, documentos, imágenes, videos, entre otros) que tienen un propósito educativo, por lo cual es importante que sean útiles para el proceso de aprendizaje y le permitan al estudiante la adquisición de conocimiento en su proceso. Los OA deben estar enfocados en la temática del curso que se imparte, convirtiéndose en un puente de conocimiento para el estudiante debido a que es quien interactúa con ellos. Si este recurso cuenta con la calidad adecuada el proceso de aprendizaje será exitoso, es por esto que se debe validar la calidad de los OA con los que trabaja una plataforma de aprendizaje virtual, por lo que es necesarios conocer algunos métodos de evaluación que permiten alcanzar esa calidad:

1. *LORI*: Es un modelo enfocado a la evaluación de objetos de aprendizaje teniendo en cuenta nueve variables: calidad de contenidos, adecuación de los objetivos de

aprendizaje, *feedback* y adaptabilidad, motivación, diseño y representación, usabilidad, accesibilidad, reusabilidad y cumplimiento de estándares. Cada una se valora en una escala de 1 a 5 y cuando no es relevante para el tipo de objeto se asigna No Aplica (NA) [27].

2. *MERLOT*: Es un repositorio de objetos de calidad encargado de evaluar los objetos y publicarlos. La valoración está dirigida a tres aspectos: calidad de contenido, efectividad potencial y facilidad de uso. De igual forma que LORI, valora en una escala de 1 a 5 y el resultado final será el promedio de dichas calificaciones [27].
3. *REEVES*: Es un modelo de evaluación enfocado en la pedagogía que considera al curso mismo como un objeto de aprendizaje. Define 14 dimensiones pedagógicas para evaluar el objeto de aprendizaje: epistemológica, filosofía pedagógica, sustento psicológico, orientación a objetivos, validez experimental, rol del instructor, flexibilidad de programa, valor del error, motivación, adaptación a diferencia a individuales, control de aprendizaje, actividades de usuario, aprendizaje cooperativo, y sensibilidad cultural [28].
4. *ECOBA*: Es un instrumento para realizar la evaluación previa al uso de los objetos virtuales en la plataforma. Se enfoca a tres ejes principales para determinar la calidad de cada uno por separado: pertinencia y veracidad de los contenidos, diseño estético y funcional y diseño institucional y aseguramiento de competencias. Una vez evaluados, cuenta con una sección de resultados que determina el nivel de calidad alcanzado por el objeto [29].

3.2 Propuesta de criterios de calidad

Es de mencionar que, aunque los criterios de calidad a nivel educativo no se encuentran estandarizados con los que debe contar una plataforma de aprendizaje virtual, se identifican criterios generales (Tabla 5) para implementar su evaluación con alguno de los modelos de calidad de plataformas candidatos a estudio en este trabajo.

Tabla 5. Criterios generales de calidad en educación

Criterio	Caracterización
Definición de involucrados	Definir los perfiles de los distintos actores involucrados. (Estudiantes, Docentes, Administradores, técnicos de soporte, entre otros)
Gestión de medios	Gestionar medios tecnológicos para la educación virtual entre estos: hardware, software, y servicios web.
Materiales de formación	Características de los Objetos Virtuales OA (Se sugiere LORI)
Satisfacción del estudiante	Mantener el grado de interés en el estudiante mediante la didáctica de los artefactos de aprendizaje.
Atractividad	Amigabilidad de la plataforma e intuitividad de la misma.

4. Aplicación del método de comparación

Para realizar esta investigación se utilizó el Método de Estudio de Similitud entre Modelos y Estándares (MESME) [3, 12], conformado por siete pasos: 1) Seleccionar estándares y modelos, 2) Seleccionar modelo de referencia, 3) Seleccionar el proceso a analizar, 4) Establecer el nivel de detalle, 5) Crear una plantilla de correspondencia, 6) Identificar la similitud entre el modelo, y 7) Presentar resultados.

4.1 Seleccionar estándares y modelos

- *GILB*: Se centra principalmente en la idea de definir los atributos de calidad del lado del usuario, es decir, los que realmente le interesan del producto. La definición de

los requisitos no-funcionales se realiza con la ayuda del usuario, en un trabajo conjunto con el analista de sistemas. GILB realiza la medición de sus atributos de calidad por medio de sub-características o métricas detalladas [13, 14].

- *GQM*: Es un modelo enfocado a trabajar en función de un objetivo, es decir, se traza un objetivo y con base en él se definen las pautas de medición. La dinámica de desarrollo del modelo consiste en descomponer el objetivo en preguntas y, a partir de ellas, obtener métricas que permitan responderlas; este proceso está conformado por tres niveles: conceptual, operativo y cuantitativo [15, 16].
- *McCALL*: Fue el primero de los modelos existentes y se estructura bajo tres tipos de atributos de calidad: factores, criterios y métricas. McCALL contiene por tres puntos de vista del lado del usuario: operación, revisión y transición del producto [17].
- *FURPS*: Desarrollado por Hewlett-Packard y compuesto por cinco factores de calidad: funcionalidad, usabilidad, confiabilidad, desempeño y soporte [18].
- *BOEHM*: Establece la calidad de software a través de atributos cualitativos, que a su vez son medidos mediante métricas; tiene factores de calidad similares con McCall: Fiabilidad, portabilidad, eficiencia, ingeniería humana, comprensibilidad, facilidad de prueba y fácil de entender [18].
- *SATC*: Este modelo, propuesto por NASA, se basa en el estándar ISO 9126 para evaluar la calidad de un producto software mediante la aplicación de métricas sobre los requisitos, con el objetivo de que los costos en tiempo y dinero del proyecto sean razonables. Tiene cuatro metas u objetivos: calidad de los requerimientos, calidad del producto, efectividad de la implementación y efectividad de la prueba; cada meta tiene unos atributos los cuales a su vez cuentan con métricas definidas [19].
- *DROMEY*: Plantea tres modelos, uno para cada etapa del ciclo de desarrollo: Modelo de requisitos, modelo de diseño y modelo de calidad del producto o implementación. A nivel de calidad del producto, Dromey evalúa seis características: eficiencia, confiabilidad, mantenimiento, portabilidad, uso y funcionalidad [20, 21].
- *WebQEM*: Método enfocado a evaluar la calidad de productos software, sin embargo, es flexible y se puede adaptar a nivel de proceso. Define características y sub-características de acuerdo con los requisitos de calidad establecidos [22]; además, propone las siguientes fases para el proceso: Planificación y programación de la evaluación de calidad, Definición y especificación de requerimientos de calidad, Definición e implementación de la evaluación elemental, Definición e implementación de la evaluación global, Análisis de resultados, conclusión y documentación y Validación de métricas.
- *SQAE*: Este modelo, además de evaluar la calidad del software, permite estimar el riesgo presente en las etapas del ciclo de vida del producto [23]. La metodología está basada en los primeros modelos de calidad (Boehm, McCall y Dromey), aplica ciertos aspectos propios del estándar ISO/IEC 9126 y se centra principalmente en el trabajo de cuatro áreas: mantenibilidad, evolución, portabilidad y consistencia, que a su vez agrupan siete factores: independencia, modularidad, documentación, auto-descripción, control anomalía y diseño simple para medición de calidad.
- *IEEE-Std 1061-1998*: Su objetivo es definir métricas para usarlas en la evaluación de los módulos o componentes software. Sugiere que para cada proyecto se construya un modelo de calidad propio. No tiene factores de calidad predefinidos y en su lugar

maneja una estructura de clasificación jerárquica que consta de factores y subfactores, que a su vez se componen de métricas [23].

- *ISO 9126*: Este estándar permite distinguir calidad interna, calidad externa y calidad en uso. En 2001 fue reestructurado en dos estándares: ISO/IEC 9126 (calidad de software) e ISO/IEC 14598 (evaluación de productos software). Se compone de cuatro partes: 1) 9126-1, es un modelo de calidad que se basa en seis características para describir la calidad del software; 2) 9126-2, presenta métricas para atributos de calidad externos; 3) 9126-3, presenta métricas para atributos de calidad internos; y 4) 9126-4, métricas para evaluar atributos de calidad en uso [23].

4.2 Seleccionar modelo de referencia

Para el caso particular de esta investigación no se seleccionó ningún modelo de referencia, teniendo en cuenta que la finalidad del uso de la metodología propuesta es encontrar el modelo idóneo para la evaluación de plataformas de aprendizaje virtual, sin necesidad de partir de alguno en particular. Pero se tiene en cuenta la adaptabilidad a entornos virtuales de aprendizaje con respecto de los criterios de calidad generales identificados para este trabajo y enunciados en la Tabla 5. Luego de revisar la literatura se aplicaron criterios de selección a los modelos/estándares seleccionados, los cuales se valoraron de forma cuantitativa en un rango de 1 a 3 (siendo 1 el más bajo y 3 el más alto) a partir de la percepción frente a cada criterio, los cuales se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Evaluación de modelos

Criterios
Información disponible
Nivel de calidad de los Criterios
Adaptabilidad a diferentes dominios de software
Antigüedad del modelo
Compleitud de información para aplicación

Con base en los resultados de la evaluación de los criterios, se seleccionaron los modelos y/o estándares con las puntuaciones más altas para una evaluación detallada: Dromey, WebQEM, SATC e ISO 9126.

4.3 Seleccionar el proceso a analizar

Teniendo en cuenta el propósito de esta investigación, se analizan las características de una plataforma educativa virtual y los criterios relevantes que debe cumplir una aplicación web [24]: fiabilidad, usabilidad, seguridad, disponibilidad, mantenibilidad y escalabilidad, para luego identificar los modelos que se pueden adaptar a ese propósito.

4.4 Establecer el nivel de detalle

Se identifica la estructura de los modelos/estándares seleccionados y a partir de ella se establecen los ítems de comparación y su respectivo nivel de detalle (Tablas 7 a 10). Una vez revisada la estructura de cada modelo se busca la correspondencia entre sus componentes, como se muestra en la Figura 1.

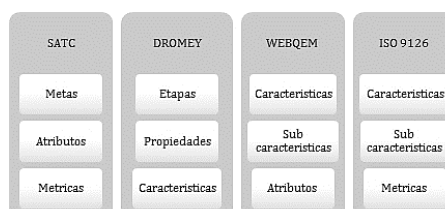


Figura 1. Nivel de detalle/estructura de los modelos

Tabla 7. Estructura del modelo SATC

Meta	Atributo	Métrica/Indicador	
Calidad de requisitos	Ambigüedad	Número Frases claras	
		Número Frases opcionales	
	Integridad	Número de TBDs/TBAs	
	Facilidad de entender	Estructura documento (ERS)	
	Volatilidad del requerimiento		Cantidad de cambios
			Número de requisitos
Trazabilidad		Estructura ciclo de vida	
		Coherencia ERS vs requisitos implementados	
Calidad del producto	Estructura / arquitectura	Número de requisitos que no se ajustan al código ni a las pruebas	
	Facilidad de mantenimiento	Complejidad lógica: Uso del GOTO Tamaño	
	Reusabilidad	Correlación de complejidad/tamaño	
	Documentación interna	Correlación de complejidad / tamaño	
	Documentación externa	Porcentaje de comentarios	
Efectividad de implementación		Índice legible	
	Uso de los recursos	Horas <i>staff</i> dedicadas al ciclo de vida	
Efectividad de la prueba	Porcentaje de terminación	Tareas planificadas terminadas	
	Corrección	Tiempo de encuentro de errores	
		Tiempo de errores fijos y ubicación de la falla	

Tabla 8. Estructura del modelo Dromey

Etap	Propiedad	Característica
Implementación	Descripción	Mantenibilidad
		Reusabilidad
		Portabilidad
	Contexto	Usabilidad
		Mantenibilidad
		Confiabilidad
	Interna	Portabilidad
		Mantenibilidad
		Eficiencia
	Corrección	Confiabilidad
		Funcionalidad

Tabla 9. Estructura del modelo Web QEM

Característica	Sub Característica	Atributo
Facilidad de uso	Comprensibilidad global del sitio	Esquema de organización global
		Calidad en el sistema de etiquetado
		Visita guiada orientada al estudiante
Funcionalidad	Aspectos de búsqueda y recuperación	Mapa de imagen
		Mecanismo de búsqueda en el sitio web
	Aspectos de navegación y exploración	Mecanismos de recuperación
		Navegabilidad
		Objetos de control de navegación
	Aspectos de dominio orientados al estudiante	Predicción de navegación
Relevancia del contenido		
Confiabilidad	No deficiencia	Servicios on-line
		Errores de enlace
		Errores o deficiencias varias
Eficiencia	Performance	Páginas de acceso rápido
	Accesibilidad	Accesibilidad de la información
		Accesibilidad de ventanas

Tabla 10. Estructura del estándar ISO 9126

Característica	Sub-características	Métrica
Funcionalidad	Aplicabilidad	Aplicabilidad
	Precisión	Precisión
	Interoperabilidad	Interoperabilidad
	Seguridad de acceso	Seguridad
Fiabilidad	Cumplimiento de funcionalidad	Cumplimiento de funcionalidad
	Madurez	Madurez
	Tolerancia a fallos	Tolerancia a fallos
	Recuperabilidad	Recuperabilidad
Usabilidad	Cumplimiento de fiabilidad	Cumplimiento de fiabilidad
	Entendibilidad	Entendibilidad
	Facilidad de aprendizaje	Facilidad de aprendizaje
	Operabilidad	Operabilidad
Eficiencia	Atractividad	Atractividad
	Cumplimiento de la usabilidad	Cumplimiento de la usabilidad
	Comportamiento en el tiempo	Comportamiento en el tiempo
	Utilización de recursos	Utilización de recursos
Facilidad de mantenimiento	Cumplimiento de la eficiencia	Cumplimiento de la eficiencia
	Analizabilidad	Analizabilidad
	Cambiabilidad	Cambiabilidad
	Testeabilidad	Testeabilidad
Portabilidad	Estabilidad	Estabilidad
	Cumplimiento del mantenimiento	Cumplimiento del mantenimiento
	Adaptabilidad	Adaptabilidad
	Instalabilidad	Instalabilidad
	Coexistencia	Coexistencia
	Reemplazabilidad	Reemplazabilidad
	Cumplimiento de la portabilidad	Cumplimiento de la portabilidad

4.5 Crear una plantilla de correspondencia

La Tabla 11 presenta la plantilla para identificar la correspondencia de criterios entre los modelos/estándares vs la lista unificada de criterios de evaluación que proponen.

Tabla 11. Criterios de Evaluación de los Modelos

Criterio	SATC	DROMEY	WebQEM	ISO 9126-1
Corrección	X			
Ambigüedad	X			
Estructura /arquitectura	X			
Documentación	X			
Facilidad de uso		X	X	X
Facilidad de mantenimiento	X	X		X
Trazabilidad	X			
Portabilidad		X		X
Funcionalidad	X	X	X	X
Eficiencia		X	X	X
Facilidad de reutilización	X	X		
Integridad	X			
Confiabilidad		X	X	X
Fácil de entender				

De acuerdo con la Tabla 11, los criterios más comunes en los modelos/estándares son: facilidad de mantenimiento, funcionalidad, eficiencia, trazabilidad y confiabilidad. Aunque también es importante tener en cuenta el cumplimiento de criterios relevantes en una aplicación web, los cuales se identificaron en la etapa de selección del proceso a analizar y se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12: Comparación de criterios de calidad para aplicaciones Web.

Criterio	ISO 9126-1	Dromey	WebQEM	Satc
Fiabilidad	X	X	X	
Usabilidad	X	X	X	
Seguridad	X	X	X	
Disponibilidad				
Mantenibilidad	X	X		X
Escalabilidad				
Cumplimiento criterios en educación			X	
Cumplimiento	66,6%	66,6%	50%	16,6%

Se identifica que los modelos Dromey, ISO 9126-1 y WebQEM, tienen la misma proporción en cuanto el cumplimiento de los criterios evaluados para la calidad de una plataforma web, por lo que es necesario conocer la similitud y ventajas de cada uno para seleccionar la mejor opción para el propósito de esta investigación.

4.6 Identificar la similitud entre los modelos

Con base en las plantillas de correspondencia, se estudiaron las similitudes entre los modelos/estándares y sus principales diferencias. De esto se deduce que ISO 9126-1 y Dromey son similares en cuanto a las características del software que proponen evaluar, debido a que los dos están basados en el modelo McCall, los criterios que presentan para la evaluación son afines y, en comparación con SATC, se acercan a cumplir los criterios de evaluación para software web.

Tabla 13. Actividades para la evaluación de plataformas de aprendizaje

Atributo	Actividad
Fiabilidad	1. Aplicar pruebas de recuperación del sistema una vez se va el servicio de internet
	2. Aplicar pruebas de estrés
	3. Realizar lista de chequeo de características de una plataforma de aprendizaje virtual vs plataforma a evaluar
	4. Revisar cumplimiento de objetivos de desarrollo de la plataforma
	5. Validar carga de objetos virtuales en la plataforma
Usabilidad	1. Aplicar encuesta a usuarios, para indagar: Entendibilidad de la plataforma, diseño gráfico de interfaz, facilidad de navegación y opciones de ayuda de la plataforma
	2. Diseñar lista de chequeo que evalúe: Esquema de organización global, Calidad en el sistema de etiquetado, Visita guiada orientada al estudiante, Mapa de imagen
Seguridad	1. Crear usuarios y asignar permisos
	2. Validar la navegación usando diferentes roles
	3. Aplicar pruebas de recuperación del sistema una vez se interrumpe internet
Mantenibilidad	1. Realizar cambios en código fuente para identificar impactos
	2. Verificar entendibilidad y cumplimiento de estándares de codificación
	3. Evaluar manejo de <i>timeout</i> , para cierre de sesión
	4. Revisar consumo de recursos del sistema cuando la plataforma está en uso
Disponibilidad	1. Aplicar pruebas de acceso en diferentes horarios y entornos.
	2. Medir tiempos de respuesta
	3. Verificar disponibilidad de OVAs y recursos
Escalabilidad	1. Verificar la arquitectura del sistema
	2. Identificar herramientas y tecnologías utilizadas para la implementación.
	3. Revisión de modelo entidad-relación para verificar entendibilidad y cumplimiento de estándares.
	4. Aplicar pruebas de concurrencia

Por su parte, WebQEM tiene un buen porcentaje de cumplimiento en las características de evaluación de una plataforma web, pero se diferencia de los otros en que propone una serie de fases y actividades que guían el proceso de evaluación de software de manera

sistemática y cuantitativa, por lo cual se puede adaptar a la evaluación de diferentes tipos de sitios y aplicaciones web. Sin embargo, WebQEM es escaso en cuanto a criterios de evaluación a plataformas virtuales, por lo que para este propósito podría complementarse con otros modelos que lo respalden.

4.7 Análisis de resultados

Con base en los hallazgos de la comparación, se observa que ISO 9126-1 y Dromey cuentan con características similares, sin embargo, el estándar ISO 9126 ha estado en constante evolución y actualización para adaptarse a diversas tecnologías. Razón por lo cual se sugiere la implementación de la metodología de evaluación WebQEM, respaldada por el estándar ISO 9126; de esta manera es posible estructurar una estrategia que cumpla las características necesarias (en su mayoría) para orientar la evaluación de una plataforma educativa virtual. El proceso de evaluación que se utiliza sigue las fases propuestas por Olsina [24] en su metodología WebQEM, como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Fases del proceso de Evaluación de Software

La segunda fase, destinada a definir y especificar los requisitos de calidad, se discriminan los componentes propuestos para evaluar una plataforma de aprendizaje virtual, asociándolos a ciertas actividades, de acuerdo con los criterios de los modelos de calidad, como se muestra en la Tabla 13. Con el desarrollo de las fases y actividades propuestas es posible aplicar una evaluación objetiva a plataformas de aprendizaje virtual, teniendo como soporte dos modelos de calidad con el propósito de contribuir al mejoramiento de la calidad del software y al mejoramiento del proceso enseñanza-aprendizaje.

5. Conclusiones

La mayor parte de los criterios de calidad para la evaluación de aplicaciones web, se encuentra en la mayoría de los modelos de calidad de software, entre los que se puede mencionar a McCall, WebQEM, ISO 9126 y SATC, que cumplen en gran proporción con los criterios de calidad identificados, principalmente fiabilidad, usabilidad, seguridad, disponibilidad y mantenibilidad.

La metodología de comparación de los modelos/estándares MESME, facilita la obtención de los resultados con los pasos que propone, pues cada uno permite el análisis de los componentes o estructuras de los modelos, Esto conlleva a la identificación de similitudes o diferencias y a apreciar cuáles pueden cumplir con el objetivo de una investigación en particular, de acuerdo con el nivel detalle con el que se aborda. Además, es importante resaltar que el método MESME es flexible y comprensible, pero es fundamental contar con documentación competente sobre cada modelo abordado, para esto es necesario hacer una revisión de la literatura completa.

Los modelos encontrados en la revisión no están destinados propiamente a evaluar plataformas de aprendizaje virtual, su enfoque es a nivel de software en general, por lo tanto, se requiere que el evaluador adapte los criterios de los modelos que se tienen, como resultado de la comparación, a la evaluación que requiere, en este caso para una plataforma de aprendizaje virtual.

Conocer diferentes de modelos de evaluación de software permite realizar una selección de las mejores métricas para tener claro los procesos se deben tener en cuenta, sin necesidad de aplicarlos de forma estricta. Sino que es posible adaptar nuevas estrategias en pro de cumplir objetivos cuyos resultados sean un aporte al área de conocimiento.

Es importante contar con criterios de calidad para medir el nivel de educación que pueda proporcionar la plataforma de aprendizaje virtual; puede que funcionalmente cumpla con criterios de calidad como software, pero no se debe dejar de lado el nivel pedagógico, ya que es el enfoque central y propósito de dichas plataformas.

Los criterios de calidad para plataformas de aprendizaje virtual no se encuentran estandarizados, sin embargo, se encuentran herramientas disponibles para evaluar los contenidos de las mismas.

Referencias

- [1] Clarenc, C. et al. (2013). [Analizamos 19 plataformas de e-Learning: Investigación colaborativa sobre LMS](#). Congreso Virtual Mundial de e-Learning (pp. 29-35).
- [2] Scalone, F. (2006). [Estudio comparativo de los modelos y estándares de calidad del software](#). Ms.C. Tesis, Universidad Tecnológica Nacional. Buenos Aires, Argentina.
- [3] Vega, B., Gasca, G. & Echeverry, J. (2012). [Análisis Comparativo de Modelos de Calidad - Identificación de Mejores Prácticas para la Gestión de Calidad en Pequeños Entornos](#). III Conferencia Internacional de Computación e Informática del Norte de Chile (pp. 1-7). Arica, Chile.
- [4] Rosenberg, M. (2000). [E-learning: Strategies for delivering knowledge in the Digital Age](#). McGraw-Hill: New York.
- [5] Gil, G. et al. (2008). [Plataformas E-learning y su evaluación](#). III Congreso de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología (pp. 1-9). Buenos Aires, Argentina.
- [6] Pressman, R. (2010). [Ingeniería del Software. Un enfoque práctico](#). España: McGraw-Hill.
- [7] Offutt, J. (2002). [Quality attributes of web software applications](#). IEEE software 19(2), pp. 25-32.
- [8] Belloch, C. (2010). [Entornos virtuales de aprendizaje](#). Online [Sep 2015].
- [9] Marín, B., Condori, N. & Pastor, O. (2007). [Calidad en Modelos Conceptuales: Un Análisis Multidimensional de Modelos Cuantitativos basados en la ISO 9126](#). Revista de Procesos y Métricas de las Tecnologías de la Información 4, pp. 153-167.
- [10] Husson, A. (2002). [Quel modèle qualité pour la e-formation?](#) Le Préu: Paris.
- [11] Sangrà, A. (2012). [La calidad de experiencias virtuales de educación superior](#). Cuadernos IRC. Online [Sep 2015].
- [12] Calvo, J., Cuevas, G. & San, T. (2008). [Estudio entre modelos y estándares de buenas prácticas enfocado a las prácticas de planificación de proyectos y utilizando CMMIDEV v1.2 como referencia](#). III Conferencia Ibérica de Sistemas y Tecnologías de la Información (pp. 307-319). Vigo, España.
- [13] Herrera, F. & Ortiz, E. (2010). [Guía para la aplicación de métricas para determinar la calidad de un sistema de software](#). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- [14] Solano, H. & Torres, I. (2013). [Análisis de frameworks para el desarrollo de aplicaciones móviles en la plataforma Android](#). Universidad del Azuay. Cuenca, Ecuador.
- [15] Latum, F. et al (1998). [Adopting GQM-based measurement in an industrial environment](#). IEEE Software 15(1), pp.78-86.
- [16] Kumar, N., Dadhich, N. & Shastri, A. (2015). [Quality Models for Web-based Application: A Comparative Study](#). International Journal of Computer Applications 125(2), pp. 25-32.
- [17] Ramírez, P. & Ramírez, C. (2010). [Estudio de las prácticas de calidad del software implementadas en las MIPYMES desarrolladoras de software de Pereira](#). Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.
- [18] Moreno J., Bolaños, I. & Navia, M. (2010). [Exploración de modelos y estándares de calidad para el producto software](#). Revista UIS Ingenierías 9(1), pp. 39-53.

- [19] Wadhwa, M. (2014). [A comparative study of software quality models](#). International Journal of Computer Science and Information Technologies 5(4), pp. 5634-5638.
- [20] Zafar, S. et al. (2015). [Security quality model: An extension of Dromey's model](#). Software Quality Journal 23(1), pp. 29-54.
- [21] Sarrab, M., Elbasir, M. & Alnaeli, S. (2016). [Towards a quality model of technical aspects for mobile learning services: An empirical investigation](#). Computers in Human Behavior 55(A), pp. 100-112.
- [22] Bansiya, J. & Davis, C. (2002). [A hierarchical model for object-oriented design quality assessment](#). Transactions on Software Engineering IEEE 28(1), pp. 4-17.
- [23] Carvallo, J., Franch, X. & Quer, C. (2010). [Calidad de componentes software](#). En Coral, C. et al. (Eds.), Calidad del Producto y Proceso Software (pp. 287-316). RA-MA: España.
- [24] Olsina, L. (1999). [Metodología cuantitativa para la evaluación y comparación de la calidad de sitios web](#). Tesis Doctoral. Universidad Nacional de la Plata, Argentina.
- [25] Burgos, V. (2014). [Evaluación del desarrollo de experiencias en e-learning en América Latina](#). Tesis Maestría. Universidad de Piura.
- [26] Santoveña, S. (2005). [Criterios de Calidad para la Evaluación de los Cursos Virtuales Unidad de Virtualización Académica](#). Etic@net II(4), pp. 18-36.
- [27] Vidal, C., Segura, A. & Prieto, M. (2008). [Calidad en objetos de aprendizaje](#). V Simposio Pluridisciplinar sobre Diseño y Evaluación de Contenidos Educativos Reutilizables (pp. 1-12). Salamanca, España.
- [28] Ortiz, L., Trujillo, Y. & Ril, Y. (2011). [La calidad de los objetos de aprendizaje producidos en la Universidad de las Ciencias Informáticas](#). Edutec-e Revista Electrónica de Tecnología Educativa 36, pp. 1-18.
- [29] Ruiz, R., Muñoz, J. & Álvarez, F. (2007). [Evaluación de Objetos de Aprendizaje a través del Aseguramiento de Competencias Educativas](#). Virtual Educa Brasil (pp. 1-17). Sao José dos Campos, Brasil.

31. Validación de guías de enseñanza y aprendizaje en áreas de ingeniería de requisitos siguiendo lineamientos de SWEBOK

Lorena Castillo G.¹

Andrea Alarcón A.²

Mauro Callejas C.³

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia

1. Introducción

En Colombia, cada vez son más las empresas que se enfocan en el desarrollo de Sistemas de Información y en prestación de servicios software, haciendo ver esta industria como una oportunidad para el crecimiento económico del país, registrando un importante incremento en ventas y dando lugar a que se extienda la necesidad de fuerza laboral. Sin embargo, en ella se presentan debilidades tales como la baja especialización, insuficiente tasa de certificaciones profesionales y empresariales, baja calidad de productos, baja innovación, débil organización empresarial, insuficiente inversión en potencial de innovación, desarrollo de I&D transitorio, baja educación en competencias interdisciplinarias de directivos, gremio inconsistente y acceso limitado a información [1].

A pesar de esto, algunas empresas batallan a diario y buscan prevalecer aprovechando las oportunidades del mercado, como las que ofrecen los tratados internacionales, donde pueden exportar productos y servicios de calidad que les permitan crecer y ser competentes en el desarrollo de software, con lineamientos que fomenten el éxito de la internacionalización [2]. Esta es una razón por la que cada día se incrementa la demanda de ingenieros o profesionales en el área de las tecnologías de la información, mientras que la oferta pareciera reducirse [3]. Entonces, la industria se ve forzada a emplear profesionales de otras disciplinas para que desempeñen roles concernientes a las carreras de Ingeniería del Software, de Sistemas y de Ciencias Computacionales.

La industria requiere profesionales formados con calidad, capaces de desenvolverse en los roles que requiere el ciclo de desarrollo del software, por lo que en las instituciones de educación recae gran parte de la responsabilidad de formarlos y capacitarlos, para que estén dispuestos a enfrentar las oportunidades laborales. Una manera de hacerlo es a través de planes de estudios definidos para orientar y definir el desarrollo académico durante el proceso de formación. En ese sentido, actualmente existen referentes que aportan al mejoramiento de los currículos en el área de la Ingeniería del Software, por ejemplo, ACM, IEEE, ABET [4, 5], entre los que se destaca SWEBOK [6] debido a que su objetivo es gestionar y organizar el conocimiento de la Ingeniería del Software y ofrecer una visión en aspectos teóricos y prácticos. Esta guía ha sido analizada [7, 8] y puesta en práctica en diversas universidades [9, 10], con la idea de lograr mayor cobertura de las temáticas que este referente describe para cada una de las 10 áreas de conocimiento, y de esta manera mejorar la calidad profesional de los egresados.

En la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC aún no ha adoptado la implementación de esta guía, por lo que el Grupo de Investigación en Software GIS desarrolló una prueba piloto para determinar, además del grado de conocimiento de la guía, la viabilidad de aplicar una estrategia de enseñanza-aprendizaje partiendo de los lineamientos SWEBOK [11]. Los resultados conllevaron al planteamiento de una estrategia estructurada en guías de enseñanza-aprendizaje para dos de las 10 áreas planteadas: Ingeniería de Requisitos y Gestión de la Ingeniería del Software, que se desarrollaron a partir de objetivos de aprendizaje y de estrategias metodológicas

inmersas en los niveles de conocimiento de la taxonomía de Bloom, con las que se busca mejorar la capacitación en estas temáticas [12].

Además del diseño y desarrollo de las guías, hay que determinar la manera cómo se implementaran y validaran en el contexto académico, por lo que es importante darle continuidad al proyecto para lograrlo. Además, se debe buscar el mejoramiento en la calidad del proceso enseñanza-aprendizaje y la aprehensión de conocimientos por parte de los participantes, por lo que en este documento se describe el proceso de validación de las guías relacionadas a una de las áreas seleccionadas, la Ingeniería de Requisitos, a partir de la identificación de un modelo de evaluación e implementación de las guías, de evaluación de la implementación y del cotejo de resultados, finalmente se presenta una sección de conclusiones y trabajos futuros.

2. Aspectos teóricos

En SWEBOK se establece una línea base para el conjunto de conocimientos en la Ingeniería del Software, además de apoyar el trabajo y la responsabilidad social para promover el avance de la teoría y la práctica en este campo [14]. La guía estructura ese conocimiento en 10 áreas, de las cuales, en este trabajo, se tendrá en cuenta el área de Ingeniería de Requisitos.

2.1 Requisitos de software

Se define como la descripción de los servicios prestados por un sistema para resolver algún problema [15]; aborda el conocimiento de los fundamentos al respecto en la guía SWEBOK, enmarcándose en el contexto del desarrollo de software como el área que trata de los requisitos, los métodos, las técnicas y las herramientas que permiten descubrir, documentar y mantener los requisitos para sistemas basados en computador [16]. En el programa Ingeniería de Sistemas y Computación de la UPTC, esta área se incluye en el quinto semestre del currículo académico, cuyo contenido programático se rige por el Proyecto Académico Educativo (PAE) [17], presentando fortalezas y algunas debilidades en el proceso de formación de los estudiantes.

2.2 Aprendizaje por competencias

En Colombia, la educación superior formal evalúa las competencias cognoscitivas (argumentativa, propositiva e interpretativa) adquiridas y desarrolladas por los estudiantes durante su proceso formativo. Estas competencias son el producto de un aprendizaje significativo a través de la práctica y se deriva de la integración de los aspectos procedimentales (saber hacer), actitudinales (saber ser) y conceptuales (saber que) [18]. La estructura e implementación de guías de enseñanza-aprendizaje permiten evaluar los tres aspectos. En la Figura 1 se describe la distribución de la guía y el enfoque respectivo.

- *Procedimental.* A partir de los objetivos de aprendizaje se nombra un producto que se debe realizar durante el desarrollo de las actividades, y a partir de estrategias pedagógicas, los estudiantes utilizan procedimientos, métodos, herramientas y técnicas [20].
- *Conceptual.* Teniendo en cuenta los objetivos de aprendizaje a alcanzar, las guías presentan un conjunto de conceptos teóricos y una sección con un conjunto de referentes bibliográficos, donde el estudiante puede ampliar las definiciones dadas. La idea es que comprenda y articule los conceptos por medio de procesos mentales [19].

- *Actitudinal.* La implementación de las guías por medio de clases presenciales permite observar elementos relacionados con valores y virtudes, que describen el comportamiento de los estudiantes durante el proceso formativo [20].

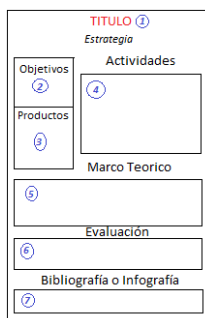


Figura 1. Estructura de las guías de enseñanza-aprendizaje

3. Diseño metodológico

La muestra poblacional que se determinó fue de 26 estudiantes de quinto semestre, inscritos en el área de Ingeniería de Requisitos del programa de Ingeniería de Sistemas y Computación de la UPTC durante el primer semestre de 2015. La metodología adoptada es investigación evaluativa en el ámbito de proceso de enseñanza-aprendizaje, con la aplicación de métodos cuantitativos y cualitativos [14] y compuesta por cuatro fases:

3.1 Definición del modelo de evaluación

Durante esta fase se decidió evaluar los objetivos de aprendizaje inmersos en cada una de las guías por temática, para esto se acordó que los datos que se necesitaban recoger eran de tipo cualitativo y cuantitativo a través de los instrumentos: listas de chequeo, rúbricas analíticas y pruebas objetivas, que en fases posteriores permitieran definir el nivel de aprendizaje y las competencias alcanzadas, así como las características actitudinales observadas durante la implementación.

Teniendo en cuenta que las guías se desarrollaron usando la taxonomía Bloom [6] como elemento académico, la construcción de los instrumentos se enfocó a cubrir las competencias cognoscitivas [22] y las características de validez básicas [23]. Finalmente, se acordó que la escala a usar sería la misma que se implementa en el modelo de gradación de juicios de la UPTC, conformada por seis niveles de desempeño [24] (como se observa en la Tabla 1) y, además, se planteó un cronograma para la implementación.

Tabla 1. Escala de gradación de juicios UPTC

Nivel de desempeño	Valor
Pleno	5.0 - 4.7
Alto grado	4.6 - 4.0
Aceptable	3.9 - 3.0
Insatisfactorio	2.9 - 2.0
Deficiente	1.9 - 1.0
No cumple	0.0 - 0.9

3.2 Implementación de las guías de enseñanza y aprendizaje

La aplicación de las guías de enseñanza-aprendizaje se llevó a cabo en las instalaciones de la UPTC, durante sesiones presenciales a un grupo de estudiantes de la asignatura Ingeniería de Requisitos; se siguió la pauta metodológica especificada y con dirección a la obtención del producto derivado de la estrategia pedagógica de cada temática. Esta

implementación se representa en la Figura 2, donde el agente de unión (profesor) hace transferencia de conocimiento a través de una estrategia pedagógica para un área de conocimiento (Ingeniería de Requisitos), a partir de componentes metodológicos desarrollados referenciando la taxonomía Bloom y la guía SWEBOK.

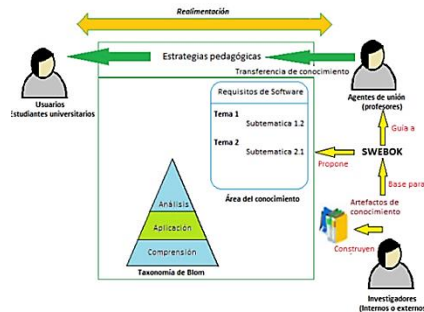


Figura 2. Modelo pedagógico propuesto [12]

Durante esta fase se recolectaron datos cuantitativos y cualitativos, los segundos percibidos por medio del comportamiento durante la implementación de las estrategias, ambos tipos de datos necesarios para el diligenciamiento de los instrumentos establecidos en la fase previa para un posterior análisis.

3.3 Evaluación de las guías implementadas

La preparación y tabulación de los datos cuantitativos registrados en los instrumentos de evaluación se realizó a partir de los modelos de Kolmogorov-Smirnov [25, 26] y t-Student [27, 28], con ayuda de la herramienta SPSS [29], de donde se obtuvo un conjunto de datos resultado de contrastar la variable *calificación por temática* con el valor de la *hipótesis por temática*, esta última definida con valor de referencia de 4,0 y teniendo en cuenta que es el límite inicial del nivel *Alto grado*, definido en la escala de gradación.

Durante la implementación de las guías se recolectó información referente al comportamiento actitudinal de los grupos de estudiantes para la asignatura, con el fin de analizar cuál era su conducta mientras desarrollaban y participaban en las actividades de la investigación. La recolección de la información se realizó por medio de la técnica de observación directa y se generó un diario con la información diligenciada por el investigador, que se trató por medio del modelo de Miles y Huberman [30] mostrado en la Figura 3.



Figura 3. Proceso de Análisis de datos cualitativos según [30]

En la primera etapa de este proceso de análisis de datos (Reducción de datos), para la presente investigación, y a pesar que el modelo de Miles y Huberman determina que la recolección de la información puede ser focalizada desde el principio con el objetivo de llevar a cabo una reducción de datos previa [31], fue necesario realizar una síntesis de la

información, porque no toda lograba dar un valor al análisis que se deseaba realizar, por lo que descartó información. Debido a que la recolectada era de tipo texto, se realizó una descomposición en unidades de significado en función de los criterios o dimensiones temáticas: actitudes ante el aprendizaje e implicación en el estudio [30], las cuales se presentan en la Figura 4.

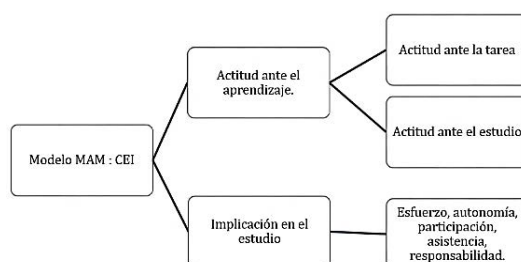


Figura 4. Dimensiones del modelo MAM: CE de motivación consciente para el aprendizaje

- *Actitudes ante el aprendizaje.* Compuesta por las variables orientadas a la valoración de actitud ante la tarea o actividades y actitud ante el estudio. Estas variables fueron tenidas en cuenta durante el proceso de observación y permitieron enfocar de manera general el comportamiento observado.
- *Implicación en el estudio.* Hace referencia a la actitud que toman los estudiantes frente al proceso que conlleva la acción de estudiar y está conformada por variables tales como esfuerzo, autonomía, participación, asistencia, persistencia y responsabilidad.

La segunda etapa del proceso de análisis de datos se orientada a la descomposición y transformación de los mismos. Con la ayuda del sistema Atlas Ti [33] se cargó la información del diario al sistema, con los párrafos obtenidos, y se realizó la citación de cada uno, con el fin de clasificarlos dentro de una codificación establecida por las variables de las dimensiones del modelo adoptado.

En la etapa de formulación y verificación de conclusiones, se tuvo en cuenta que, desde el inicio de la extracción de las unidades, se empezaron a elaborar conclusiones circunstanciales que posteriormente tomaron valor debido a la participación continua de los estudiantes dentro de las actividades. Entre las conclusiones más destacadas que se establecieron se puede mencionar la buena percepción de los estudiantes frente a nuevas estrategias y metodologías de enseñanza-aprendizaje, y el sobresaliente trabajo colaborativo y participativo, fomentando así la cooperación entre compañeros de curso y la cooperación continua con el docente.

Con la información cuantitativa obtenida en la fase previa para cada una de las guías aplicadas, se analizó si a partir de la estrategia validada e implementada se podrían obtener calificaciones superiores a las alcanzadas con las estrategias no validadas, utilizadas con las metodologías tradicionales. De igual manera, se examinó cuáles eran las características actitudinales más representativas de los estudiantes que influyeron positiva o negativamente en el desarrollo de las actividades durante la ejecución de la investigación.

4. Resultados

Luego de la recolección y el análisis de datos acerca de seis de las temáticas, el total de estudiantes que alcanzaron calificaciones totales dentro del nivel *Alto grado* (4,0 a 4,6), fue superior al de los que obtuvieron calificaciones en el nivel *Aceptable* (3,0 a 3,9), que solamente fue superior en el área de Proceso de Requisitos, tal como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Relación de calificaciones y estrategias en el curso de Ingeniería de Requisitos

Temática	Estrategia	%	Nivel
Fundamentos	Representaciones visuales	64, 28	Alto grado
		35, 71	Aceptable
Procesos	Algoritmos	46	Alto grado
		54	Aceptable
Elicitación	Técnica de rompecabezas	100	Alto grado
Análisis	Proyecto	100	Alto grado
Especificación	Escritura	92	Alto grado
		8	Aceptable
Validación	Juego de roles	54	Alto grado
		46	Aceptable
Consideraciones prácticas	Proyecto	100	Alto grado

Por otra parte, a través del teorema t-Student se procedió a comprobar, para cada guía, la hipótesis alternativa h_1 , o nula h_0 , para determinar si a través de las estrategias aplicadas en cada temática se alcanzaron notas totales dentro de un nivel *Alto grado*, es decir, notas superiores a 4,0, o si por el contrario serían menores o iguales a 4,0. Como se observa en la Tabla 3, el valor de la probabilidad resultante del contraste de hipótesis es mayor al nivel de significancia α de 0,05. Por este motivo es que para *Fundamentos de requisitos* se rechazan las hipótesis alternativas a favor de las hipótesis nulas, es decir, que para la primera temática a través de la estrategia de representaciones visuales se obtienen calificaciones iguales a 4,0 y para *Proceso de requisitos* se obtienen calificaciones menores a 4,0. Para las otras cinco temáticas se acepta la hipótesis alternativa, con lo que se concluye que bajo las estrategias: técnica de rompecabezas, proyecto, escritura y juego de roles, se obtienen calificaciones superiores a 4,0.

Tabla 3. Datos por temática a partir de t -Student

Temáticas IR	\bar{X}	s	t-Student	T	gl	p	α	Hipótesis
Fundamentos de Requisitos	4,0	0,44	1,756	0,173	15	0,774	0,05	h_0
Proceso de Requisitos	3,9	0,147	1,708	-1,959	25	0,027	0,05	h_0
Elicitación de Requisitos	4,2	0,187	1,708	5,513	25	0,000	0,05	h_1
Análisis de Requisitos	4,3	0,092	1,717	15,503	22	0,000	0,05	h_1
Especificación de requisitos	4,2	0,141	1,708	7,19	25	0,000	0,05	h_1
Validación de requisitos	4,09	0,167	1,708	2,96	25	0,007	0,05	h_1
Consideraciones Practicas	4,36	0,069	1,708	26,44	25	0,000	0,05	h_1

En la Figura 4 se compara el desempeño de las competencias argumentativa interpretativa y propositiva, y se puede observar que la primera y la segunda presentan un mayor promedio de calificación en seis de las siete temáticas, lo que evidencia que las guías de enseñanza-aprendizaje facilitaron la comprensión, el análisis y la articulación de los conceptos y procesos por parte de los estudiantes. Mientras que para la competencia propositiva se presentó un promedio menor, lo que significa que la estrategia desarrollada en las guías permite en menor grado que los estudiantes propongan la creación de nuevas hipótesis y la posibilidad de nuevas alternativas de solución.

Por otro lado, se comparó el rendimiento de los estudiantes antes de la implementación de las guías [8], con el rendimiento obtenido después, de donde se concluye que la calificación definitiva de la asignatura Ingeniería de Requisitos, conseguida antes de la implementación de las estrategias validadas, fue de 3,28 y la alcanzada durante el desarrollo de esta investigación fue de 4,2, pasando de un nivel de cumplimiento *Aceptable* a uno de *Alto grado*.

Además, que las temáticas Análisis de requisitos y Consideraciones prácticas, se encuentran en un nivel de *Insatisfactorio*, lo que indica que las estrategias usadas hasta

ese momento no tenían una implicación positiva con el aprendizaje en los estudiantes. Con la implementación y validación de la estrategia de proyectos los niveles de aprendizaje se incrementaron en 27% y 31% respectivamente, progresando dos niveles y quedando en *Alto grado*; por otro lado, donde menos se evidenció incremento fue en las temáticas fundamentos de requisitos, con un 3,8%, y en especificación de requisitos, con un 4,8 %, lo que los ubica en un nivel de *Aceptable* y de *Alto grado*, respectivamente.

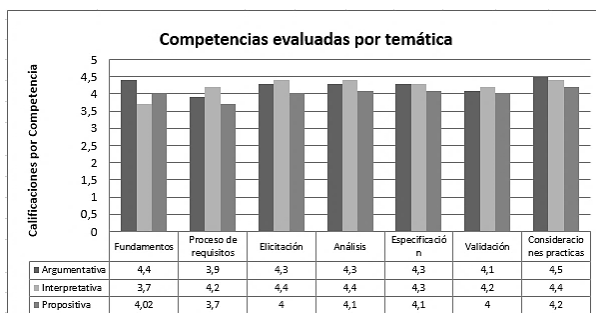


Figura 4. Promedio de calificaciones según el tipo de competencia

En cuanto al análisis cualitativo, además de corroborar las conclusiones previas, se obtuvieron otras a partir de relacionar las unidades de significado y buscar co-ocurrencias entre ellas. Para la categoría *Actitudes ante las tareas o actividades*, la unidad de significado sobresaliente fue de *aceptación* por parte de los estudiantes, al cambiar las clases magistrales por estrategias metodológicas dinámicas; en cuanto a la categoría *Actitud ante el estudio* se destaca el desarrollo de tareas de manera secuencial y organizada; y en la categoría *Implicación en el estudio* se evidenció el respeto, la responsabilidad, el compañerismo y la puntualidad mostrada por los participantes.

4.1 Falencias y limitaciones identificadas en el proceso enseñanza-aprendizaje

En esta sección se muestran los criterios que no fueron alcanzados totalmente, identificadas en la validación de las guías de enseñanza-aprendizaje, y el porcentaje que representan en relación al total de grupos [34]. Es de destacar que las falencias, criterios no alcanzados y diversas situaciones presentadas aquí, atienden directamente a los temas de Ingeniería de Requisitos abordados en las guías, por cuanto algunos términos utilizados corresponden propiamente al material utilizado en las clases. La Tabla 4 presenta el resumen de las principales falencias presentadas en cada grupo analizado para la guía *Fundamentos de Requisitos*.

Tabla 4. Criterios no alcanzados en Fundamentos de Requisitos

Grupos	Calificación (0,0 - 5,0)	Falencias		
		F1	F2	F3
Grupo 1	4,3			X
Grupo 2	4,0		X	X
Grupo 3	3,9	X		X
Grupo 4	3,8	X	X	X
Grupo 5	4,2		X	

En la Tabla 5 se puede observar que la falencia más repetida, con un 80%, está relacionada a que dentro de la representación visual escogida (mapa conceptual, mapa mental o cuadro sinóptico), no plasmaron específicamente todos los conceptos presentados en la guía, sin embargo, el enfoque dado por los estudiantes a la actividad fue el adecuado. En la Tabla 6 se presenta el resumen de las principales falencias presentadas en los grupos participantes en el desarrollo de la guía *Proceso de Requisitos*.

Tabla 5. Errores presentados en Fundamentos de Requisitos

ID	Criterio con falencias	%
F1	Dificultad al ejemplificar los requisitos No funcionales	40
F2	El estudiante no tiene claras las características adecuadas de un buen requisito	60
F3	En la representación visual no se plasman todos los conceptos relacionados en la guía	80

Tabla 6. Criterios no alcanzados - Proceso de requisitos

Grupos	Calificación (0,0 - 5,0)	Falencias			
		F1	F2	F3	F4
grupo 1	3,8	X	x	X	
grupo 2	4,2				X
grupo 3	3,9	X			X
grupo 4	3,7	X	X		X
grupo 5	4,0			X	

En la Tabla 7 se puede observar que las falencias más repetidas, con un 60%, fue la dificultad que los estudiantes tuvieron al interpretar las diferencias entre las relaciones de las fases o etapas de los modelos o metodologías de desarrollo de software lineales, en comparación con los modelos iterativos. Además, la construcción de algunos de los diagramas de flujo se realizó de manera general, dejando por fuera algunos de los procesos importantes de la Ingeniería de Requisitos.

Tabla 7. Errores presentados en Proceso de requisitos

ID	Criterio con falencias	%
F1	Dificultad al comprender la diferencia entre la relación de las fases o etapas de los modelos lineales con los iterativos	60
F2	El estudiante demuestra confusión en el entendimiento del dominio en la etapa de elicitación del modelo Kotonya – Somerville	40
F3	Se evidencia confusión entre la etapa de elicitación y la etapa de análisis de requisitos	40
F4	Se desarrollan diagramas de flujo generales que no describen el nivel de detalle del proceso	60

En las Tablas 8 y 9 se observan los criterios no alcanzados en la Guía *Elicitación de requisitos*, donde se puede observar que la falencia más repetida presentada en todos los grupos se refiere a la limitación por parte de los estudiantes al implementar la técnica asignada, dejando de lado la posibilidad de combinarla y realizar una elicitación de requisitos más efectiva.

Tabla 8. Criterios no alcanzados en Elicitación de requisitos

Grupos	Calificación (0,0 - 5,0)	Falencias		
		F1	F2	F3
Grupo 1	4,4			x
Grupo 2	4,1		x	x
Grupo 3	3,9	x		x
Grupo 4	4,4			x
Grupo 5	4,2	x		x

Tabla 9. Errores presentados en Elicitación de requisitos

ID	Criterio con falencias	%
F1	Escasa Implementación de la técnica	40
F2	Con la elicitación realizada, no quedan claras las fronteras del sistema	20
F3	El grupo se limita a la técnica asignada y no la combina con las demás técnicas	100

En las Tablas 10 y 11 se puede observar que las falencias más repetidas, con un 60%, es la representación de la arquitectura de sistema, solamente la realizo uno de los grupos. Además, dificultad presentada al identificar y luego clasificar cuales de los requisitos podrían ser volátiles y cuales debían permanecer.

Tabla 10. Criterios no alcanzados en Análisis de requisitos

Grupos	Calificación (0,0 - 5,0)	Falencias			
		F1	F2	F3	F4
grupo 1	4,0	X	X	X	
grupo 2	4,3			X	X
grupo 3	4,5				X
grupo 4	4,3	X		X	
grupo 5	4,2		X		

Tabla 11. Errores presentados en Análisis de requisitos

ID	Criterio con falencias	%
F1	Se presenta confusión al clasificar los requisitos Funcionales y los no-funcionales	40
F2	No se realiza la representación de ningún modelo conceptual (modelos de contexto, comportamiento, de datos o de objetos)	20
F3	No se realiza el diseño general de la arquitectura del sistema.	60
F4	El estudiante presenta confusión al realizar la clasificación entre requisitos volátiles y duraderos	60

En las Tablas 12 y 13 se puede observar que las falencias más repetidas, con un 60%, fueron la omisión en cuanto a la asignación del grado de prioridad a cada uno de los requisitos del sistema dentro del documento de especificación. Además, se evidenció que algunos requisitos de la fase de análisis fueron incluidos dentro del documento.

Tabla 12. Criterios no alcanzados – Especificación de requisitos

Grupos	Calificación (0,0 - 5,0)	Falencias		
		F1	F2	F3
grupo 1	3,9	X	X	X
grupo 2	4,4			X
grupo 3	4,4			
grupo 4	4,2		X	X
grupo 5	4,1		X	

Tabla 13. Errores presentados en Especificación de requisitos

ID	Criterio con falencias	%
F1	Se especifican requisitos funcionales de tal manera que no permiten ser verificados ni probados posteriormente	20
F2	Dentro de la especificación, no se realiza correctamente el ordenamiento de los requisitos en esenciales, condicionales y opcionales	60
F3	Dentro del documento de especificación no se describen completamente cada uno de los requisitos establecidos durante la etapa de análisis para el sistema Funny Math	60

En las Tablas 14 y 15 se presentan las falencias más repetidas, con un 80%, referida a la elaboración global de algunos de los prototipos. Además, se resalta el hecho de que no se lleva un control del historial de las validaciones hechas a los requisitos, infringiendo de esta manera la característica que deben cumplir todos los requisitos acerca de su trazabilidad. En las Tablas 16 y 17 se observan los criterios pendientes y falencias presentadas en la aplicación de la Guía de *Consideraciones prácticas de la Ingeniería de Requisitos*, donde resalta el hecho de que todas la falencias se presentaron con la misma frecuencia en todos los grupos durante la implementación de la guía, se identificó principalmente que se presenta confusión al momento de seleccionar un mecanismos

para llevar a cabo la trazabilidad de un control de cambios, lo que conllevó a que dos de los grupos no utilizaran ninguno. También se identifica que, al plantear la realización o la implementación de un control de cambios, éste no se tiene en cuenta para todos los artefactos involucrados.

Tabla 14. Criterios no alcanzados en Validación de requisitos

Grupos	Calificación (0,0 - 5,0)	Falencias		
		F1	F2	F3
grupo 1	3,9		X	X
grupo 2	4,1	X	X	
grupo 3	4,0		X	X
grupo 4	4,2	X		X
grupo 5	4,2		X	X

Tabla 15. Errores presentados - validación de requisitos

ID	Criterio con falencias	%
F1	Baja participación durante la reunión entre el mediador, cliente y especificador	40
F2	No se realizan de manera completa los prototipos para realizar la validación del requisito	80
F3	Durante la validación de los requisitos no se realiza un historial de versiones	80

Tabla 16. Criterios no alcanzados en Consideraciones prácticas

Grupos	Calificación (5,0 - 0,0)	Falencias		
		F1	F2	F3
grupo 1	4,3	X		X
grupo 2	4,6		X	
grupo 3	4,3	X		X
grupo 4	4,5			
grupo 5	4,4		X	

Tabla 17. Errores presentados en Consideraciones prácticas

ID	Criterio con falencias	%
F1	Se presenta confusión entre los diferentes tipos de trazabilidad de requisitos	40
F2	Se realiza la implementación del control de cambios del taller, de manera incompleta	40
F3	No se implementa ningún método de trazabilidad al realizar la implementación del control de cambios	40

5. Conclusiones y trabajo futuro

La guía SEWBOK y otras iniciativas han permitido determinar aciertos y desaciertos en la estructura curricular de algunos programas académicos, relacionados con la formación de profesionales en Tecnologías de la Información. De esta manera propone proyectos conducentes a atacar las debilidades de éstos y para mejorar la calidad de la educación en el área.

Elementos académicos como la taxonomía de Bloom y la guía SWEBOK, así como elementos administrativos tales como la escala de Gradación de cumplimiento y la emisión de Juicios de la UPTC, permitieron consolidar una propuesta de evaluación de las guías pedagógicas, con el objetivo de minimizar el nivel de subjetividad en el proceso. Además, para determinar los elementos que se deben adaptar, de tal manera que sean efectivos no solamente en las áreas tomadas como caso de estudio, sino en las demás propuestas por la guía y en otros campos de conocimiento.

La validación de las estrategias con respecto a los objetivos de aprendizaje, además de evidenciar la calidad en el uso de las guías a lo largo de proceso de enseñanza de la

asignatura de Ingeniería de Requisitos, permitió determinar que la metodología enriquece aspectos tales como el agrado en que los estudiantes abordan nuevos conceptos y temas a través de clases metodológicas, también a mejorar las relaciones entre compañeros e incitar al trabajo grupal.

Durante el proceso realizado por los estudiantes para la obtención de los productos, se observó que mientras realizaban la lectura del marco teórico se disminuía el número de dudas con respecto a las presentadas durante el desarrollo del producto, dirigiéndolos a buscar más referentes bibliográficos; lo que evidencia que enfrentarse a una experiencia real incrementa las habilidades de auto-aprendizaje.

Como aspecto a mejorar se evidenció que seguir al pie de la letra los lineamientos de las guías limita la posibilidad de que los estudiantes propongan alternativas de solución e hipótesis distintas a las planteadas. Además, las falencias encontradas durante la validación de las guías, se presentaron con mayor frecuencia en la realización de las actividades de manera general o de manera incompleta, con lo que se concluye que para la implementación de las guías es importante hacer una estimación de tiempos para cada sección, con el fin de que los estudiantes cuenten con un rango de tiempo apropiado para cada estrategia y temática.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se recomienda que la UPTC, dentro de los contenidos curriculares, contemple cada uno de los temas que SWEBOK establece para las temáticas del área de Ingeniería de Requisitos, lo mismo que la implementación de estrategias validadas para impartir los temas referentes.

Con el propósito de darle continuidad a esta investigación, se requiere que la propuesta de implementación y validación de las guías presentada se realice también para áreas transversales, tales como la gestión de la Ingeniería del Software, para determinar los aspectos que se deben mejorar paulatinamente en la orientación de las áreas caso de estudio.

Referencias

- [1] Araujo, S. & Robledo, J. (2015). [El crecimiento de la industria del software en Colombia: Un análisis Sistémico](#). Revista EIA 23, pp. 95.
- [2] Payan, R., Barbosa, J. & Torres, M. (2011). [Recomendaciones para desarrollar software internacionalizado](#). Revista Avances en Sistemas 8(2), pp. 51-59.
- [3] Esparza, J. & Lanckenau, D. (2013). [Propuesta de mejora para el aprendizaje de la Ingeniería de Software, basada en Competencias, POL y PBL](#). Proceedings 11th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (pp. 1-10). Cancun, México.
- [4] Felder, R. & Brent, R. (2003). [Designing and Teaching Courses to Satisfy the ABET Engineering Criteria](#). Journal of Engineering Education 92(1), pp. 7-25.
- [5] Sahami, M. et al. (2011). [Setting the stage for computing curricula 2013: Computer science - Report from the ACM/IEEE-CS joint task force](#). Proceedings 42nd ACM technical symposium on Computer science education (pp. 161-162). Dallas, USA.
- [6] Bourque, P. et al. (2004). [The Guide to the Software Engineering Body of Knowledge](#). USA: IEEE Computer Society.
- [7] Rodríguez, O. et al. (2014). [Estudio piloto sobre los conocimientos más importantes para los ingenieros de software en México](#). Difu100ci@ Revista en Ingeniería y Tecnología 8(2), pp. 1-7.
- [8] Mishra, A. & Yazici, A. (2011). [An Assessment of Software Engineering Curriculum in Turkish Universities: IEEE/ACM Guidelines Perspective](#). Croatian Journal of Education 13(1), pp. 188-219.
- [9] Guerrero, D. & Lemmel, K. (2013). [Aplicación del estándar Swebok al diseño curricular de Ingeniería de Sistemas](#). Revista Trilogía 8, pp. 107-114.
- [10] Mishra, A., Cagiltay, N. & Kilic, O. (2007). [Software engineering education: some important dimensions](#). European Journal of Engineering Education 32(3), pp. 349-361.
- [11] Alarcón, A., Martínez, A. & Sandoval, J. (2013). [Use of Learning Strategies of SWEBOK® Guide Proposed Knowledge Areas](#). Advances in Intelligent Systems and Computing 172, pp. 243-254.

- [12] Martínez, A. (2014). Propuesta metodológica para el desarrollo de contenidos del área de ingeniería de software en la escuela de Ingeniería de sistemas y Computación de la UPTC, a partir de los lineamientos de la guía SWEBOK. Escuela de Ingeniería de sistemas y Computación de la UPTC.
- [13] Villavicencio, M. & Abran, A. (2015). [Sugerencias para la Inclusión de Temas de Medición de Software en un Currículo de Ingeniería de Software para Estudiantes de Pregrado](#). Revista Latinoamericana de Ingeniería de Software 3(3), pp. 117-126.
- [14] Bourque, P. et al. (2004). [Guide to the Software Engineering Body of Knowledge](#). USA: IEEE Computer Society.
- [15] Sommerville, I. (2005). [Ingeniería del software](#). Madrid: Pearson Educacion.
- [16] Pressman, P. (2010). [Ingeniería del software: Un enfoque Práctico](#). México: McGraw-Hill.
- [17] UPTC (2009). Proyecto académico educativo - Ingeniería de sistemas y computación. Tunja: UPTC.
- [18] Salas, W. (2005). [Formación por competencias en la educación superior. Una aproximación conceptual a propósito del caso colombiano](#). in Revista Iberoamericana de Educación 36(9), pp. 1-10.
- [19] Barriga, C. (2004). [En torno al concepto de competencia](#). Educación 1(1), pp. 43-57.
- [20] Díaz, F. & Hernández, G. (2002). [Reseña de Estrategias Docentes para un Aprendizaje Significativo](#). México: McGraw-Hill.
- [21] Hawes, G. & Corvalán, O. (2005). [Aplicación del enfoque de competencias en la construcción curricular de la Universidad de Talca, Chile](#). Revista Iberoamericana de Educación 40(1), pp. 1-17.
- [22] Bausela, E. (2004). [Metodología de Investigación Evaluativa](#). Boletín de Estudios e Investigación 5, pp. 183-191.
- [23] Pérez, R. & Gallego, R. (2000). [Competencias cognoscitivas y evaluación](#). Tecné, episteme y didaxis 8, pp. 128-136.
- [24] Gómez, G. et al. (2013). [Consideraciones técnico-pedagógicas en la construcción de listas de cotejo, escalas de calificación y matrices de valoración para la evaluación de los aprendizajes en la Universidad Estatal a Distancia](#). San José: UNED.
- [25] UPTC (2013). [Procedimiento de autoevaluación de programas, Instructivo: taller de gradación de cumplimiento y emisión de juicios](#). Tunja: UPTC.
- [26] Rincón, L. (2007). [Curso elemental de probabilidad y estadística](#). México: UNAM.
- [27] Dougglas, H. (2011). [Análisis de desarrollo por competencias, desde la enseñanza asistida por computador](#). Colombia: Fundación universitaria san Martín.
- [28] Chuquin, S. & Otálora, J. (2015). [Entorno integral de enseñanza aprendizaje: Diseño y Construcción de Software Dirigido por SWEBOK](#). Revista Tecnológica ESPOL 28(5), pp. 378-394.
- [29] IBM (2014). [IBM SPSS Statistics for Windows](#). Australia: Swinburne University of Technology.
- [30] Boza, A. & Toscano, M. (2012). [Motivos, actitudes y estrategias de aprendizaje: Aprendizaje motivado en alumnos universitarios](#). Profesorado 16 (1), pp. 125-142.
- [31] Palacios, B., Gutiérrez, A. & Cruz, M. (2013). [Investigar la Comunicación hoy. Revisión de políticas científicas y aportaciones método lógicas](#). España: AE-IC.
- [32] Flores, J. & Rodríguez, G. (1996). [Metodología de la investigación cualitativa](#). Granada: Aljibe.
- [33] [ATLAS/ti](#). Version 4.2.
- [34] Pérez, P., García, F. & Piattini, M. (2012). [La reingeniería como tópico en la docencia de la ingeniería del software: Una experiencia práctica](#). Actas XVIII JENUI (pp. 335-342). Ciudad Real, España.

32. Gamificación y videojuegos para la resolución de problemas tecnológicos por parte de técnicos, tecnólogos e ingenieros

Pablo Góngora T.

Fernando Martínez R.

Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central. Bogotá, Colombia.

1. Introducción

En el proceso de atención a los problemas técnicos, tecnológicos y de ingeniería, en la que continuamente se ven involucrados los ingenieros les permite adquirir la experiencia suficiente para reflexionar en ellos, para buscar nuevas técnicas o mejorar los procedimientos y lograr soluciones más eficientes y eficaces, rápidas, objetivas, oportunas y apropiadas, que generen confianza en la sociedad. Debido a esto, los autores de este capítulo presentan un diseño metodológico que les facilite a técnicos, tecnólogos e ingenieros unificar criterios y procedimientos para el manejo eficiente en la solución de problemas tecnológicos, que, por su naturaleza, requieren atención rápida, segura y costeable, a la vez que con la confiabilidad esperada en la industria.

Por otro lado, en las empresas, la innovación, los cambios profundos y la competitividad, exigen soluciones eficientes y amigables con el medio ambiente, lo que obliga a los ingenieros a buscar capacitación permanente e innovadora. En este sentido, el grupo de investigación Virtus se ha dedicado a repensar una herramienta novedosa para recolectar la información de las necesidades directamente en la industria, donde continuamente aparecen problemas técnicos a los que se le debe dar solución inmediata. En este sentido se desarrollaron tres juegos bajo las normas de la gamificación o ludificación, como un instrumento para reemplazar las encuestas y entrevistas tradicionales, rompiendo el paradigma rígido de trabajo de campo que generalmente se utiliza en investigación para recabar información de un fenómeno a estudiar.

Se seleccionaron los sectores objeto de estudio para iniciar los contactos y aplicar los tres juegos, cuyas temáticas son la abstracción, los estudios de casos y la lógica por bloques, que se encuentran en un subdominio del sitio web del grupo de investigación. Una vez se termine la fase de aplicación se tomará la información obtenida y se tratará mediante minería de datos para la gestión de los resultados y su correspondiente análisis, el cual culminará con el diseño del modelo o metodología que se aplica en la industria para solucionar un problema.

2. Descripción del proyecto

2.1 Planteamiento

Al analizar los procesos *científicos* versus los *tecnológicos*, se encuentra que ambos son formas organizadas del conocimiento, aunque con fines distintos y que conforman dos continuos complementarios, es decir, que trabajan de manera interrelacionada. Pero, al hacer una observación detallada, se perciben diferencias casi imperceptibles, lo que genera un desconocimiento de lo que contempla cada uno de ellos. Esto confunde a muchos investigadores, cuando afirman que la investigación tecnológica no existe y que en realidad es una rama de la investigación aplicada.

Una de las causas para esta confusión es la poca literatura que se encuentra respecto a los lineamientos de la investigación tecnológica. A este respecto, dos investigadores se tomaron el trabajo de sistematizar sus apreciaciones y compartirlas con la comunidad

académica y empresarial, en torno a la investigación tecnológica y haciendo énfasis en su diferencia con otros tipos de investigación. Los aportes de Fernando García Córdoba [1] y José Cegarra Sánchez [2] se pueden considerar como intentos de ubicar a la investigación tecnológica en el lugar que le corresponde y diferenciarla de las demás. Desafortunadamente, no profundizan en la formulación de un método que oriente investigaciones de corte tecnológico para la industria, aunque aportan algunas ideas al respecto que se pueden desarrollar.

2.2 Formulación

¿Cuál es la metodología o método utilizado por los técnicos, tecnólogos e ingenieros para solucionar problemas tecnológicos en la industria?

2.3 Justificación

El proyecto permitirá la composición de una metodología para el desarrollo de investigaciones tecnológicas, que oriente a técnicos, tecnólogos e ingenieros acerca de las diferentes investigaciones que tienen lugar en la industria. De igual forma, los académicos podrán aclarar la confusión frente al tipo de investigación, para facilitar la orientación de trabajos de grado en el marco de la investigación pura y la aplicada, contando con la alternativa de la investigación tecnológica. También se propondrán nuevas formas para recolectar información mediante el uso de las reglas de gamificación. Esto generará una nueva forma de trabajo, alternativa a los métodos tradicionales de encuestas o entrevistas, para recoger datos de manera dinámica e involucrando a quien se le aplica el instrumento como agente activo del mismo.

Este tipo de investigación se hace necesaria en la medida que se podrá analizar la forma como resuelven problemas los técnicos, tecnólogos e ingenieros; de igual forma y haciendo uso del método inductivo, se obtendrán conclusiones en cuanto al proceso que aplican para resolver problemas tecnológicos. El proyecto recobra importancia en la medida que con él se podrá integrar en forma interdisciplinaria a la academia y la industria en la búsqueda de una metodología que permita orientar los procesos de investigación tecnológica. En la academia, específicamente se busca una orientación apropiada que facilite el desarrollo de proyectos de grado y para evitar la confusión a la que llegan los estudiantes para desarrollar proyectos de corte tecnológico.

2.4 Marco teórico

1. Diferencias entre Ciencia y Tecnología

En la Tabla 1 se visualizan las diferencias entre Ciencia y Tecnología. En resumen, cuando los conocimientos adquiridos en la ciencia aplicada se trasladan al campo de lo concreto, con el fin de configurar un proceso o de fabricar un artefacto, entonces nos entramos en el campo de la tecnología [3].

2. Productos de la investigación Científica y Tecnológica

- Datos. Como resultado de la observación, la experimentación y la encuesta.
- Generalizaciones. Producto de la abstracción de los datos efectuada por el sujeto y que se expresan en principios, leyes y teorías.
- Hipótesis o conjeturas. Las cuales se apoyan en el conocimiento disponible y han de ser sometidas a prueba.
- Interpretación teórica. En términos filosóficos y metodológicos de los productos científicos generados.

Los productos que se perciben de forma directa en la investigación tecnológica son:

- Artefacto tecnológico. Producto material que satisface una necesidad.
- Planeación de acciones específicas para la realización exitosa del trabajo.
- Planteamiento de procesos, para transformar, adaptar o eliminar hechos presentes.

Tabla 1. Comparativo entre Ciencia y Tecnología

Ciencia	Tecnología
Procura conocer la realidad de manera planeada, consciente, crítica y objetiva.	Procura transformar controlada y exitosamente la realidad.
Busca saber el porqué de la precisión conceptual y teórica para comprender y explicar la realidad.	Busca producir elementos conceptuales, procedimentales o materiales para proveer un bien o servicio.
Busca descubrir el funcionamiento del mundo y las conexiones entre las cosas.	Busca proporcionar un <i>saber hacer</i> con la realidad para transformarla y obtener beneficios.
Es conocer para explicar.	Es conocer para transformar.
Procura favorecer la generación del conocimiento y permitir su verificación.	Determinar el qué, cómo y con qué, para asegurar una intervención eficaz en una realidad concreta.
El fin último es obtener un conocimiento verificable que explique fielmente la realidad.	Usa el conocimiento previamente comprobado en la práctica para resolver un problema tecnológico.
Busca saber la verdad.	Busca un saber operativo.
Busca una construcción intelectual en torno a los hechos y los articula en conjuntos explicativos (leyes, conceptos, teorías).	Busca actuar en su realidad y modificarla según sus necesidades e intereses.
Datos racionales, explicativos, metódicos, sustentados y objetivos, buscando conformar leyes universales.	Información de carácter operativo o ejecutable, para favorecer la generación de un bien, la satisfacción de una necesidad o la prestación de un servicio.
Información disponible en tesis, monografías, libros o tratados (énfasis en el documento).	Información disponible en planos, memorias de cálculo, manuales o instructivos.
Se establecen, publican y difunden los logros que deben ser aprobados por la comunidad científica.	Los logros forman parte del <i>saber hacer</i> , del <i>saber cómo</i> y se preservan, hermetizan y protegen.
Difunde el conocimiento.	Comunica de manera selectiva.
El conocimiento científico es claro y preciso.	El conocimiento tecnológico es especializado, práctico y útil.
Explica la realidad estudiada y establece nexos entre los hechos conocidos.	Implementa las acciones o medios previamente ideados.
El investigador escoge libremente el problema.	Una necesidad u obstáculo define el problema.
Plantea una hipótesis.	Plantea una solución.
Valida las hipótesis planteadas.	Evalúa la intervención, cronograma, presupuesto, rentabilidad/productividad.
Plantea un Proyecto de Investigación.	Plantea un Proyecto de Intervención.
Se puede quedar en un ejercicio académico.	Es preciso que procure un bien, un logro concreto.
Actúa en lo cognitivo.	Actúa en lo práctico.
Quiere el saber por el saber mismo.	Busca construir un entorno nuevo o mejor.
Persigue un saber experto y observa la realidad. Mira, escucha, palpa, gusta, siente, lee, experimenta y obtiene todo tipo de conocimientos directos.	Busca un saber instrumental. Determina el problema a resolver o la necesidad que se debe satisfacer.
Conoce a partir de los diversos datos obtenidos. Analiza su veracidad.	Documenta para allegar información que lleve a actividades concretas.
Verifica y comprueba experimentalmente.	Diseña una respuesta, esboza un producto.

3. Variables relevantes que aparecen en la investigación tecnológica [4]

- Tiempo. La solución no es tal si llega demasiado tarde.
- Rentabilidad y ROI (Return On Investment). La solución debe proporcionar un beneficio y dar un retorno social o económico.
- Calidad. Lo hecho no solamente debe resolver la situación, sino que la debe superar con eficiencia y eficacia.
- Cliente. Las soluciones tecnológicas afectan a las personas.
- Acceso a la información. La investigación tecnológica requiere obtener gran cantidad y variedad de información en un tiempo reducido.

2.5 Estado del arte

Fernando García [1] destaca la importancia de la investigación tecnológica, tanto para la ingeniería como para lo social, e indaga sobre el desarrollo tecnológico contemplando y analizando cada una de las etapas: investigación, proceso de idear e innovación. Para este autor, es evidente que una de las preocupaciones de los gobiernos y de las empresas es disponer de potencial humano altamente cualificado, que les permita situar a sus países y organizaciones en los puestos más avanzados de la ciencia y la tecnología. Para ello, es necesario que se formen en I+D+i y asignar los recursos necesarios para que puedan desarrollar sus funciones eficazmente. El objetivo de este autor es suministrar la metodología que se debe utilizar para formar a estos profesionales, adaptándola en cada caso a las particularidades del área en donde se debe investigar.

José Cegarra [2] trata temas como la ciencia, la tecnología, la investigación científica y tecnológica, el investigador y sus características, los métodos de la investigación, un método general de investigación, la investigación en la industria, la creatividad en la investigación, la difusión de la investigación, la comunicación en la innovación tecnológica, evaluación de la eficiencia de la investigación, control de los proyectos de la investigación estructuras de investigación e innovación, actualidad y perspectiva científica, y actualidad y previsión tecnológica.

Idana Rincón [5] indica la importancia de distinguir entre varios aspectos conceptuales, tales como los técnicos y metodológicos, consiste en precisar los detalles que debe conllevar a cada tipo de investigación; considerando que ambas se asumen como una modalidad cuyo referente todavía no se aborda en profundidad, por lo que se quiere aportar un enfoque en pro de definir mejor los conocimientos subyacentes en el área metodológica, para contribuir al perfeccionamiento del dominio operativo al momento de desarrollar investigaciones. Metodológicamente aborda técnicas de análisis reflexivo, estableciendo analogías y comparaciones bajo un análisis cualitativo de las variables, permitiendo exponer conclusiones relevantes para la praxis investigativa. Finalmente, concluye que es indispensable lograr una distinción precisa y clara en el abordaje metodológico de ambas modalidades de investigación, porque en la elaboración y propuestas de proyectos bajo un concepto tecnológico, muchas veces se sigue una metodología rígida, inflexible y poco creativa, con patrones sumidos en la investigación científica, sobre todo con el asesoramiento de especialistas con conocimientos más arraigados en las investigaciones en lo social, lo que no permite canalizar el fin último de las políticas propuestas. No obstante, consiguiendo definir una coherente estructura metodológica, se incrementarían los conocimientos tecnológicos y serían accesibles a todos los actores del sistema social, porque desde el punto de vista económico el conocimiento es un factor importante que crea valor en los distintos sectores a través de la innovación y la optimización de procesos, favoreciendo el desarrollo de una organización o de un país. De acuerdo con la autora, si se emprende un modelo metodológico se pueden cimentar ideas e iniciativas que promuevan creatividad, invención e innovación, sin que queden dispersas, mal orientadas o con abordajes totalmente diferentes, lo que al final no permite obtener resultados correctos y deseados para cada investigación particular.

2.6 Marco referencial

- Gamificación. La gamificación les permite a las personas interactuar con la vida cotidiana para mejorar sus hábitos, aprender mejor e incluso a mejorar la producción en una empresa. Por eso es que se puede mirar como una ayuda para mejorar, no como un simple juego. Uno de los ejemplos que se nombra tradicionalmente es el que

incentiva al uso de escaleras tradicionales y no de las eléctricas. En ese experimento se adecuaron las escaleras para que cuando una persona pisara un escalón sonara una nota musical, el resultado fue que el uso de este tipo de escaleras se incrementó en un 66%, lo que demuestra que la gamificación no es sólo un juego y que puede ayudar en el mejoramiento de los procesos, además de brindar algo de diversión [6].

- ¿Qué es un juego? Si la gamificación, un juego es un sistema en el que los jugadores participan en un conflicto artificial, definido por reglas, que se traduce en un resultado cuantificable [7]. Al juego se le atribuye las siguientes características:
 - Sistema o espacio de juego
 - Jugadores
 - Abstracción de la realidad, parcial y corta
 - Desafíos
 - Reglas
 - Interactividad
 - Retroalimentación
 - Resultados cuantificables
 - Reacciones – emociones
- ¿Qué es gamificación? Para [8], es un proceso de utilizar el pensamiento y la mecánica de juego para atraer al público y resolver problemas. Además de las características del juego, la gamificación también tiene:
 - Mecánicas
 - Estética
 - Desafíos – lógica
 - Enganchar, atraer jugadores
 - Personas
 - Motivación
 - Promoción de aprendizaje
 - Resolución de problemas

Gracias a las redes sociales y al alto número de video juegos existentes, la gamificación ha tenido gran acogida y ha crecido de manera exponencial. Las personas que usan videojuegos son las mismas que le dan paso a la gamificación. Las técnicas de hoy se están volviendo antiguas, el futuro del aprendizaje es la gamificación. Gracias a esto se podrá explotar de mejor manera la capacidad mental de las personas, las empresas podrán alcanzar mayor producción y los individuos se comportarán mejor.

- ¿Qué no es gamificación? Es importante considerar algunos aspectos que no hacen parte de la gamificación, tales como:
 - Premios y puntos
 - Trivialización del aprendizaje
 - Nueva herramienta, de lo contrario es antigua
 - Fácil de desarrollar e implementar
 - Un simple juego
- Gamificación vs juegos serios. Los juegos serios implican una aplicación simple para lograr un objetivo simple, mientras que la gamificación busca incentivar mediante un objetivo concreto, que se especifica mediante metas y logros. La gamificación busca que la enseñanza sea sencilla y no trivial, mientras que los juegos serios pueden llegar a ser aburridos y hacer ver los puntos en una clase como obligatorios para una nota. Por eso es que, para los estudiantes, la gamificación es más divertida que los juegos serios.

2.7 Objetivos

- *General.* Diseñar una metodología de investigación tecnológica para la resolución de problemas tecnológicos en la academia y en la industria.
- *Específicos*
 - Determinar el estado del arte existente acerca de la investigación tecnológica, para establecer un punto de partida en la búsqueda de una metodología.
 - Diseñar videojuegos siguiendo las normas de gamificación para la recolección de información de determinadas variables.
 - Integrar elementos de adaptación, gamificación, retos tecnológicos y estadística en el desarrollo de videojuegos para la recolección de información respecto a la solución de problemas de índole tecnológico.
 - Implementar videojuegos desarrollados con elementos de adaptación, gamificación, retos tecnológicos y estadística en la Web, con acceso eficaz y eficiente.
 - Pilotear videojuegos con elementos de adaptación, gamificación, retos tecnológicos y estadística, para establecer el cumplimiento de requerimientos trazado en el diseño de los mismos.
 - Establecer una base de datos de empresas con distintos objetos de negocio, para establecer un contacto directo con cada una, como prerrequisito para la aplicación de videojuegos.
 - Aplicar videojuegos a una muestra representativa de técnicos, tecnólogos e ingenieros, para recolectar la información respecto a la forma como solucionan problemas tecnológicos.
 - Estratificar la información recolectada para cruzar los resultados encontrados.
 - Analizar la forma como los técnicos, tecnólogos e ingenieros resuelven problemas de índole tecnológico, para establecer aspectos comunes entre los distintos procesos.
 - Establecer correlaciones que permitan deducir procesos comunes en la solución de problemas de corte tecnológico, haciendo uso de software de Big Data.
 - Inferir la metodología utilizada para la resolución de problemas tecnológicos en la industria.
 - Explicitar la metodología utilizada en la solución a problemas tecnológicos en la industria.
 - Obtener conclusiones en cuanto al proceso que siguen los técnicos, tecnólogos e ingenieros para resolver problemas de índole tecnológico, a través del método inductivo – deductivo.

2.8 Metodología

La metodología para realizar esta investigación será de tipo híbrido, es decir, tanto cuali-cuantitativa. Será cuantitativa descriptiva en la medida que describe el estado, las características, los factores y los procedimientos presentes en la investigación tecnológica; y será investigación cualitativa desde la perspectiva de la investigación-acción-participación en la medida que se producirá un método que permita orientar las investigaciones tecnológicas en la búsqueda de formalizar la investigación en la industria.

De igual forma, la investigación será longitudinal en la medida en que la información se tomará en varios instantes de tiempo.

1. *Unidad y variables*

Técnicos, tecnólogos e ingenieros vinculados con las universidades o la industria a nivel nacional e internacional. El sector que impacta esta investigación son las empresas industriales que, de una u otra forma, hacen investigación tecnológica. Las variables son:

- Dependientes. Tiempo utilizado para solucionar un problema de índole tecnológico.
- Independientes. Procedimientos, métodos y protocolos formales utilizados para solucionar un problema de índole tecnológico.

Esta investigación se realiza entre enero de 2015 y diciembre de 2017 y tendrá como sede central la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central en la ciudad de Bogotá, pero su espectro alcanzará otras ciudades de Colombia y del exterior, en la medida que la muestra se tomará en ambos contextos. Los participantes serán:

- Población. Se tomarán como base 5000 empresas nacionales e internacionales, caracterizadas por su objeto de negocio basado en la tecnología industrial.
- Muestra. Se tomará una porción de la población representativa para la aplicación de los juegos creados utilizando reglas de gamificación y para recolectar la información necesaria para el estudio.

2. *Instrumentos y Equipos*

Para la recolección de la información se utilizarán tres juegos desarrollados bajo las normas de gamificación, instalados en un sitio web desarrollado para tal fin, asociado a una base de datos que permitirá la gestión de la información. Se usará un software para la gestión estadística y un software de Big Data para cruzar (correlacionar) la información encontrada y extraer los parámetros repetitivos para análisis y conclusiones.

3. *Fases*

1. Diseño y Planeación. II-2014. Productos: propuesta para entregar a la vicerrectoría de investigaciones. Cronograma General de todo el proyecto a realizar, la base de datos de las empresas que se tomará como población en el proyecto, estado del arte respecto a gamificación, experiencia de usuario e investigación tecnológica.
2. Elaboración de Instrumentos. I-2015. Productos: tres proyectos de grado de ingeniería de sistemas, tres juegos colocados en producción en la web, dos artículos de revisión, dos artículos de divulgación, participación en un evento nacional.
3. Pilotaje de los juegos desarrollados para la recolección de la información. II-2015. Productos: un artículo de divulgación, participación en dos eventos (1 nacional y 1 internacional), agenda de citas con la muestra para aplicar los juegos.
4. Recolección de la Información usando los juegos desarrollados. I-2016. Productos: base de datos de toda la información respecto a los procedimientos, métodos y protocolos usados por técnicos, tecnólogos e ingenieros para dar solución a problemas de índole tecnológico.
5. Análisis de la información recolectada. II-2016. Productos: informe dado por el software de Big Data utilizado y análisis logrado por los investigadores con ayuda del software de estadística, un artículo de divulgación, participación en dos eventos.

6. Conclusiones. I y II-2017. Productos: documentos donde se explicita la metodología utilizada por técnicos, tecnólogos e ingenieros para dar solución a problemas tecnológicos en la industria; manual de buenas prácticas para realizar investigaciones de tipo tecnológico; un artículo de divulgación; participación en dos eventos (1 nacional y 1 internacional).
7. Recomendaciones. I y II-2017. Producto: socialización del documento que oriente a la comunidad científica en otros trabajos de investigación que podrían escalar el que se presenta o algunas variantes del mismo. En la Tabla 2 se describen los productos esperados

8. Conformación y trayectoria del grupo de investigación

El grupo de investigación VIRTUS se originó a partir de reuniones y reflexiones de un grupo de docentes de la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, en torno a los ambientes virtuales de aprendizaje, aulas virtuales, educación virtual y todo lo referente a educación virtual y su implantación o conjugación con la educación presencial, en educación superior Técnica y Tecnológica. Se inició en enero de 2007, cuando el Ing. Fernando Martínez R., docente de planta, vislumbra la necesidad de generar un proyecto de investigación en herramientas virtuales de aprendizaje, como ayuda a los docentes en sus prácticas presenciales al interior del aula de clase. Inicialmente se quería estudiar el impacto de estas herramientas en la Escuela. Luego de varias reuniones con las directivas, se propuso realizar jornadas de sensibilización a los docentes de los programas profesionales. Lo anterior ha sido considerado como la primera fase de este proyecto.

Una segunda fase consistía en la capacitación de los docentes en plataformas virtuales, para lo que se eligió Moodle por ser software libre, robusto, escalable y modular. De esa forma, se dio origen al Diplomado en Plataforma Moodle, que hoy en día tiene más de 50 docentes capacitados en sus tres promociones en el uso de herramientas virtuales, para que sus quehaceres docentes estén acordes a la época y a la generación que se forma.

En agosto de 2007 se manifiesta la importancia de conformar un grupo para reflexionar, debatir y adelantar proyectos relacionados con los ambientes virtuales de aprendizaje en educación Técnica y Tecnológica. Una vez de acuerdo, se conforma el grupo de investigación, levantando el acta de constitución respectiva. El nombre que se escoge es grupo de investigación en ambientes virtuales de aprendizaje en educación técnica y tecnológica VIRTUS. En septiembre se hace la solicitud de aval a la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central (ETITC) y en octubre se obtiene su reconocimiento e institucionalización por parte de la ETITC. En agosto de 2010 se obtiene el reconocimiento del grupo y se categoriza en D y, desde entonces, ha obteniendo el reconocimiento reiteradamente, además, continúa trabajando en tecnología educativa, sistemas adaptativos, gamificación y sistemas recomendadores.

3. Consideraciones adicionales

Este es un proyecto que posiciona a la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central como institución que propone metodologías de investigación tecnológica, para ser usados (seguidos) por la industria y la academia. Además, todos los programas que ofrece la Escuela son industriales y la trayectoria de la misma la hacen importante como sello de credibilidad en la propuesta que se tomará como producto central de esta investigación.

Tabla 2. Productos esperados y potenciales beneficiarios

Generación de nuevo conocimiento			
Resultado/Producto Esperado	Indicador	Beneficiario	
Artículo en revista Indexada Categoría A	Artículo de divulgación entregado para arbitraje, socializando la metodología de investigación tecnológica propuesta.	Comunidad Académica y la Industria.	
Artículo en revista internacional indexada	Artículo de divulgación entregado para arbitraje, socializando los resultados encontrados (conclusiones) respecto de la forma de solucionar problemas tecnológicos en la industria.	Comunidad Académica y la Industria.	
Artículo en revista Indexada Categoría B	Artículo entregado para arbitraje, socializando resultados respecto a las pruebas piloto y ajustes de los instrumentos.	Comunidad Académica y la Industria.	
2 Artículos en revista Indexada Categoría C	Artículos entregados para arbitraje, socializando la fase de análisis, diseño y desarrollo de los videojuegos haciendo uso de adaptación y gamificación; socializando el estado del arte que soporta la investigación.	Comunidad Académica y la Industria.	
Desarrollo tecnológico e innovación			
Resultado/ Producto Esperado	Indicador	Beneficiario	
Tres videojuegos implantados en el servidor de Virtus, para la Web, creados bajo las normas de gamificación y con inteligencia artificial (adaptación).	Puesta en producción de los tres videojuegos.	Comunidad Académica y la Industria.	
Apropiación social del conocimiento			
Resultado/ Producto esperado	Indicador	Beneficiario	
Propuesta metodológica para seguir en investigaciones de tipo tecnológica en la industria.	Composición y presentación de la metodología resultante.	Comunidad Académica y la Industria.	
Ponencias en 4 eventos nacionales	Certificado de participación en modalidad oral	Comunidad Académica y la Industria.	
Ponencias en tres eventos internacionales	Certificado de participación en modalidad oral	Comunidad Académica y la Industria.	
Impactos esperados a partir del uso de los resultados			
Impacto esperado	Plazo	Indicador	Supuestos
Fortalecimiento del grupo de investigación y sus líneas de investigación.	Largo	Consolidación teórica y producción académica en el tema de gamificación y adaptación.	El proyecto se articula las líneas del grupo y mejora sus índices de visibilidad y producción.
Innovación frente a una nueva forma de recolectar información en investigación por medio de gamificación.	Mediano	Resultados del proyecto	Los resultados del proyecto son visibles y reutilizables.
Instrumentos desarrollados para explicitar la forma de solucionar problemas de índole tecnológica.	Mediano	Productos del proyecto: tres videojuegos puestos funcionando en plataforma.	Los investigadores valoran y emplean los resultados en sus investigaciones.
Presentación de una nueva propuesta metodológica para ser utilizada en la academia y en la industria en los distintos procesos de investigación tecnológica.	Largo	Resultados del proyecto.	Los resultados del proyecto son visibles y reutilizables
Integración academia-industria para lograr una solución efectiva y eficaz frente a los problemas tecnológicos	Largo	Resultado del proyecto de investigación.	Las empresas mejoran su productividad, rentabilidad y tiempos de respuesta ante el reto de solucionar un problema de índole tecnológico.

Referencias

- [1] García, F. (2005). *La investigación tecnológica: Investigar, idear e innovar en ingenierías y ciencias sociales*. México: Limusa.

- [2] Cegarra, J. (2004). [Metodología de la investigación científica y tecnológica](#). Madrid: Díaz de Santos.
- [3] Cegarra, J. (2011). [Metodología de la investigación científica y tecnológica](#). Madrid: Díaz de Santos.
- [4] García, F., Morales M. & Muñoz, C. (2010). [De la investigación científica a la Tecnológica en las organizaciones](#). UPIICSA XVII(VII), pp. 3-13.
- [5] Rincón, I. (2010) [Investigación científica y tecnológica como factores de innovación](#). Entelequia Revista interdisciplinar 14, pp. 127-147.
- [6] Kapp, K. (2012). [The gamification of learning and instruction: Game-based methods and strategies for training and education](#). USA: Wiley.
- [7] Salen, K. & Zimmerman, E. (2004). [Rules of Play: Game Design Fundamentals](#). USA: MIT Press.
- [8] Zichermann, G. & Linder, J. (2013). [The Gamification Revolution: How Leaders Leverage Game Mechanics to Crush the Competition](#). USA: McGraw-Hill.

33. Detección de la mano en tiempo real basada en grafos isomorfos

Alexander Cardona L.

Fundación Universidad Autónoma de Colombia. Bogotá, Colombia.

1. Introducción

Con la aparición de sensores de captura de imágenes de profundidad de bajo costo, como el Kinect, se han abierto las posibilidades de brindar a un mayor número de personas acceso a nuevas formas de interacción con la máquina. En este sentido y debido a que las manos son uno de los principales medios de interacción con objetos de uso cotidiano, buena parte del trabajo se ha enfocado en la detección y reconocimiento de la postura de una o ambas manos a partir de una imagen o serie de imágenes con información de profundidad. Varios trabajos [1-3] resumen los principales avances en este sentido y son una muestra de la cantidad de métodos de reconocimiento que se han elaborado o mejorado en los últimos años.

Pero, a pesar de esta diversidad, aún no se cuenta con un método que pueda clasificar cualquier postura de la mano con un porcentaje de precisión cercano al 100% en máquinas de bajo costo. Aunque algunos trabajos basados en métodos de aproximación [4, 5] se acercan a una precisión del 90%, no logran una velocidad de ejecución cercana a 30 fps, lo que no es sorpresa teniendo en cuenta la variedad de geometrías, la flexibilidad y la cantidad de articulaciones de una mano, que dan lugar a diversas posturas.

En general, los métodos actuales que trabajan sobre imágenes de profundidad, es decir, sobre imágenes que además de la información de color mantienen para cada punto una medida de distancia de dicho punto hasta el sensor, se pueden dividir entre los que buscan clasificar una imagen entre un grupo predefinido de posturas y los que buscan obtener un *esqueleto* que describa la postura presente en la imagen. Aunque estos últimos parecen ser los ideales, su velocidad de ejecución aún no se acerca a la presentada por métodos que se basan en la detección de posturas limitadas. Por esto todavía se encuentran muchos trabajos aplicados que no utilizan un esqueleto, sino que se basan en el aprovechamiento de las características geométricas y su posterior clasificación [6-9].

El trabajo que se presenta en este capítulo propone un método para la detección de una mano abierta, con la palma frente al sensor, dentro de una imagen de profundidad, y muestra los resultados de una primera etapa de desarrollo, la cual intenta conseguir una medida aproximada del desempeño del método propuesto. No se pretende obtener resultados definitivos, porque las pruebas no incluyen una población adecuada, ni se evalúa la invariancia frente a la rotación o el escalado. Se busca una medida que permita establecer si se continúa con la refinación del método y una implementación optimizada del mismo, es decir, si el método propuesto tiene posibilidades de obtener una eficacia similar a la de otros métodos cuando se ejecuta en máquinas de consumo masivo.

La idea es aprovechar las características geométricas para lograr un método de bajo consumo de recursos computacionales, el cual se inspira en otros trabajos que se basan en el aprovechamiento de características geométricas [7-13]. Pero, a diferencia de estos trabajos, pretende ser lo bastante general para adaptarlo al reconocimiento de otras posturas. El método de detección propuesto se basa en la comparación de grafos isomorfos. La información de profundidad de cada una de las regiones a comparar se describe en un grafo, de tal forma que su comparación con un otro previamente almacenado brinda una medida para saber si una imagen de profundidad corresponde a la imagen de una mano abierta.

A diferencia de otros trabajos basados en propiedades geométricas, este método asume que una superficie se diferencia de otra por la longitud del camino que hay que recorrer sobre la superficie, para unir cada una de sus esquinas. El propuesto, como sucede en la mayoría de estos métodos, requiere de un proceso previo de segmentación. Sin embargo, en este caso el procedimiento no sólo se utiliza para separar la región objetivo, sino que también se emplea para establecer las posibles esquinas, lo que redundaría en el menor consumo de recursos computacionales.

2. Descripción general

El objetivo del presente trabajo es proponer un método de detección de la mano abierta y estudiar la viabilidad de su implementación en máquinas de bajo costo. Con este fin, se diseñó un método de detección, se realizó la respectiva codificación y posteriormente se llevaron a cabo las correspondientes pruebas de desempeño.

2.1 Método de detección

El método de detección propuesto requiere la obtención de un conjunto de datos que describa las características geométricas relevantes de las regiones a comparar (descriptor). Estos datos se obtienen durante el tiempo de ejecución para cada imagen de profundidad y se comparan con los datos previamente almacenados, los cuales corresponden a la imagen de una mano abierta *ideal*. En términos generales, y para cada imagen de entrada, se desarrollan los siguientes procedimientos:

1. Micro-segmentación de la región correspondiente a la mano. Para ello, inicialmente se segmenta la región de la imagen correspondiente en subregiones (super-pixels), cuyo tamaño depende de la posición de la región con respecto al sensor. La ubicación inicial de la región se puede realizar mediante el uso de características de color o simplemente asumiendo que la mano es el objeto más cercano al sensor.
2. Elaboración de un grafo que describa los segmentos que componen la región, que describa la relación geométrica de dichas regiones.
3. Detección de nodos del grafo que corresponden a picos de la región. A partir del grafo anterior se determinan las posibles esquinas relevantes de la región (picos o salientes).
4. Elaboración de un descriptor que contenga las características geométricas de los picos detectados. En el método propuesto, el descriptor es básicamente una matriz de adyacencia que mantiene los valores de los arcos del grafo, es decir, la relación espacial de cada una de las esquinas previamente detectadas.
5. Comparación del descriptor obtenido con un descriptor previamente almacenado, mediante un algoritmo para comparación de grafos isomorfos basado en heurísticas, estableciendo así un valor de similitud de la región de entrada con la postura que se desea reconocer. Para ello se emplea una variación del algoritmo Elastic Bunch Graph Matching [14], para comparar grafos isomorfos y utilizado en reconocimiento facial.

En esta primera etapa de desarrollo, el descriptor pre-almacenado (con el cual se van a comparar los descriptores generados en tiempo real) se crea manualmente, intentando describir en un grafo las principales salientes (dedos) presentes en la imagen de una mano abierta. En la etapa actual de desarrollo no se tiene en cuenta la secuencia de imágenes, ni los cambios en la imagen producidos por el movimiento de la mano o el ruido del sensor. El método de detección se aplica sobre cada una de las imágenes de entrada (cada *frame* del *stream* de entrada).

2.2 Codificación

Con el fin de probar la viabilidad del método propuesto, se realizó una codificación en lenguaje C++. Debido a que la finalidad del trabajo actual no es establecer de manera precisa la eficacia del método de detección, no se realizaron optimizaciones al código obtenido, ni se aprovecharon las ventajas de procesamiento de la unidad de procesamiento gráfico (GPU). También se usaron alternativas conocidas de los algoritmos de super-pixels y Elastic Bunch Graph Matching, sin entrar en el estudio de otros.

2.3 Pruebas

Para probar el método propuesto se utilizó un conjunto de 800 imágenes de profundidad, que incluyen cinco posturas diferentes de la mano (160 imágenes por cada postura) de una misma persona, obtenidas por medio del sensor Kinect de Microsoft. Las pruebas se orientaron a determinar la velocidad de ejecución en una máquina de bajo costo y a obtener una primera aproximación de la precisión del algoritmo. En las siguientes secciones se describen los principales aspectos del método de detección propuesto y los diferentes algoritmos que lo componen.

3. Elaboración del descriptor

El método de detección se centra en la elaboración de un descriptor para cada *frame* de profundidad del *stream* de entrada y la comparación con uno pre-almacenado. A continuación, se describen los pasos necesarios para la obtención de este descriptor.

3.1 Segmentación

La segmentación tiene como finalidad subdividir la región de puntos, correspondientes a la mano, en subregiones que servirán de punto de partida para la obtención de un descriptor de la postura de la mano. En este caso se asume que ya se cuenta con la región de puntos correspondientes a la mano o que ésta se obtiene por métodos sencillos. Para el caso de las pruebas realizadas, al igual que en [4, 15, 16], se asumió que la mano era la región más cercana al sensor y no se utilizó la información de color.

Existen diversos métodos para obtener una segmentación fina de una región (super-pixels), incluyendo varios que trabajan con información de profundidad. En este caso se optó por un método que brindara el mejor desempeño en máquinas de bajo costo, de tal manera que el mayor esfuerzo en términos computacionales se pudiera destinar a la clasificación de la postura de la mano. En este sentido se eligió un algoritmo que trabaja directamente sobre el *frame* de profundidad y que tiene, como principal criterio para la segmentación, la distancia entre un punto y sus vecinos. Sin embargo, no se emplean directamente los valores de profundidad contenidos en la imagen, sino las coordenadas proyectadas (x, y, z) para cada punto, teniendo en cuenta las características del sensor. Esto permite trabajar con unidades de distancia reales (centímetros o metros) en el algoritmo de segmentación. En general, el algoritmo es el siguiente:

Img: Imagen de profundidad

para cada punto P de *Img*:

si P no tiene vecinos

crear nuevo segmento N

agregar P a N

sino

para cada vecino superior S de P

D_{sp} : distancia entre S y P

```

Dpc: distancia de P al
centro del segmento
si Dsp < Cs y Dpc < Ts
agregar P al segmento
sino
crear un nuevo segmento N
agregar P a N
finSi
finPara
finSi
finPara

```

Donde C_s y T_s son constantes que se emplean para definir el límite aceptable de distancia entre los puntos de un segmento y el tamaño relativo del mismo, respectivamente. Los valores de las constantes se determinaron a prueba y error, siendo finalmente $C_s = 1.5$ cms y $T_s = 5$ cms para una persona adulta. Dichos valores se deberán ajustar en una versión final, dependiendo del tamaño de la región que se pretende detectar. Como se puede observar, en esencia el algoritmo de segmentación es similar a los primeros algoritmos de segmentación aplicados a imágenes de color, pero este algoritmo hace uso de la distancia entre los puntos y no del color. Por lo tanto, también adolece de todas las deficiencias observadas en imágenes de color, las cuales se ven afectadas en gran manera por el ruido y por bordes discontinuos, obteniéndose en muchos casos segmentos de formas irregulares y otros con muy pocos puntos.

Los segmentos con pocos puntos no son un inconveniente, porque se pueden eliminar o unir a otros segmentos; por otro lado, los segmentos irregulares sí afectan el desempeño del algoritmo de clasificación. La relación entre la precisión versus el impacto en el desempeño no se aborda en este trabajo. Se mantiene entonces un algoritmo de segmentación que genera segmentos irregulares, pero computacionalmente eficientes. El algoritmo presentado en [17] es un buen ejemplo de que es posible lograr una segmentación relativamente eficiente, que trabaje sobre información espacial y que tenga en cuenta otras características para la definición de segmentos, tales como las normales o el color. A futuro, se podría estudiar el empleo de este tipo de algoritmos para mejorar los resultados de la fase de segmentación.

La Figura 1 y la Figura 2 muestran algunos ejemplos del resultado de la segmentación de una mano ubicada a una distancia de aproximadamente un metro del sensor. Se puede observar que muchas veces los segmentos sobrepasan el tamaño de la mano, porque la región seleccionada se basa en el tamaño de la región sin importar la postura. Tal como se observa en estas Figuras, no todas las regiones son cóncavas. Así mismo, un pico (como la punta de un dedo) no necesariamente está compuesto de una única región. Esto no dificulta la elaboración del grafo que describe la región, pero introduce inconvenientes en la selección de las regiones que corresponden a esquinas relevantes de la región.



Figura 1. Ejemplo Segmentación 1



Figura 2. Ejemplo segmentación 2

3.2 Descriptor

Como descriptor de la región se emplea una matriz de adyacencia, correspondiente al grafo que describe la distancia que hay que recorrer para unir las posibles esquinas de la región; el grafo se construye en un proceso de tres pasos:

1. En el paso inicial las regiones resultantes del proceso de segmentación se describen en un grafo G , en el que cada nodo corresponde a las coordenadas tridimensionales del punto central de la región y los arcos a la distancia entre dichos puntos, sin tener en cuenta las regiones vacías o con un número muy limitado de puntos. Todo esto, considerando que dos nodos se unen con un arco si las regiones que representan son vecinas entre sí, como se observa en la Figura 3.

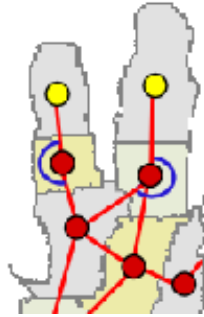


Figura 3. Nodos y arcos del grafo G

2. Luego se determinan los nodos que corresponden a las posibles esquinas de la región segmentada. Para ello se seleccionan los nodos cuyos arcos internos forman un ángulo interior menor o igual a 90 grados (amarillos en la Figura 3). Este valor puede ser superior si se desean incluir aquellos segmentos donde la silueta no tiene un cambio brusco. Este método presenta imprecisiones en regiones convexas que hacen parte del borde, pero que no son realmente esquinas de la región. Como en algunos casos el método de segmentación escogido genera este tipo de subregiones (especialmente en forma de L), se optó por usar un valor límite del ángulo superior a 90 grados y tratar con la existencia de las *falsas esquinas* en la etapa de clasificación. También se asumió que no hay dos nodos vecinos que a su vez sean esquinas, es decir, que las subregiones son suficientemente pequeñas como para evitar que dos esquinas se encuentren ubicadas demasiado cerca la una de la otra.
3. El tercer paso consiste en definir un nuevo grafo D , en el cual cada nodo corresponda a la ubicación del punto central de cada esquina (punto central de la región marcada como esquina) y en el que cada arco sea la relación entre la distancia y la longitud del camino más corto que une ambas esquinas en el grafo G .

La idea es que una punta pueda estar relativamente a corta distancia de otra de la misma región (como la punta de un dedo de una mano abierta se encuentra relativamente cerca de la punta de los otros dedos), pero no el recorrido que se debe realizar sobre la mano para llegar de una punta a otra. Por tanto, entre más prominente sea una parte de la región, mayor será el camino que habrá que recorrer para llegar a otro punto de la misma.

El descriptor D queda definido como la matriz de adyacencia de un grafo que describe la relación entre el tamaño de los caminos utilizados para llegar de una punta a otra de la región y la distancia euclidiana entre ellas. Por lo tanto, el grafo G queda conformado por el conjunto de Nodos $V = \{V_0, V_1, V_2, \dots, V_N\}$ (cada uno correspondiente a una subregión de

la mano) y su respectivo conjunto de arcos que une dichos nodos. El grafo D está constituido por el subconjunto de nodos $K = \{V_i \text{ tal que } V_i \text{ pertenece a } V \text{ y corresponde a una esquina de la región}\}$ y los nuevos arcos $R = \{R_{00}, R_{01}, R_{02}, \dots R_{MM}\}$, donde cada arco R_{mn} une el nodo m con el nodo n del conjunto K , con un valor calculado con la ecuación (1).

$$R_{mn} = \frac{\text{camino}(V_m, V_n)}{\text{distancia}(V_m, V_n)} \quad (1)$$

Donde la función *camino* corresponde a la longitud del camino desde el nodo V_m hasta el nodo V_n sobre el grafo G , mientras que la función *distancia* corresponde a la distancia euclidiana entre dichos nodos.

4. Clasificación

La clasificación se realiza mediante un algoritmo que compara el grafo D con un grafo previamente almacenado P , que posee las mismas características, es decir, que también es la representación de la longitud de los caminos utilizados para llegar de una esquina a otra de la región. Para el caso de este trabajo se generó un grafo de cinco nodos, correspondiente a la matriz de adyacencia de la Tabla 1.

Tabla 1. Matriz de adyacencia - descriptor

0.00	0.12	0.13	0.14	0.13
0.12	0.00	0.05	0.13	0.16
0.13	0.05	0.00	0.12	0.16
0.14	0.13	0.12	0.00	0.11
0.13	0.16	0.16	0.11	0.00

La cual se obtiene a partir de una representación de la mano abierta, como la que se muestra en la Figura 4. Representación que corresponde a la estructura de un grafo creado manualmente, garantizando que los nodos que representan *esquinas relevantes* solamente sean los que corresponden a las puntas de los dedos.

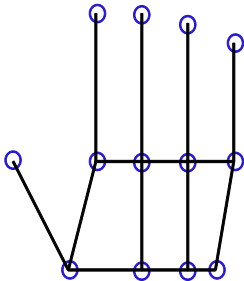


Figura 4. Grafo descriptor pre-almacenado

El algoritmo asocia de forma recursiva cada nodo del grafo D con un nodo del grafo P , buscando que la diferencia entre el valor de los arcos de los grafos (suma de los arcos de todos los nodos escogidos del grafo P) sea la menor posible, siguiendo para ello un procedimiento similar al utilizado en [14] para determinar si dos grafos tienen la misma forma. En cada iteración del algoritmo se selecciona un nodo del grafo D , el cual se asume que corresponde a un nodo del Grafo P , hasta tener una asociación con todos los nodos del grafo P (el grafo previamente almacenado) o hasta que el error sea mayor que el de una selección anterior.

Se procura no utilizar valores que pueden variar entre capturas, como la posición espacial de los nodos, por esta razón el valor de los arcos del grafo correspondiente al descriptor, no es directamente la longitud del camino para llegar de un punto a otro, sino

que este valor se divide por la distancia entre los puntos, obteniéndose en el caso ideal una relación relativamente similar para diferentes manos con la misma postura. Para mejorar el desempeño del algoritmo se usa una heurística que ayuda a determinar el orden en que se realiza la selección de los nodos del grafo D : seleccionar el nodo que haga que el valor promedio de los arcos descartados del grafo D sea el más similar al promedio de los arcos que aún no se seleccionan del grafo P . El algoritmo general es el siguiente:

```

Función similares(nodosP, nodosD, tabla):
  nodosP: nodos del grafo P
  nodosD: nodos del grafo D
  tabla: tabla hash
  Si longitud(nodosSelP) = longitud(nodosD)
  // nodos seleccionados, calcular error
  error = calcularError(tabla)
  retornar error
FinSi
// selecciona un nodo de cada grafo
ParNodos sel = elegir(nodosP, nodosD)
Tabla cpTabla = tabla.clonar()
// asociar nodos
cpTabla.colocar(sel.nodoP, sel.nodoG)
// elimina los nodos seleccionados
// de las listas y realiza una copia
// para el llamado recursivo
Lista<Nodo> cpNodosP = nodosP.clonar()
cpNodosP.eliminar(sel.nodoP)
Lista<Nodo> cpNodosD = nodosD.clonar()
cpNodosD.eliminar(sel.nodoD)
//llamado recursivo
similares(cpNodosP, cpNodosD, cpTabla)
finFunción

```

Donde la función *similares* es una función recursiva que recorre todos los nodos del Grafo P y selecciona un subconjunto de nodos para que sean comparados con cada nodo del grafo D . Para ello, recibe un listado de nodos aún no seleccionados del grafo P (variable *nodosP*), un listado de nodos aún no seleccionados del grafo D (variable *nodosD*) y una tabla que describe los nodos asociados (variable *tabla*). La función *calcularError* recibe la tabla que mantiene la asociación de nodos y retorna una medida de similitud de ambos grafos. Por otra parte, la función *elegir* recibe la lista de nodos que aún no se han seleccionado de ambos grafos y aplica una heurística para determinar una nueva posible asociación. El valor de similitud de los grafos se determina mediante el cálculo de un valor de error en el que, en teoría, entre menor sea el error retornado por la función, más similares serán los grafos. El error se determina en el momento en que todos los nodos del grafo P se han asociado a nodos del grafo D , y se calcula con la ecuación (2).

$$error = \frac{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M \frac{|P_{ij} - D_{ij}|}{M(M-1)}}{M(M-1)} \quad (2)$$

Donde M es el número de nodos del grafo, P_{ij} es el valor del arco que une el nodo i con el nodo j del grafo P , y D_{ij} es el valor del arco que une el nodo i con el nodo j del grafo D . A diferencia de la implementación tradicional de Elastic Bunch Graph Matching, el algoritmo presentado tiene la característica de no requerir que la cantidad de nodos de los grafos P y D sea la misma. El grafo D puede tener un mayor número de nodos, caso en el cual se seleccionarán los nodos más relevantes, tomando como base la heurística empleada. Este

hecho es importante porque el grafo posiblemente contará con nodos que representan esquinas *inexistentes* producidas por la forma irregular de las regiones.

En el trabajo actual, el valor del error a partir del cual se considera que la postura evaluada es similar a la almacenada, se determina manualmente a partir de la observación de los resultados de los casos de prueba. En el caso de una implementación definitiva, se debería aplicar una técnica automática para clasificar la región (una red bayesiana, una red neuronal, etc.).

5. Complejidad

La complejidad del método aplicado se mide de acuerdo con la complejidad de los diferentes algoritmos utilizados. El algoritmo de segmentación actual evalúa una única vez cada uno de los píxeles de *frame* de video, comparando la posición (x, y, z) del punto, con las posiciones de cada uno de sus 8-vecinos. Por lo tanto, el orden de complejidad O de dicho algoritmo es $O(WH)$, donde W y H corresponden a la resolución de la imagen (número de columnas y filas de puntos). Por otra parte, la complejidad del algoritmo que crea el descriptor depende de la cantidad de segmentos que produzca la región, que, en cualquier caso, será inferior al orden de complejidad del algoritmo anterior, porque para considerarse como tal un segmento debe tener al menos un punto.

El mayor costo desde el punto de vista computacional recae en el algoritmo de comparación de grafos. Si no se hiciera uso de una heurística, el algoritmo realizaría todas las permutaciones posibles para asociar cada uno de los nodos de un grafo con el otro (tendría una complejidad de orden exponencial). Inclusive con la heurística, el número de permutaciones es alto, por tal razón la implementación utilizada para las pruebas limita el número de llamados recursivos a costa de precisión: se limita el número máximo de nodos que puede tener cada descriptor, así como la profundidad de los llamados recursivos para asegurar un desempeño mínimo en todos los casos de clasificación. Se utilizaron nueve nodos por descriptor y un nivel de profundidad de máximo cinco niveles para el árbol de llamados. En el caso de que el número de posibles esquinas de la región sea mayor al límite de nodos, se seleccionan aquellas esquinas cuyo valor de la coordenada Y sea más alto, además, se asume que la rotación en la postura de la mano nunca será superior a 90 grados.

En total, el orden de complejidad del algoritmo sería, en el peor de los casos, 9^4 veces el orden de complejidad de la heurística y del algoritmo que calcula el error. Esto es $O(6561 * M^3)$, donde M es el número de esquinas que tiene la región. Por consiguiente, la complejidad total del algoritmo es $O(WH) + O(M^3)$, donde W y H corresponden a la resolución de la imagen y M al número de esquinas de la región de la mano detectada por el sensor.

El esquema presentado hasta el momento se centra en el reconocimiento de una postura. Si se quisiera reconocer una de varias posturas, se debe contar con un descriptor previamente almacenado para cada postura y realizar el procedimiento descrito para cada una de ellas, lo que da como resultado varios valores de error (uno para cada postura) y multiplica el tiempo requerido para realizar la clasificación. Por esto es que el método propuesto es aplicable a un conjunto reducido de posturas en máquinas de consumo masivo con bajo poder de cómputo. A futuro se puede pensar en la posibilidad de elaborar un algoritmo de clasificación que compare un conjunto de grafos de manera simultánea, o que aproveche las capacidades de multiprocesamiento de los equipos actuales.

6. Pruebas y resultados

Para probar el método propuesto se utilizó un conjunto de 800 imágenes de profundidad, que incluyen cinco posturas diferentes de la mano (160 imágenes por cada postura) de una misma persona, como se observa en la Figura 5. Las pruebas realizadas sirven para determinar el desempeño del método propuesto en una máquina de consumo masivo, y para dar una primera aproximación de la precisión del método (precisión al determinar si una imagen de profundidad dada corresponde o no a la imagen de una mano abierta).

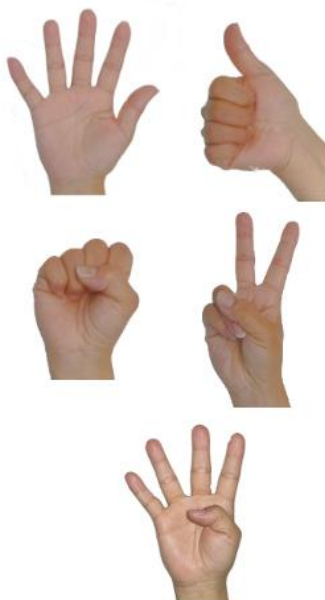


Figura 5. Diferentes posturas de la mano

Todas las imágenes fueron capturadas por medio de un dispositivo Kinect para Xbox 360 sin calibrar, a una resolución de 640x480 píxeles, donde la mano siempre es la región más cercana al sensor y se encuentra entre un rango de 70 cms a 140 cms del mismo. En ninguna de las imágenes se presenta el uso de sacos u otros aditamentos que oculten parcial o completamente la presencia del antebrazo. Para cada imagen se generó el descriptor expuesto en este documento y se determinó el valor del error producido al comparar con un descriptor previamente almacenado. Este último descriptor corresponde a la región de una mano abierta con la palma de frente al sensor y se obtuvo creando un grafo de forma manual que describiera la forma típica de una mano abierta.

Por otro lado, la imagen de entrada se clasifica como una mano abierta, si el error producido por el algoritmo de clasificación es menor a un valor constante T_e , seleccionado por observación de los resultados de las pruebas. Por medio de un proceso de prueba y error se determinó que, para una mano abierta, normalmente el proceso de segmentación genera un descriptor con un número de puntos en el rango (5,9) (con un máximo de 9 posibles esquinas). Por lo tanto, si la cantidad de puntos del descriptor no está en dicho rango, se considera que el descriptor no pertenece a una mano abierta y no se procede al proceso de clasificación. En dicho caso la imagen se clasifica como *no válida* y se le da un valor de error infinito (o el máximo posible de acuerdo con el lenguaje utilizado).

Las Figuras 6, 7 y 8 muestran una comparación del error producido por el conjunto de pruebas de la mano abierta versus los otros conjuntos de prueba. En todos los casos, el

error se determina al comparar cada una de las imágenes del conjunto de prueba con el descriptor pre-almacenado de la mano abierta. El eje X corresponde a la distancia al sensor, mientras que el Y corresponde al error obtenido. La Figura 6 muestra los resultados de usar imágenes de profundidad de una mano cerrada con el descriptor pre-almacenado de la mano abierta. Por su parte, la Figura 7 muestra los resultados de usar imágenes de profundidad de una mano con dos dedos extendidos (mano en V) y en la Figura 8 se observan los resultados de usar imágenes de una mano con cuatro dedos extendidos.

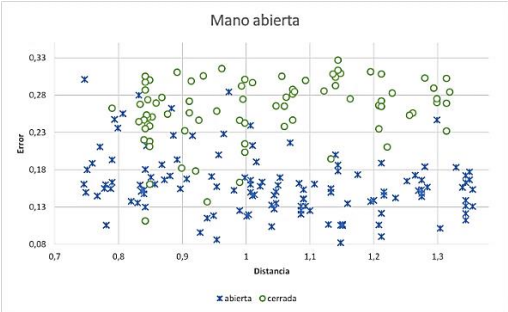


Figura 6. Error mano abierta - mano cerrada

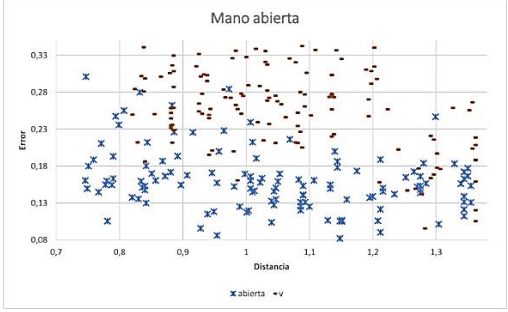


Figura 7. Error mano abierta – mano en V

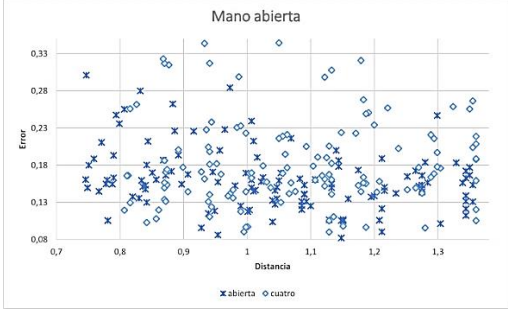


Figura 8. Error mano abierta - cuatro

No se muestran los resultados de las pruebas de la postura de la mano con el pulgar arriba, porque gran parte de los descriptores generados no eran válidos. Esto es, la cantidad de puntos que componen el descriptor no estaba dentro del rango (5, 9), por lo que la imagen se descarta sin realizar la evaluación del error (sin necesidad de realizar cálculo de error alguno se considera que no es una mano abierta). En la observación de los resultados se optó por seleccionar un valor límite $T_e = 0.2$, para definir si la imagen correspondía o no a una mano abierta. Esto es, solamente si el valor del error producido por el algoritmo es menor o igual al valor límite T_e , se asume que la región evaluada corresponde a una mano abierta. En la implementación final del algoritmo de clasificación la observación manual se deberá reemplazar por un método automático de clasificación.

En la Tabla 2 se resumen los resultados obtenidos para cada una de las posturas probadas, utilizando un equipo con procesador de 3.2 Ghz, con 8 GB de memoria RAM de 1600 Mhz. La implementación se realizó en lenguaje C++, haciendo uso de un único proceso y utilizando un valor de $T_e=0.2$.

Tabla 2. Resultados de las pruebas

Región	<Te	>=Te	Válidos	Tiempo máximo (seg)
Mano abierta	89%	11%	99%	0.020
Mano cerrada	8%	92%	55%	0.022
Pulgar arriba	19%	81%	10%	0.020
Mano en V	2%	98%	78%	0.015
Cuatro dedos	36%	64%	92%	0.021

La primera columna de la tabla indica el tipo de imágenes utilizadas en la prueba, la segunda el porcentaje de casos de prueba que fueron menores al límite T_e y que, por lo tanto, se clasifican como una mano abierta. Por otra parte, la cuarta columna muestra el porcentaje de imágenes que generaron un descriptor válido para una mano abierta, mientras que la última indica el tiempo máximo empleado para clasificar un descriptor entre el conjunto de prueba.

Se puede observar que el método propuesto logra clasificar una imagen en máximo 0.022 segundos en un equipo de consumo masivo, utilizando imágenes de 640x480 pixeles de resolución y sin hacer uso de multiprocesamiento. Esto permite alcanzar sin inconveniente alguno los 30 fps (la velocidad de captura del dispositivo). En cuanto a la precisión del algoritmo, aunque las pruebas no son concluyentes (se requiere una mayor población y pruebas de invariancia a la rotación o al escalado), se observa una precisión superior al 80%, para las cuatro primeras posturas en el reconocimiento de una mano abierta con la palma frente al sensor. Lo que permite pensar que la precisión final del algoritmo será similar a la de otros basados en características geométricas. En el caso de la mano con cuatro dedos arriba, solamente se alcanza 64% de precisión, porque, al parecer, el algoritmo no puede distinguir adecuadamente la esquina generada por el pulgar de las generadas por el corte de la región en la parte inferior de la mano.

También se nota que cuando las imágenes de entrada corresponden a una postura con pocas salientes, el número de descriptores inválidos es alto, llegando inclusive a ser el 90% para la postura con el dedo pulgar levantado. Lo que se debe a que el número de esquinas y, por consiguiente, el número de puntos del descriptor es muy bajo (en este caso el proceso de clasificación no se realiza). Curiosamente, en las imágenes correspondientes a una mano cerrada, que no tienen amplias salientes, el número de descriptores inválidos es menor (45%), lo que posiblemente se debe a que el algoritmo actual no distingue entre dos esquinas que no se encuentran sobre la misma saliente de la superficie.

Aunque la comparación no es directa, debido a la diferencia de hardware y del conjunto de imágenes de prueba, el desempeño parece estar a la par de otros métodos basados en características geométricas para la detección de una mano abierta. Lo que permite aplicar el método para cada *frame* del *stream* de entrada, sin necesidad de utilizar métodos de predicción de la posición de la mano.

7. Conclusiones

Se desarrolló un método para detectar si una imagen de profundidad corresponde a la imagen de una mano abierta, con la palma frente al sensor, basado en comparación de grafos isomorfos. El método puede aplicarse sobre un *stream* de imágenes de profundidad,

de 640x480 pixeles de resolución, en una máquina sin hardware especializado, logrando más de 30 fps. Se cumple así con el objetivo de obtener un método que se pueda ejecutar en máquinas de consumo masivo, aunque con limitaciones: la precisión disminuye cuando se evalúan imágenes cuyo contorno es similar al de la mano abierta y es sensible a los errores producidos por ruido o imprecisión del dispositivo de captura.

Aunque sin ser un resultado concluyente, las pruebas iniciales con cuatro posturas diferentes muestran que la precisión del método propuesto, en la mayoría de las posturas, puede ser superior al 80%. Lo cual es similar o superior a otros métodos basados en características geométricas, pero con la ventaja de que el método propuesto podría llegar a ser utilizado para la detección de otras posturas.

Cabe resaltar que, en buena parte de los casos, la imagen se descartó como una mano abierta, simplemente porque el descriptor no contaba con el mínimo número de esquinas que se esperaba de la región. Este hecho resalta la importancia que tienen las salientes de la región (en el caso de la mano, los dedos) en el método propuesto, no solamente por la precisión sino también por su desempeño.

El método presentado se puede utilizar para la detección de otras posturas (diferentes a la mano abierta), aunque para hacerlo el trabajo se debe complementar con la creación de un algoritmo de entrenamiento, que permita determinar los valores más adecuados para la matriz de adyacencia que corresponde al descriptor pre-almacenado. Inclusive, estos valores pueden variar de acuerdo con la persona que usa el método de detección, de tal manera que cada una realice un proceso de entrenamiento que garantice que el descriptor empleado sea el más adecuado para cada postura.

Adicionalmente, actualmente la comparación de varias posturas exige la ejecución recurrente de las mismas operaciones para cada postura, lo que implica una disminución de la velocidad de ejecución. A futuro se debe estudiar la posibilidad de modificar el algoritmo para que se puedan comparar varios descriptores de manera simultánea, o para aprovechar la concurrencia de los procesadores actuales.

El algoritmo de clasificación parece adecuado para comparar regiones sin huecos con contornos disímiles, pero muestra una disminución en la precisión en otros casos. También muestra inconvenientes cuando la separación entre los picos de la región (los dedos en el caso de la mano abierta) no es suficiente para que el sensor distinga las regiones. En este sentido, se observa la necesidad de trabajar a corta distancia del sensor (distancia menor a 140 cms para el caso del sensor utilizado).

8. Trabajo futuro

Aunque el método propuesto se puede ejecutar en máquinas de consumo masivo, para evaluar su precisión y por tanto su efectividad con respecto a métodos similares, aún se requiere la optimización de varios detalles del algoritmo. En general, se deben estudiar diversos algoritmos de micro-segmentación, de tal forma que se logren en lo posible segmentos cóncavos con el mínimo impacto en el desempeño. La detección de las esquinas depende en gran medida de la calidad de los segmentos.

Adicionalmente, un descriptor como el propuesto, que se basa en la longitud del camino entre puntos, sirve para describir puntos que se encuentran en *salientes* de la superficie, pero no brinda indicación alguna cuando los puntos se encuentran en una región que tiene muy pocas salientes, o ninguna. La longitud del camino sobre la superficie, para llegar de un punto a otro cuando no están ubicados en una saliente, tiene

un valor similar a la distancia entre los puntos. Por lo que, en este caso, de seguir el método hasta propuesto (razón de la longitud sobre la distancia) el valor resultante sería cercano a uno, sin importar si los puntos se encuentren a corta distancia uno del otro o a una gran distancia.

Con el fin de mejorar la precisión del algoritmo de clasificación, cuando se cuenta con puntos que no hacen parte de salientes, o que no fueron claramente diferenciados por el dispositivo de captura, se debería incluir en el descriptor un valor relativo de la distancia entre cada nodo del grafo, modificándose la función utilizada para el cálculo del error.

Referencias

- [1] Suarez, J. & Murphy, R. (2012). [Hand gesture recognition with depth images: A review](#). Proceedings 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (pp. 411-417). Paris, France.
- [2] Hasan, H. & Kareem, S. (2012). [Human Computer Interaction for Vision Based Hand Gesture Recognition: A Survey](#). Proceedings International Conference on Advanced Computer Science Applications and Technologies (pp. 55-60). Kuala Lumpur, Malaysia.
- [3] Cardona, A. (2015). [Hand recognition using depth cameras](#). Tecciencia 10(19), pp. 73-80.
- [4] Qian, C. et al. (2014). [Realtime and Robust Hand Tracking from Depth](#). IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Columbus, USA.
- [5] Oikonomidis, I., Kyriazis, N. & Argyros, A.(2012). [Tracking the articulated motion of two strongly interacting hands](#). Proceedings IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 1862-1869). Providence, USA.
- [6] Qian, K., Niu, J. & Yang, H. (2013). [Developing a Gesture Based Remote Human-Robot Interaction System Using Kinect](#). International Journal of Smart Home 7(4), pp. 203-208.
- [7] Van Den Bergh, M. & Van Gool, L. (2011). [Combining RGB and ToF cameras for real-time 3D hand gesture interaction](#). Proceedings IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (pp. 66-72). Kona, USA.
- [8] Oszust, M. & Wysocki, M. (2013). [Recognition of signed expressions observed by Kinect Sensor](#). Proceedings 10th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (pp. 220-225). Krakow, Polish.
- [9] Hsu, M. & Shih, T. (2014). [Real-Time Finger Tracking for Virtual Instruments](#). Proceedings 7th International Conference on Ubi-Media Computing and Workshops (pp. 133-138). Ulaanbaatar, Mongolia.
- [10] Tang, C. et al. (2012). [Hand tracking and pose recognition via depth and color information](#). Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics Conference Digest (pp. 1104-1109). Guangzhou, China.
- [11] Bhuyan, M., Neog, D. & Kar, M. (2011). [Hand pose recognition using geometric features](#). Proceedings National Conference on Communications (pp. 1-4). Bangalore, India.
- [12] Nguyen, L., Thanh, C. & Ba, T. (2013). [Contour Based Hand Gesture Recognition Using Depth Data](#). Advanced Science and Technology Letters 29, pp. 60-65.
- [13] Ren, Z. et al. (2013). [Robust part-based hand gesture recognition using kinect sensor](#). IEEE Transactions on Multimedia 15(5), pp. 1110-1120.
- [14] Wiskott, L. et al. (1997). [Face recognition by Elastic Bunch Graph Matching](#). IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 19(7), pp. 775-779.
- [15] Kurakin, A. (2012). [A real time system for dynamic hand gesture recognition with a depth sensor](#). Proceedings 20th European Signal PProcessing Conference (pp. 1975-1979). Bucharest, Romania.
- [16] Liang, H., Yuan, J. & Thalmann, D. (2014). [Parsing the hand in depth images](#). IEEE Transactions on Multimedia 16(5), pp. 1241-1253.
- [17] Papon, J. et al. (2013). [Voxel cloud connectivity segmentation - Supervoxels for point clouds](#). Proceedings IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 2027-2034). Portland, USA.

34. Algoritmo para protección de derechos de autor en imágenes por medio de señales de voz

María Palacios

Diego Renza

Dora Ballesteros

Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

1. Introducción

Uno de los tipos de datos que más se transmite y utiliza en medios como Internet corresponde a imágenes. Sin embargo, por la facilidad de copiar la información digital, estos archivos pueden ser utilizados por terceros sin permiso del autor. El marcado de imágenes es una alternativa de interés para solventar este inconveniente [1], para lo cual, generalmente, se han utilizado imágenes binarias como marca y se han propuesto numerosos esquemas de marcado de imágenes en imágenes [2]. No obstante, el marcado de imágenes con otro tipo de información, como una señal de audio, ha sido poco explorado. Dado que la cantidad de información de una señal de voz puede ser más redundante que la información en una imagen [3], este tipo de señales puede ser una alternativa robusta ante ataques, en comparación con imágenes binarias utilizadas como marca. De esta forma se protegería en mejor medida los derechos de autor.

Generalmente, para proteger los derechos de autor de una imagen, se utiliza el marcado de agua, que consiste en insertar *una firma* que identifique a su propietario. Sin embargo, si el método es poco robusto, un tercero podría manipular la imagen de tal forma que la marca incrustada desaparezca o no sea posible su extracción. En este sentido es clave evaluar este tipo de métodos ante ataques tales como filtrado, adición de ruido, redimensionamiento, entre otros.

Entre los métodos de marcado de agua en imágenes se tienen diversas técnicas en el dominio espacial, tales como el método Least Significant Bit (LSB), en el dominio de la frecuencia, tales como Radial Harmonic Fourier Moments (RHF), o en el dominio espacio-frecuencia, tales como la Transformada Wavelet Discreta (DWT) [4]. La técnica LBS proporciona una manera fácil de integrar la información, pero los datos pueden ser decodificados fácilmente [5]. Una alternativa es el esquema adaptativo en regiones utilizando sustitución LSB [6], que utiliza detección de bordes (Sobel) como criterio para la identificación de regiones y LSBMR (LSB Matching Revisited) para ocultar los datos. De cualquier forma, este tipo de técnicas es más propenso a los ataques estadísticos [7], por lo cual, los esquemas basados en Human Vision System (HVS) pueden resultar más seguros. Este sistema puede reconocer los cambios en áreas continuas más fácilmente que en las áreas no-continuas, principio que se utiliza junto con los componentes de alta frecuencia de la imagen para el marcado de agua [7].

En el dominio de la frecuencia se puede realizar cuantización de coeficientes espectrales obtenidos a través de RHF, con robustez frente a ataques geométricos [8]. Otros métodos aplican la Discrete Cosine Transform (DCT) a la imagen y utilizan la diferencia entre bloques para ocultar la información binaria [9, 10]. En el caso del dominio espacio-frecuencia, la marca se puede ocultar en la sub-banda correspondiente a alta-frecuencia (detalles verticales, horizontales o diagonales) [11], con buena relación entre capacidad de ocultamiento vs imperceptibilidad. Adicionalmente, se puede combinar con un método como Singular Value Decomposition (SVD) para ocultar la información de manera indirecta sobre la imagen [12].

El método propuesto en este trabajo se basa en Quantization Index Modulation (QIM) y opera en el dominio *wavelet* mediante DWT. La idea es insertar la información binaria de la señal de voz en cada uno de los coeficientes *wavelet* mediante un proceso de cuantización. En este sentido, la imperceptibilidad y la robustez del sistema dependerán del valor del paso de cuantización seleccionado, presentando un compromiso entre ellas. A continuación, se presenta la descripción del algoritmo propuesto y la validación del mismo en términos de imperceptibilidad, calidad del audio recuperado y robustez.

2. Métodos y algoritmos empleados

2.1 Quantization Index Modulation (QIM)

Es una técnica de ocultamiento de datos binarios basado en reglas de cuantificación. El proceso de inserción se basa en la modificación del valor de la portadora (pixel, coeficiente *wavelet*, muestra de audio), donde su magnitud C se aproxima al múltiplo más próximo del valor del paso Δ , obteniendo el valor *stego* S . La ecuación (1) define la regla de cuantización para para el ocultamiento y la ecuación (2) la regla correspondiente para la extracción de los datos [10].

$$S = \begin{cases} \Delta \left\lfloor \frac{h}{\Delta} \right\rfloor & \text{si } w = 0 \\ \Delta \left\lfloor \frac{h}{\Delta} \right\rfloor + \frac{\Delta}{2} & \text{si } w = 1 \end{cases} \tag{1}$$

$$wr = \begin{cases} 1 & \frac{\Delta}{4} < \left| S - \Delta \left\lfloor \frac{h}{\Delta} \right\rfloor \right| \leq \frac{3\Delta}{4} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \tag{2}$$

Donde h es la portadora, w es el valor de la marca (bit), S es el nuevo valor de la portadora y wr es el bit recuperado.

2.2 Discrete Wavelet Transform (DWT)

Es un método matemático útil para la descomposición de la señal en diferentes resoluciones [13]. En el caso de imágenes, la de entrada pasa a través de dos filtros para obtener las cuatro sub-bandas: una sub-banda de aproximación (LL) y 3 sub-bandas de detalles. Los coeficientes de detalles están orientados en tres direcciones: horizontal (LH), vertical (HL) y diagonal (HH). La sub-banda LL es la que más similitud tiene con la imagen de entrada, mientras que LH, HL y HH mantiene la información relacionada con la orientación específica. La Figura 1 muestra el diagrama de las etapas de descomposición (a) y reconstrucción (b).

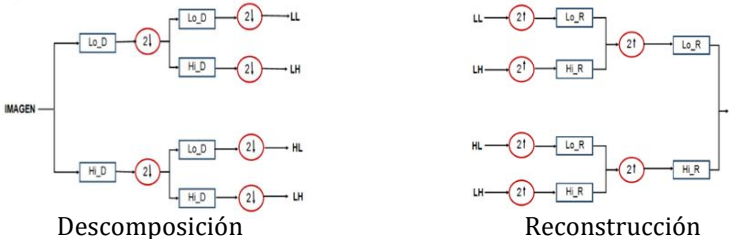


Figura 1. Esquema de la Transformada Wavelet Discreta en 2D

2.3 Pearson’s Correlation Coefficient (SPCC)

Es una métrica de calidad de audio e imagen que se basa en el coeficiente de correlación entre la señal original y la señal recuperada. La función de la correlación SPCC para dos señales U y V se define por medio de la ecuación (3), donde σ es la desviación estándar y cov es la covarianza de las señales [14].

$$SPCC = \frac{cov(U,V)}{\sigma_U \sigma_V} \quad (3)$$

2.4 Peak Signal-to-Noise-Ratio (PSNR)

Es un índice de comparación entre una imagen original y una imagen modificada que se mide en decibelios (dB). Es muy común en el procesamiento de imágenes y su función se puede adaptar para imágenes con diferentes resoluciones radiométricas (número de bits por píxel) [15].

3. Esquema propuesto

El algoritmo que se plantea utiliza el método QIM, en el cual se modifica el valor de algunos coeficientes de la descomposición *wavelet* a partir de un *delta* o valor de paso de cuantización (Δ). De este método se obtiene una imagen marcada que contiene de forma imperceptible la señal de voz, que puede ser transmitida y utilizada por cualquier medio de transmisión. Los módulos son los siguientes:

3.1 Ocultamiento

Este módulo corresponde a la inserción de la señal de voz dentro de una imagen y la respectiva obtención de la imagen marcada, que debe ser similar a la original. El procedimiento del módulo se muestra en la Figura 2.

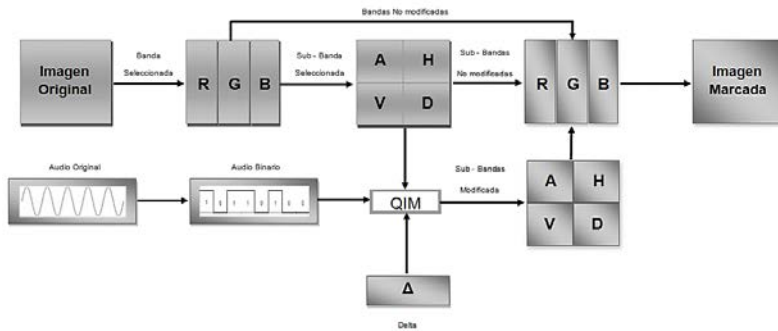


Figura 2. Representación del algoritmo propuesto: Ocultamiento

1. Cargar audio e imagen: se lee el audio donde se obtiene el tamaño y el número de bits por muestra; en el caso de la imagen se obtienen las dimensiones (filas y columnas).
2. Selección del delta (Δ): se define el valor del paso de cuantización. Su valor debe ser real y positivo.
3. Descomposición DWT: la imagen de entrada se descompone mediante DWT, obteniendo los coeficientes de aproximación (A), horizontal (LH), vertical (HL) o diagonal (HH). Se selecciona una de estas sub-bandas para el proceso de ocultamiento.
4. Proceso de ocultamiento QIM: se emplea la ecuación (1), donde h corresponde a cada uno de los coeficientes seleccionados, w a cada uno de los bits de la señal de audio y S es el nuevo coeficiente.
5. Reconstrucción DWT: a partir de la sub-banda modificada del paso anterior y las sub-bandas no modificadas, se reconstruye la imagen mediante la DWT inversa.

3.2 Extracción

Este módulo corresponde a la recuperación de la señal de voz dentro de una imagen marcada teniendo en cuenta el paso de cuantización. El procedimiento del módulo se muestra en la Figura 3.

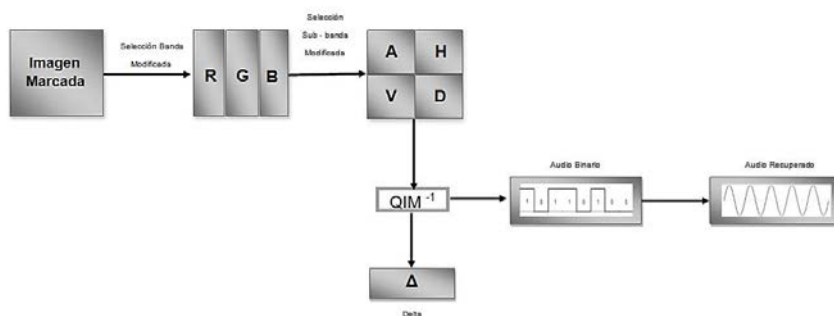


Figura 3. Representación del algoritmo propuesto: Extracción

1. Descomposición DWT: la imagen de entrada se descompone seleccionando la misma sub-banda del proceso de ocultamiento, i.e. LL, HL, LH o HH.
2. Extracción QIM: aplica la ecuación (2), donde S corresponde a cada uno de los coeficientes de la sub-banda seleccionada y wr a cada uno de los bits de la señal de audio recuperada.
3. Conformación de la señal: la señal digital de audio se obtiene a partir del número de bits por muestra y, de ser necesario, se convierte a analógica.

4. Resultados y análisis

Para evaluar la efectividad del algoritmo en términos de imperceptibilidad de la imagen marcada y la calidad de la señal recuperada, se emplearon dos imágenes en escala de gris: Man (1024 x 1024 píxeles) y Airport (1024 X 1024 píxeles) [16]. Además, se seleccionó la base *wavelet* Haar, se utilizaron las cuatro sub-bandas *wavelet* y se varió el paso de cuantización desde 10 hasta 100, con incrementos de 10. Como marca se utilizó un mensaje de voz con la frase *Telecomunicaciones* con una duración de 1 segundo, su tasa de muestreo es 16 KHz y tiene 8 bits por muestra. Se realizaron un total de 240 pruebas (2 imágenes x 10 valores de delta x 4 sub-bandas x 1 mensaje secreto x 3 ataques pasivos).

4.1 Imperceptibilidad de la imagen marcada sin ataques

La imperceptibilidad pretende cuantificar las diferencias entre la imagen original y la marcada. En este caso, se desea que no exista distorsión apreciable de la imagen marcada y, por lo tanto, que no existan indicios de la manipulación de la imagen. Para ello, el valor de SPCC deberá acercarse a su valor ideal (es decir 1) y el PSNR deberá ser lo más alto posible (>40 dB). Para corroborar la imperceptibilidad del método, los resultados de los dos indicadores anteriores se resumieron mediante rangos de confianza. Se obtuvo los intervalos en los que se concentran el 95% de los valores. Esta evaluación se llevó a cabo mediante la variación del valor delta entre 10 y 100 en incrementos de 10, tal como se presenta en la Figura 4.

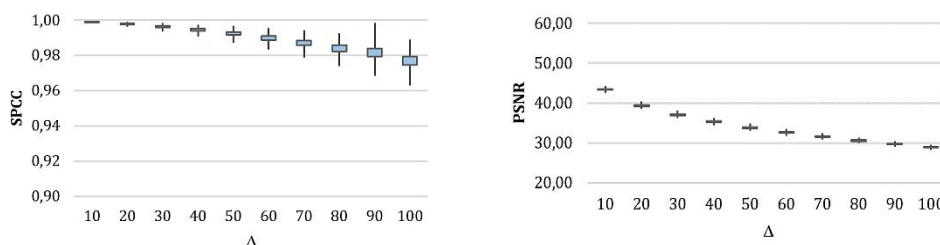


Figura 4. Resultados de pruebas de imperceptibilidad mediante rangos de confianza

A la izquierda se muestra la variación del coeficiente de correlación en función del valor del delta, donde se observa que la transparencia disminuye a medida que aumenta el valor del delta, sin embargo, todos los valores están por encima de 0.99, lo que significa muy buenos resultados en términos de transparencia. En cuanto al PSNR, a la derecha se muestra la tendencia de este indicador en el cambio del valor delta, la transparencia disminuye a medida que aumenta el valor delta.

Para ilustrar los resultados del esquema, la Figura 5 muestra la imagen original y la marcada después de aplicar el algoritmo propuesto. En este caso, la sub-banda vertical y un valor delta de 10 fueron utilizados como parámetros de entrada. Las métricas de calidad se muestran en la descripción. Aunque hay diferencias entre la imagen original y la imagen marcada, son imperceptibles al ojo humano.



Figura 5. Ejemplo de imperceptibilidad. Índices de calidad: SPCC = 0,9977 y PSNR = 36,2974 dB

La Figura 6 muestra otro ejemplo de imagen original y marcada. En este caso, se utilizaron como parámetros la sub-banda de aproximación y un valor delta de 50.

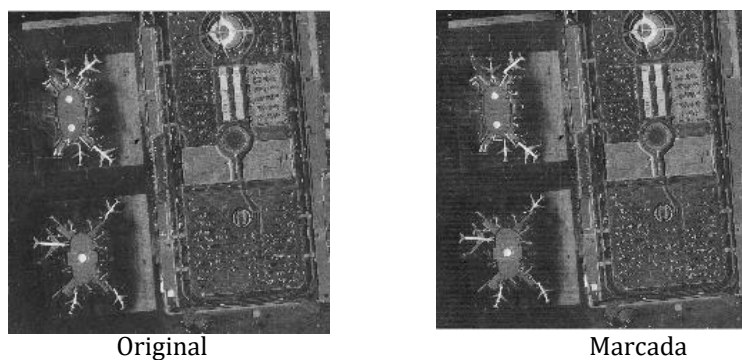


Figura 6. Ejemplo de imperceptibilidad. Índices de calidad: SPCC = 0,9872 y PSNR = 33,0469 dB

La Figura 7 muestra esta misma imagen utilizando la sub-banda horizontal y un valor delta de 30 como parámetros de entrada.

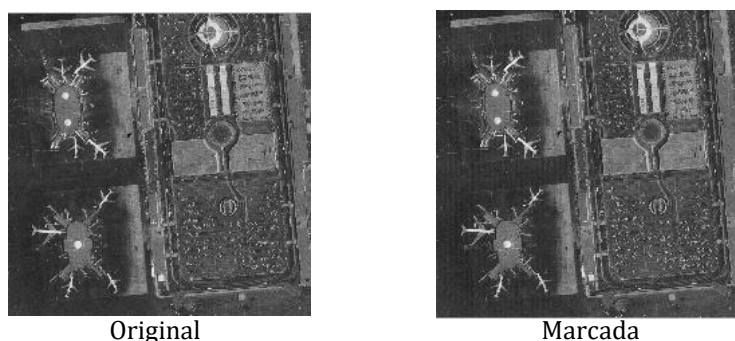


Figura 7. Ejemplo de imperceptibilidad. Índices de calidad: SPCC = 0,9941 y PSNR = 36,4095 dB

4.2 Calidad del Audio Recuperado sin ataques

Para evaluar la calidad de la señal de audio recuperada versus la señal de audio original, hay que tener en cuenta que no debe existir ningún tipo de distorsión en la señal recuperada, que modifique el contenido del audio o lo haga no entendible. Para ello, la similitud entre las dos señales se calculó por medio del coeficiente de correlación de Pearson (SPCC). Los valores obtenidos de SPCC deben ser lo más cercanos a su valor ideal, es decir, 1. La Figura 8 muestra los intervalos de confianza para el SPCC entre el audio original y el audio recuperado. A diferencia de la evaluación de imperceptibilidad, el aumento del valor delta significa una mejor calidad de la señal recuperada. Sin embargo, según los resultados, para todos los casos el SPCC es muy cercano a 1, por lo cual la calidad de la señal de audio recuperada es muy alta.

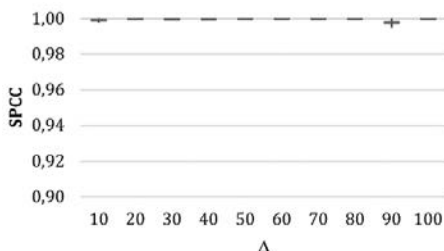


Figura 8. Rangos de confianza del coeficiente de correlación entre la señal de audio original y la recuperada

De acuerdo con lo anterior, se puede concluir que a medida que el delta aumenta, la imperceptibilidad disminuye, mientras que la calidad de la señal aumenta ligeramente para los valores estudiados. En cualquier caso, se puede determinar que el compromiso entre imperceptibilidad y calidad del audio es óptimo. Con el fin de ilustrar el rendimiento del sistema propuesto, la Figura 9 muestra la señal de audio original y la señal de audio recuperada en el dominio del tiempo, donde es posible confirmar que las dos señales tienen un alto grado de similitud.

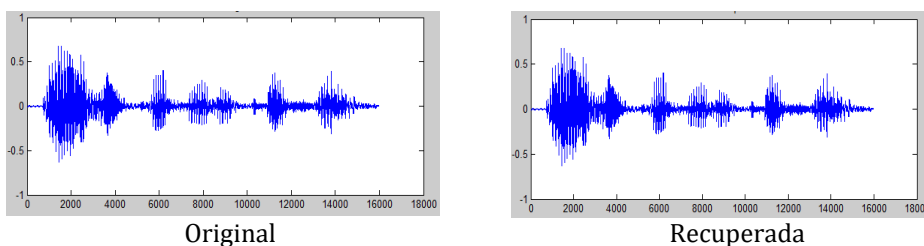


Figura 9. Ejemplo de calidad del audio recuperado. Índice de calidad: SPCC = 0,9998

Las gráficas de la Figura 9 tienen el eje vertical en amplitud y el eje horizontal en términos de la cantidad de muestras de la señal.

4.3 Calidad del Audio Recuperado ante ataques

Como se ha comentado hasta aquí, la imagen marcada puede contener información relevante para la identificación de su propietario. Sin embargo, en entornos reales una imagen puede verse afectada por diferentes operaciones, sean intencionales o no. En el caso de ataques no-intencionales, de manera general se puede incluir diferentes operaciones de procesamiento, tales como la compresión, el re-escalado, el filtrado, entre otras. En el caso de ataques intencionados, el objetivo es extraer la marca.

Al realizar diferentes ataques pasivos es posible determinar si la distorsión de la señal recuperada es significativa, evaluando la robustez del sistema ante dichos ataques. Para

ello también es posible evaluar el valor del SPCC, donde de forma cuantitativa se revisa la similitud de la señal recuperada versus la señal original. Al igual que en los casos anteriores, es posible resumir los resultados mediante intervalos de confianza. De nuevo se hizo la variación del delta con los mismos parámetros antes especificados. Para evaluar la robustez se tuvieron en cuenta tres tipos de ataques pasivos: re-escalado de la imagen marcada, adición de ruido gaussiano a la imagen marcada y aplicación de un filtro pasabajo gaussiano. Después de la aplicación de los diferentes ataques pasivos se evalúa la similitud del audio recuperado con el audio original mediante el parámetro SPCC.

1. Re-escalado

En este tipo de ataque la imagen original se reduce a la mitad de su tamaño para posteriormente retornar a su tamaño original. Se utiliza la interpolación bi-cúbica para este proceso. Esta nueva imagen se utiliza como entrada para el proceso de extracción. La Figura 10 muestra los resultados consolidados del SPCC de las señales de audio, luego de aplicar el re-escalado en la imagen marcada. Al igual que en los casos anteriores, el valor del delta varía entre 10 y 100. Se puede determinar que, en este ataque pasivo a medida que el valor del delta se incrementa, la calidad del audio recuperado aumenta, acercándose a 1. Esto significa que un valor delta alto garantiza la robustez ante este tipo de ataque, sin embargo, de nuevo se presenta un compromiso entre robustez y transparencia de la imagen marcada.

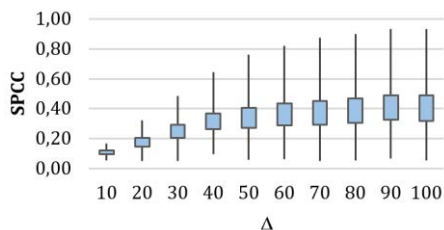


Figura 10. Evaluación de robustez ante el re-escalado de la imagen mediante rangos de confianza

El valor de SPCC indica el grado de similitud de manera cuantitativa, sin embargo, es preciso evaluar cualitativamente la calidad de la señal. Para ello se puede escuchar la señal recuperada u observarla en el dominio del tiempo, para evaluar su similitud respecto a la señal original. La Figura 11 muestra la señal de audio original y la señal recuperada en el dominio del tiempo, donde se puede corroborar que las dos señales tienen un alto grado de correlación. En este caso, se utilizó la sub-banda aproximación y un valor delta de 100. En la Figura 11, el eje vertical es la amplitud y el eje horizontal está en términos de la cantidad de muestras de la señal.

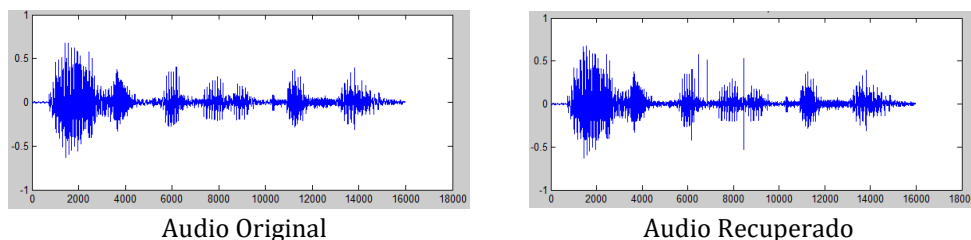


Figura 11. Ejemplo de robustez ante re-escalado. Índice de calidad: SPCC = 0,9355

2. Ruido Gaussiano

Este ataque consiste en agregar ruido gaussiano a la imagen marcada. El ruido agregado tiene una media (μ) de cero (μ) y su desviación estándar (σ) se varía entre 0,005 a 0,020 en pasos de 0,003. La Figura 12 muestra los resultados consolidados del SPCC de

las señales de audio, luego de agregar el ruido gaussiano a la imagen marcada. Se muestran tres valores de desviación estándar y el valor del delta se ha variado entre 10 y 100. De acuerdo con los resultados, se puede determinar que, ante este ataque pasivo, a medida que aumenta el valor de la desviación estándar se reduce la probabilidad de recuperación del audio.

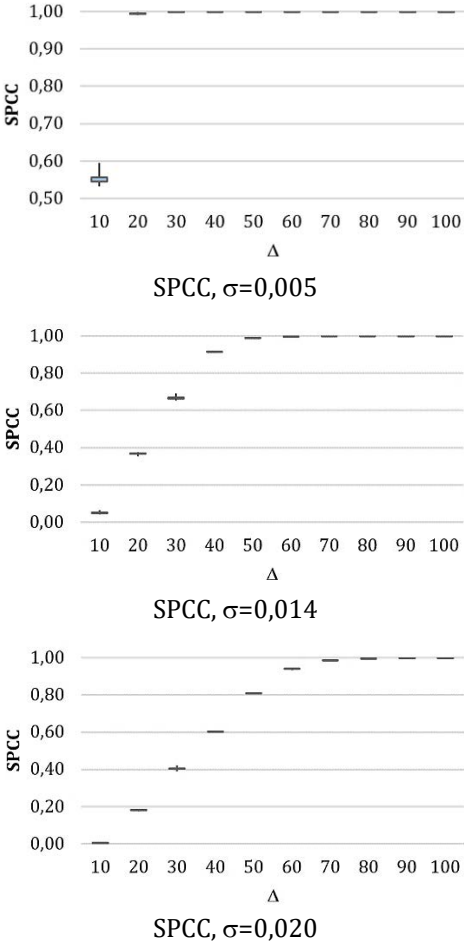
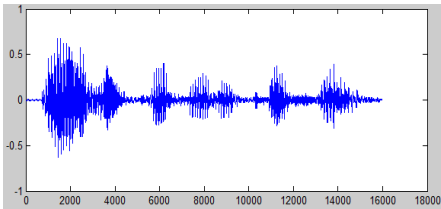
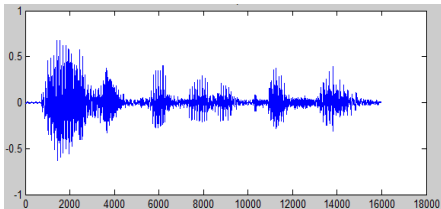


Figura 12. Evaluación de robustez ante la adición de ruido gaussiano a la imagen

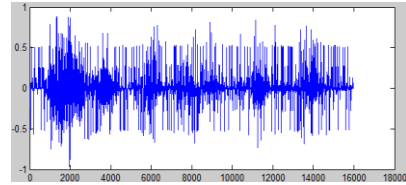
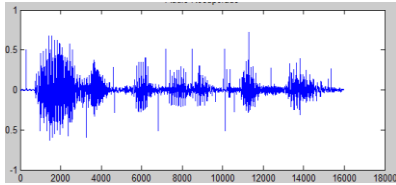
Para la evaluación cualitativa de la señal de audio recuperada, de nuevo se mostrarán las señales resultantes en el dominio del tiempo. La Figura 13 presenta la señal de audio original y la señal de audio recuperada para diferentes valores de desviación estándar. Aquí se puede evaluar el grado de correlación entre las señales y su distorsión. Para estos ejemplos se seleccionó la sub-banda de aproximación y $\Delta=50$. Todas las gráficas tienen el eje vertical en amplitud y el eje horizontal en términos de la cantidad de muestras de la señal.



Audio Original



Audio recuperado con $\sigma=0,005$. SPCC = 1,0



Audio recuperado con $\sigma=0,014$. SPCC = 0,9929 Audio recuperado con $\sigma=0,020$. SPCC = 0,8144

Figura 13. Ejemplo de robustez ante adición de ruido gaussiano a la imagen marcada

3. Filtro Pasabajo

En este ataque se aplica un filtro pasabajo gaussiano a la imagen marcada. La desviación estándar del filtro se varía entre 0.2 y 0.4 en pasos de 0.1. La Figura 14 muestra los resultados consolidados del SPCC de las señales de audio, luego de aplicar el filtro. Se muestran tres valores de desviación estándar. El valor delta varía entre 10 y 100.

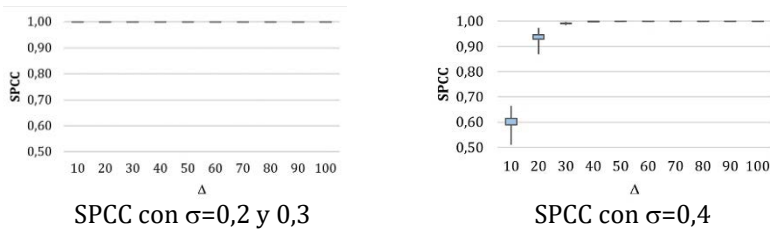
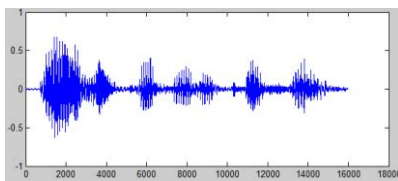


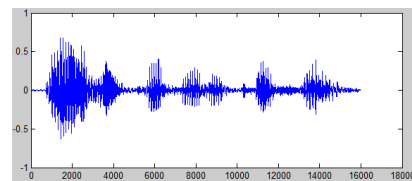
Figura 14. Evaluación de robustez ante la aplicación de un filtro pasabajo a la imagen

A la izquierda se observa que la calidad del audio recuperado es buena, presentando un alto grado de similitud respecto a la señal original. Mientras que, a la derecha, para valores de delta bajos, no se garantiza la recuperación completa de la señal. Cuando el valor delta es mayor la calidad del audio recuperado se acerca a 1.

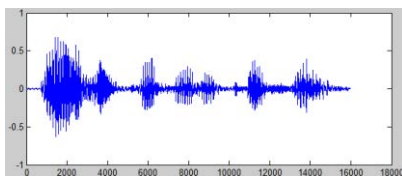
De nuevo se presenta la evaluación cualitativa de la señal para ofrecer un punto de vista idóneo de las métricas utilizadas. En este caso, la Figura 15 muestra la señal de audio original y la señal de audio recuperada en el dominio del tiempo, donde es posible confirmar que las dos señales tienen un alto grado de correlación. Aquí se utilizó la sub-banda horizontal y $\Delta=30$ como parámetros de entrada.



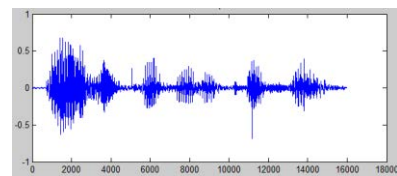
Audio original



Audio recuperado con $\sigma=0,2$. SPCC = 1,0



Audio recuperado con $\sigma=0,3$. SPCC = 1,0



Audio recuperado con $\sigma=0,4$. SPCC = 0,9835

Figura 15. Ejemplo de robustez ante la aplicación de un filtro pasabajo a la imagen

5. Conclusión

Se propone un algoritmo de marcado de agua (*watermarking*) que permite ocultar una señal de audio en una imagen en escala de gris. El método funciona en el dominio de la

transformada de *wavelet* con el método QIM. Se ha determinado que la imperceptibilidad y la calidad del audio recuperado dependen del valor del delta seleccionado. Aunque el esquema se presenta para imágenes en escala de gris, puede ser ampliado a otros esquemas de representación, tales como RGB, CMYK o similares, porque la inserción se realiza en el dominio *wavelet*.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede determinar que la imperceptibilidad y la calidad del audio recuperado, cuando no se presentan ataques, son buenas para todos los valores de delta estudiados. Sin embargo, a mayor valor del delta la imperceptibilidad desmejora, mientras que la calidad del audio mejora.

En el caso de evaluación de robustez ante ataques, se presenta de nuevo un compromiso entre la robustez y el valor delta. De acuerdo con la aplicación es posible lograr un balance entre imperceptibilidad y robustez del esquema, seleccionando un valor de delta adecuado.

Agradecimientos

Este trabajo hace parte del proyecto INV-ING-1768, financiado por la Universidad Militar Nueva Granada-Vicerrectoría de Investigaciones.

Referencias

- [1] Collberg, C. & Thomborson, C. (1999). [Software Watermarking: Models and Dynamic Embeddings](#). In Proceedings of the 26th ACM SIGPLAN-SIGACT symposium on Principles of programming languages (pp. 311-324). San Antonio, USA:
- [2] Faúndez M. (2000). [Tratamiento digital de voz e imagen y aplicación a la multimedia](#). Barcelona: Marcombo.
- [3] Subhear, M. & Mankar, V. (2014). [Current status and key issues in image steganography: A survey](#). Computer Science Review 13-14, pp. 95-113.
- [4] Wang, C. et al. (2009). [A blind video watermarking scheme based on DWT](#). In Proceedings IEEE Fifth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (pp. 434-437). Kyoto, Japan.
- [5] Thangadurai, K. & Sudha, D. (2014). [An analysis of LSB based image steganography techniques](#). In International Conference on Computer Communication and Informatics. Coimbatore, India.
- [6] Fouroozesh, Z. & Al ja'am, J. (2014). [Image Steganography base on LSBMR using Sobel Edge Detection](#). In Third International Conference on Technologies and Networks for Development. Beirut, Lebanon.
- [7] Singla, D. & Juneja, M. (2014). [Analysis of edge base image steganography techniques in spatial domain](#). In Recent Advances in Engineering and Computational Sciences. Chandigarh, India.
- [8] Chun-peng, W., Xing-yuan, W. & Zhi-qiu, X. (2016). [Geometrically invariant image watermarking based on fast Radial Harmonic Fourier Moments](#). Signal Processing: Image Communication 45, pp. 10-23.
- [9] Ling-Yuan, H. & Hwai-Tsu, H. (2015). [Blind image watermarking via exploitation of inter-block prediction and visibility threshold in DCT domain](#). Journal of Visual Communication and Image Representation 32, pp. 130-143.
- [10] Parah, S. et al. (2016). [Robust and blind watermarking technique in DCT domain using inter-block coefficient differencing](#). Digital Signal Processing 53, pp. 11-24.
- [11] Lee, S., Yoo, C. & Kalker, T. (2007). [Reversible Image Watermarking Based on Integer-to-Integer Wavelet Transform](#). IEEE Transactions on Information Forensics and Security 2(3), pp. 321-330.
- [12] Lai, C. & Tsai, C. (2010). [Digital Image Watermarking Using Discrete Wavelet Transform and Singular Value Decomposition](#). IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 59(11), pp. 3060-3063.
- [13] Mallat, S. (1989). [A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation](#). IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 11(7), pp. 674-693.
- [14] Benesty, J. et al. (2009). [Pearson correlation coefficient](#). In Cohen, I. et al. (Eds.), Noise reduction in speech processing (pp. 1-4). Berlin: Springer.
- [15] McCarthy, J. (1988). [PSNR \(Peak Signal to Noise Ratio\)](#). MATLAB 7.2 (R2006a).
- [16] <http://sipi.usc.edu/database/database.php?volume=misc>. Online [Oct 2015]. USC University of Southern California.

35. Sistemas Inteligentes para clasificación automática de clientes: Caso de estudio

Cinthia Vegega

Pablo Pytel

María F. Pollo C.

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

1. Introducción

El objetivo principal de este trabajo es automatizar, mediante un Sistema Inteligente, la clasificación de los clientes en una empresa de telecomunicaciones teniendo en cuenta el riesgo de que cambien de proveedor sin haber abonado antes todas sus facturas adeudadas. A los efectos de alcanzar el objetivo principal esta investigación posee tres objetivos específicos: 1) Analizar la forma en que el grupo de analistas expertos determina el comportamiento de pago de los clientes; 2) Analizar la forma en que el grupo de analistas asigna a cada cliente un grado de riesgo (con Explotación de Información); y 3) Implementar un Modelo Bayesiano que permita predecir el comportamiento de pago de los clientes y su grado de riesgo a partir de la información disponible de cada cliente.

Este trabajo se estructura en cuatro capítulos: 1) introducción y descripción general; 2) naturaleza de la investigación, en la que se detalla la definición del problema que da origen al trabajo, así como el objetivo general y los objetivos específicos para resolver dicho problema, además, se identifica la metodología de trabajo con los métodos y materiales a ser utilizados; 3) desarrollo del trabajo, donde se describen los datos disponibles que serán utilizados para lograr los objetivos planteados, se proponen y aplican procesos de Explotación de Información cuyos resultados son finalmente aplicados en la construcción del Modelo Bayesiano; 4) conclusiones.

2. Naturaleza de la investigación

2.1 Definición del problema

Desde noviembre de 2000 y a partir del Decreto 764/2000 [1], en la República Argentina se estableció un nuevo marco regulatorio para la prestación de los servicios de telecomunicaciones, y desde entonces se han incorporado cada vez más empresas para prestar servicios de telefonía fija, telefonía móvil e Internet. Además de los prestadores históricos (Telecom y Telefónica), existen operadores independientes (formados por cooperativas locales y municipios que brindan el servicio desde antes de su privatización) y nuevos prestadores correspondientes a empresas privadas y cooperativas [2]. Aunque para servicios de telefonía fija no existe la posibilidad de portabilidad numérica (funcionalidad que permite conservar el número telefónico cuando se cambia a otra compañía), que se aplica para la telefonía celular [3], cada vez más clientes optan por cambiar de prestador aprovechando la cantidad de ofertas existentes. Muchas de estas ofertas se prestan a través del servicio de voz sobre IP (VoIP), que permite transmitir voz a través de Internet y en el cual se reducen considerablemente los costos de comunicación.

En este contexto, una empresa de Telecomunicaciones (el nombre real de la empresa no puede ser presentado por cuestiones de confidencialidad) posee una amplia cantidad de clientes que dejan sus servicios sin antes abonar todas sus deudas. Debido a que este cambio de prestador no se encuentra regulado, un cliente puede contratar un nuevo servicio sin tener que darse de baja correctamente (es decir, abonando las facturas impagas de los servicios anteriores). Con el objetivo de mitigar este problema, la empresa

asigna a cada cliente un grado de riesgo que intenta predecir la posibilidad de que suceda esta circunstancia.

Para ello, en primer término, se había contratado una consultora especialista en predicción de riesgos, que realizó un análisis de los clientes con el objetivo de determinar las reglas necesarias asociadas a cada tipo de riesgo. Sin embargo, al vencer el contrato con la consultora, la empresa decidió no renovarlo y realizar este estudio internamente, conformando un grupo de analistas contratados por su experiencia en el área. El grupo ha podido emular y mejorar los resultados de la consultora, utilizando dos variables (definidas por la consultora) que se determinan a partir de las características de cada cliente y sus facturas:

- Valoración de la posibilidad de que un cliente deje de contratar los servicios de la Empresa, sin antes abonar todas sus facturas, denominada *grado de riesgo interno* y que clasifica al riesgo como malo, alto, regular y bajo.
- Valoración del comportamiento que tienen los clientes para pagar sus facturas, denominado *comportamiento de pago*, y que puede presentar los valores de muy bueno, bueno, regular y malo (se definen a partir de la cantidad de días que le lleva al cliente pagar la factura, una vez que haya vencido).

A pesar de la alta rotación de clientes y la posterior pérdida de fidelización, la empresa presenta mucha cantidad de incorporaciones de nuevos clientes. Esta situación provoca que los analistas no se puedan encargar de caracterizarlos a todos, los cuales pueden aumentar sus deudas considerablemente antes de detectar la posibilidad de que nunca la paguen. Por consiguiente, la empresa decidió implementar un mecanismo que permita automatizar la forma en que se asignan dichas variables. Para ello, ha suministrado un conjunto de datos actuales y representativos, los cuales se describen más adelante.

2.2 Objetivos

- Automatizar, mediante un Sistema Inteligente, la clasificación que aplica una empresa de Telecomunicaciones a sus clientes teniendo en cuenta el riesgo de que cambien de proveedor sin haber abonado antes todas sus facturas adeudadas.

Específicos

- Analizar la forma en que el grupo de analistas determina el comportamiento de pago de los clientes aplicando Explotación de Información.
- Analizar la forma en que el grupo de analistas asigna a cada cliente un grado de riesgo aplicando Explotación de Información.
- Implementar un Modelo Bayesiano que permita predecir el comportamiento de pago de los clientes y su grado de riesgo, a partir de la información disponible de cada uno de los clientes.

2.3 Metodología

Para construir el conocimiento de la presente investigación, se seguirá un enfoque de investigación clásico [4] con énfasis en la producción de tecnologías [5]; identificando métodos y materiales necesarios para desarrollar el proyecto.

1. *Métodos*

- Prototipado Evolutivo Experimental: Consiste en desarrollar una solución inicial para un determinado problema, generando refinamiento de manera evolutiva por prueba de aplicación de dicha solución a casos de estudio (problemáticas) de

complejidad creciente. El proceso de refinamiento concluye al estabilizarse el prototipo en evolución.

- **Verificación y Validación:** Todo modelo debe ser probado para asegurar su confiabilidad y asegurar que no tiene errores, y que será aceptado por aquellos que lo van a utilizar. Para ello, se hace uso, en primera instancia, de una Verificación para determinar que no se han cometido errores al momento del desarrollo, probando los resultados del modelo con datos históricos previamente recolectados. Una vez aprobada esta prueba, se realiza la Validación, en la que se vuelve a probar el modelo, pero esta vez comparando los resultados con los generados por los usuarios expertos del dominio.

2. *Materiales*

- Fases y tareas de la Metodología CRISP-DM [6]
- Procesos de Explotación de Información [7]
- Características de los Sistemas Inteligentes [8]
- Algoritmos para la construcción de Redes Bayesianas [9]
- Herramientas Software para Minería de Datos y Redes Bayesianas [10]
- Hemeroteca de la Universidad Tecnológica Nacional

3. **Desarrollo**

3.1 **Datos disponibles**

A continuación, se detallan los datos disponibles suministrados por la empresa de Telecomunicaciones y se presenta la herramienta aplicada, tanto para el análisis inicial de los datos como para su preparación.

- *Descripción de los datos suministrados.* La empresa suministró 15 archivos en formato CSV (usando como separador de atributos el símbolo '|'), que contienen una muestra de datos correspondientes a los primeros seis meses de 2015. Debido a un acuerdo de confidencialidad no es posible presentar los detalles de los datos incluidos en cada archivo, sin embargo, la estructura de cada archivo y las estadísticas generales sobre los valores que contiene cada atributo se encuentran disponibles en [11]. Para su comprensión, estos archivos se pueden clasificar en:
 - *Datos asociados a los clientes.* En esta categoría se incluyen los archivos que contienen información correspondiente a los clientes a analizar. Esta información se encuentra distribuida en las tablas:
 - Tabla Clientes: principal fuente de información que contiene los datos generales de cada cliente o 'party', como se denominan internamente en la empresa.
 - Tabla TipoParty: contiene la descripción de la naturaleza (Persona Jurídica o Persona Física) del cliente.
 - Tabla EstadoCivil: contiene la descripción del estado civil de los clientes que son personas físicas.
 - Tabla SegmentoCuenta: contiene la descripción del segmento o categoría de cliente definida por el Departamento de Marketing.
 - Tabla TipoCliente: contiene la descripción de los tipos de clientes definidos por el Departamento de Ventas.
 - Tabla DetalleComportamientoDePago: comportamiento de pago de los clientes.
 - Tabla RiesgoExterno: contiene la descripción de la categoría de riesgo del cliente, definida por una consultora externa.
 - Tabla Telefonos: indica la provincia a la que pertenece cada código de prefijo telefónico.

- Tabla RiesgoInterno: contiene la descripción de la categoría de riesgo del cliente, definida por los analistas de riesgos de la empresa.
- Tabla TipoIVA: indica la condición de IVA (impuesto que grava el valor añadido o agregado de un producto en las distintas fases de su producción) del cliente.
- *Datos asociados a la facturación*
 - Tabla CabeceraFacturas_A: contiene los datos generales correspondientes a las facturas generadas.
 - Tabla CabecerasFacturas_B: contiene los datos generales correspondientes a las facturas generadas.
 - Tabla DetalleFacturasPorCiclo_A: contiene el detalle de los cargos cobrados en las facturas generadas.
 - Tabla DetalleFacturasPorCiclo_B: contiene el detalle de los cargos cobrados en las facturas generadas.
 - Tabla TipoDocumentoCobro: contiene la descripción del tipo de factura.
 - Tabla DetalleCargosFacturacion: contiene la descripción de los cargos indicados en el detalle de la factura.
 - Tabla Divisas: contiene los tipos de monedas correspondientes a los cargos de facturación generados por el cliente.
- *Herramienta utilizada para el análisis y la preparación de los datos.* Para el análisis inicial de los datos y su preparación, se ha seleccionado la herramienta software RapidMiner Studio. Aunque la versión 5 es de uso gratuito, incluye cantidad de operadores para el manejo de los datos y el uso de los principales algoritmos asociados a la Minería de Datos. Además, se encuentra entre las herramientas preferidas en los últimos tres años [12-14].
- *Análisis Inicial de los Datos Suministrados.* El objetivo de este análisis es identificar las características que poseen las tablas, para luego determinar las acciones que se deben aplicar para preparar los datos y conseguir los objetivos propuestos. En una primera etapa se han identificado las relaciones entre las tablas (Figura 1).

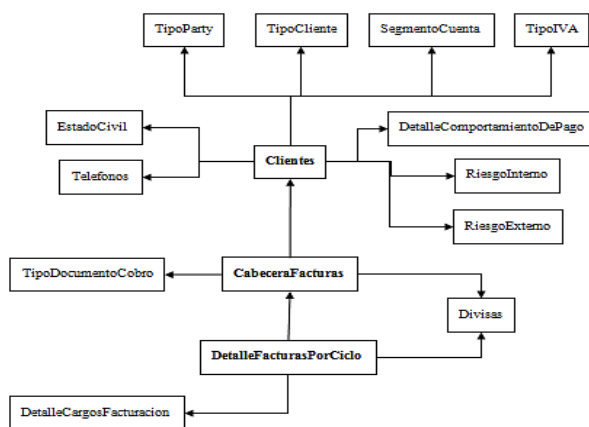


Figura 1. Diagrama de Relaciones entre las Tablas a ser Analizadas

Como se puede observar, las principales tablas corresponden a Clientes, CabeceraFacturas y DetalleFacturasPorCiclo, y el resto son complementarias y descriptivas. Luego, se analizan detalladamente las estructuras de las tablas, prestando especial atención a los valores de cada atributo [11]. A partir de este análisis se determina qué atributos se van a utilizar y cuáles deberán ser eliminados (por considerarse no útiles o redundantes, previo acuerdo con la empresa). A continuación, se presenta el resultado para cada tabla.

- *Datos asociados a los Clientes*

- *Tabla Clientes*

- Eliminados por no ser de utilidad: cd_party_atis, fc_estado, cd_actividad, fc_jerarquia, tx_nombre, tx_apellido, tx_razon_social, cd_usuario, fc_cambio, cd_usuario_alta, cd_usuario_cambio, fc_alta_garantia, cd_lote_carga, fl_incomunica y party.
 - Eliminados por incluir demasiados valores iguales o nulos: cd_estado, cd_empresa, cd_subsegmento_party, cd_estado_vip, fl_nivel_gestion, cd_party_padre, fc_baja, cd_riesgo_externo, cd_riesgo_cliente, fl_cliente_grupo, tx_telefono2, fc_nacimiento, fl_bloqueo, cd_motivo_bloqueo, cd_comportamiento_trafico, fl_compensacion_saldos, fl_datos_publicos, vl_limite_deuda, fl_fidelizacion_locutorio, cd_imagen_locutorio, fl_cuenta_no_facturable, fl_acuerdo, fl_incobrable, cd_holding, cd_nivel_factura, fl_preferente, cd_actividad_economica y cd_subactividad_economica.
 - Utilizados: cd_party, cd_segmento_party, cd_tipo_cliente, fc_alta, cd_riesgo_interno, cd_comportamiento_pago, cd_tipo_party, tx_telefono, cdsexo, cd_tipo_iva, cd_estado_civil, nu_frecuencia_reclamo y cd_marca_garantia.

- *Tabla TipoParty*

- Atributos a ser eliminados por no ser de utilidad para el problema: cd_lote_carga.
 - Atributos a ser utilizados: cd_tipo_party y tx_tipo_party.

- *Tabla EstadoCivil*

- Atributos a ser eliminados por no ser de utilidad para el problema: cd_lote_carga.
 - Atributos a ser utilizados: cd_estado_civil y tx_estado_civil.

- *Tabla SegmentoCuenta*

- Atributos a ser eliminados por no ser de utilidad: fc_inicio, fc_fin y cd_lote_carga.
 - Atributos a ser eliminados por incluir demasiados valores iguales o nulos: tx_nombre_segmento_cuenta.
 - Atributos a ser utilizados: cd_segmento_cuenta y tx_segmento_cuenta.

- *Tabla TipoCliente*

- Atributos a ser eliminados por no ser de utilidad para el problema: cd_lote_carga.
 - Atributos a ser eliminados por incluir demasiados valores iguales o nulos: cd_estado y fl_incomunica.
 - Atributos a ser utilizados: cd_tipo_cliente, tx_tipo_cliente y cd_unidad_negocio.

- *Tabla DetalleComportamientoDePago*

- Atributos a ser eliminados por no ser de utilidad para el problema: cd_comportamiento_pago_atis y cd_lote_carga.
 - Atributos a ser utilizados: cd_comportamiento_pago, tx_comportamiento_pago y tx_nombre_comportamiento_pago.

- *Tabla RiesgoExterno.* Aunque esta tabla se consideraba de utilidad para cumplir con el objetivo, no se puede utilizar porque todos los clientes tienen valor "SIN RIESGO EVALUADO" (campo cd_riesgo_externo), al no ser evaluados en la consultora externa.

- *Tabla RiesgoInterno*

- Atributos a ser eliminados por no ser de utilidad para el problema: cd_lote_carga.
 - Atributos a ser utilizados: cd_riesgo_interno y tx_riesgo_interno.

- *Tabla TipoIVA*

- Atributos a ser eliminados por no ser de utilidad para el problema: cd_lote_carga.
 - Atributos a ser utilizados: cd_tipo_iva y tx_tipo_iva.

- *Tabla Telefonos*

- Atributos a ser eliminados por no ser de utilidad para el problema: cd_lote_carga.
 - Atributos a ser utilizados: cd_codigo_prefijo y tx_provincia.

- *Datos asociados a la Facturación*
 - *Tablas CabeceraFacturas_A & CabecerasFacturas_B*
 - Atributos a ser eliminados por no ser de utilidad para el problema: cd_cuenta, cd_ciclo, fc_cierre, fc_emision, fc_vencimiento, cd_segmento_cuenta_his, cd_localidad y cd_postal.
 - Atributos a ser eliminados por incluir demasiados valores iguales o nulos: cd_divisa y cd_frecuencia_facturacion.
 - Atributos a ser utilizados: cd_factura, cd_party, cd_tipo_documento_cobro y vl_factura.
 - *Tablas DetalleFacturasPorCiclo_A & DetalleFacturasPorCiclo_B*
 - Atributos a ser eliminados por no ser de utilidad para el problema: cd_producto_comercial, vl_sin_impuestos_moneda_orig, fc_desde y fc_hasta.
 - Atributos a ser eliminados por incluir demasiados valores iguales o nulos: vl_minutos.
 - Atributos a ser utilizados: cd_factura, cd_cargo_facturacion, cd_divisa y vl_sin_impuestos.
 - *Tabla TipoDocumentoCobro*
 - Atributos a ser eliminados por no ser de utilidad para el problema: cd_tipo_transaccion_alta, cd_familia_documento, fl_categoria, cd_clase_documento, cd_clase_pago, cd_lote_carga y fl_nota_credito.
 - Atributos a ser utilizados: cd_tipo_documento_cobro y tx_tipo_documento_cobro.
 - *Tabla DetalleCargosFacturacion*
 - Atributos a ser eliminados por no ser de utilidad para el problema: cd_subtipo_cargo y cd_sistema_origen.
 - Atributos a ser eliminados por incluir demasiados valores iguales o nulos: cd_unidad_medida, cd_tipo_cargo, cd_grupo_cargo, cd_empresa_agrupamiento, cd_seccion_factura, cd_sub_seccion_factura, cd_empresa, fl_facturable, fl_tarificable, fl_liquidacion, cd_cargo_origen, fc_inicio_vigencia, fc_fin_vigencia, cd_tipo_sumarizacion, cd_cuenta_contable, cd_lote_carga, fl_cargo_telefonia y cd_tipo_glosa.
 - Atributos a ser utilizados: cd_cargo_facturacion y tx_cargo_facturacion.
 - *Tabla Divisas*
 - Atributos a ser eliminados por no ser de utilidad para el problema: cd_lote_carga, cd_unidad_medida y cd_sistema_origen.
 - Atributos a ser utilizados: cd_divisa y tx_divisa
- *Preparación de los Datos Recolectados.* Todas estas acciones han sido aplicadas a través de la herramienta RapidMiner, teniendo en cuenta las decisiones definidas por el análisis inicial de los datos. En primera instancia, esta tarea se ha realizado de forma independiente por grupos de tablas, para utilizar los datos con mayor facilidad, de la siguiente manera:
 - *Preparación de los Datos asociados Clientes.* Tablas Clientes, TipoParty, EstadoCivil, SegmentoCuenta, TipoCliente, DetalleComportamientoDePago, RiesgoInterno, TipoIVA y Telefonos, aplicando los siguientes pasos:
 1. Eliminación de todos los atributos indicados como redundantes o no útiles en la sección anterior.
 2. Limpieza y ajuste de los atributos que poseían valores nulos o sin definir (tal como cdsexo y cd_estado_civil).
 3. Construcción de los atributos booleanos d_tiene_reclamo y d_tiene_garantia, que poseen valores “Si” / “No”, a partir de los atributos nu_frecuencia_reclamo y cd_marca_garantia.

4. Consideración de los primeros cuatro dígitos del atributo tx_telefono1 como prefijo para obtener la provincia donde vive el cliente (usando para ello los datos de la tabla Telefonos).
5. Integración de la tabla de Clientes con las restantes tablas (enumeradas en “Datos Asociados a los Clientes” de la sección anterior) utilizando para ello los valores de las claves foráneas (estos datos fueron luego eliminados por considerarse redundantes).
6. Cálculo de la antigüedad del cliente en meses hasta la fecha 01/07/2015 usando su fecha de alta (atributo fc_alta). Este valor numérico luego se convierte en un valor lingüístico (nuevo atributo d_antigüedad) utilizando los siguientes criterios aportados por la empresa:
 - Un cliente es “nuevo” si tiene hasta 2 años (24 meses) de antigüedad.
 - Un cliente es “normal” o “regular” si tiene entre 2 y 3 años de antigüedad (es decir, más de 24 meses, pero hasta 36 meses).
 - Un cliente es “antiguo” si tiene más de 3 años, pero menos de 5 años (60 meses).
 - Un cliente es “muy antiguo” si tiene más de 5 años.
7. Finalmente, se llevan a cabo algunos ajustes con respecto al riesgo interno (atributo tx_riesgo_interno):
 - Se detectan dos valores asignados a los riesgos, “MALO” y “ALTO” que representan una cualidad muy similar (clientes que tienen gran posibilidad de dejar la empresa sin pagar su deuda). Se identifican muy pocos clientes con riesgo alto (menor del 5%), por lo que se decide unificar ambos valores con el valor “ALTO” (no se utiliza “MALO” para no confundir con los valores del comportamiento de pago de las facturas).
 - Por otra parte, se filtran los registros de clientes que todavía no han sido analizados por los expertos para determinar su grado de riesgo (riesgo con valor “SIN EVALUAR”) y, por lo tanto, no son útiles para el estudio a realizar.

Como resultado de estos pasos se obtiene la nueva tabla ClientesPreparados, cuya estructura se encuentra en [11].

- *Preparación de los Datos asociados a la Cabecera de las Facturas.* Que incluyen las tablas CabeceraFacturas_A, CabecerasFacturas_B y TipoDocumentoCobro, aplicando los siguientes pasos:
 1. Eliminación de todos los atributos indicados como redundantes o no útiles en la sección anterior.
 2. Generación del atributo d_montoTotal a partir del monto total de la factura (vl_factura), usando los criterios aportados por los administradores de facturación de la empresa que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Tabla de Conversión de Monto Total de la Factura

Monto (\$)		Valor Discreto
Desde	Hasta	
0	75	Muy Bajo
75	100	Bajo
100	150	Regular
150	200	Alto
200	+ ∞	Muy Alto

3. Integración de las tablas de cabecera (tablas CabeceraFacturas_A y CabecerasFacturas_B) con la tabla de descripción de tipo de documento (tabla TipoDocumentoCobro) usando para ello los valores del atributo cd_tipo_documento_cobro (éste fue luego eliminado por considerarse redundante).
 4. Finalmente, se realiza la unión de las dos tablas de cabecera (CabeceraFacturas_A y CabecerasFacturas_B) en una única tabla.
- *Preparación de los Datos asociados a los Detalles de las Facturas.* Incluyen las tablas: DetalleFacturasPorCiclo_A, DetalleFacturasPorCiclo_B, DetalleCargosFacturacion y Divisas, aplicando los siguientes pasos:
 1. Eliminación de todos los atributos indicados como redundantes o no útiles en la sección anterior.
 2. Integración de las tablas de detalle de facturas (tablas DetalleFacturasPorCiclo_A y DetalleFacturasPorCiclo_B) con la tabla de descripción de tipo de divisa (tabla Divisas) usando para ello los valores del atributo cd_divida (redundante).
 3. Clasificación de los 1.085 tipos de cargos disponibles (tabla DetalleCargosFacturacion), utilizando la información provista por los administradores de facturación. Por cada cargo se establece su categoría y si aplica o no a clientes VIP. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2. En esta instancia, también se decide eliminar los cargos correspondientes a *Impuestos e Información* por no ser de utilidad para el presente análisis.
 4. Con las categorías identificadas en el paso anterior se realiza la generación de los atributos indicados en la Tabla 3. Para esto se tiene en cuenta la cantidad o el monto facturado, según corresponda. Como resultado de este paso se reduce considerablemente la cantidad de registros que se deben procesar, debido a que la información reflejada en filas ha sido transpuesta en columnas [11]. Finalmente, se realiza la unión de las dos tablas de detalle de facturas (tablas DetalleFacturasPorCiclo_A y DetalleFacturasPorCiclo_B) en una única tabla.

Tabla 2. Resumen del resultado de la clasificación de cargos de facturación

Categoría	Tipo	Aplica a Clientes VIP		Total
		No	Sí	
Abono Plan Internet		54	21	75
Abono Plan Telefonía		232	1	233
Descuento		235	3	238
Impuestos	Monto	66	3	69
Interés Financieros		5	-	5
Mora		15	-	15
Sobretasa		5	-	5
Bloqueo Servicio		58	-	58
Bonificación	Cantidad	70	-	70
Otros Servicios ¹		188	6	194
Servicios No Prestados		111	1	112
Cuenta Garantizada	Booleana	3	-	3
Débito Automático		1	-	1
Información	-	7	-	7
Total		1.050	35	1.085

¹ Servicios adicionales que se brindan en forma conjunta al servicio telefónico, tales como llamada en espera, identificación del número que llama (caller ID), bloqueo de llamada, mensaje en voz, desvío de llamadas, entre otros. Dependiendo del plan contratado puede ser que estos servicios sean cobrados o estén bonificados por la empresa.

Tabla 3. Estadísticas de los datos a ser usados para entrenamiento y para prueba

Atributo	Entrenamiento	Datos de Prueba	Proporciones
Comportamiento del Pago de las Facturas (valorComportamientoPago)	MUY BUENO (274.398)	MUY BUENO (48.507)	MUY BUENO (56,2%)
	BUENO (188.507)	BUENO (33.125)	BUENO (38,6%)
	REGULAR (23.697)	REGULAR (4.240)	REGULAR (4,9%)
	MALO (903)	MALO (164)	MALO (0,2%)
	Sin evaluación (341)	Sin evaluación (55)	Sin evaluación (0,1%)
Grado de Riesgo del Cliente (riesgoInterno)	ALTO (179.486)	ALTO (31.840)	ALTO (37%)
	REGULAR (162.834)	REGULAR (28.716)	REGULAR (33%)
	BAJO (145.526)	BAJO (25.535)	BAJO (30%)

- *Integración de las Tablas Anteriores.* Se integran las tablas preparadas en los pasos anteriores (ClientesPreparados, FacturasPreparadas y DetalleFacturasPreparadas) mediante los atributos `cd_party` y `cd_factura`, los cuales fueron posteriormente eliminados. Debe notarse que, al llevar a cabo esta integración, muchos registros correspondientes a facturas son filtrados por corresponder a clientes en donde el riesgo interno no se encontraba definido (*SIN EVALUAR*). Finalmente, se ajustaron los nombres de los atributos de la tabla generada por esta integración, denominada `DatosIntegradosPreparados`, para mejorar su comprensión durante las tareas a realizar en las siguientes secciones. Esta estructura se encuentra disponible para su observación en [11].

3.2 Explotación de información

- *Introducción a los Procesos de Explotación de Información.* La Explotación de Información consiste en aplicar herramientas de análisis y síntesis, con el objetivo de extraer el conocimiento no-trivial que se encuentra distribuido en forma implícita en los datos disponibles de diferentes fuentes de información dentro de una organización [15]. Previamente, este conocimiento es desconocido y puede resultar útil para la toma de decisiones dentro de una organización [16]. Debido a la cantidad de datos que poseen las organizaciones en sus repositorios, es necesario contar con mecanismos que permitan descubrir relaciones, fluctuaciones y dependencias entre dichos datos [17]. Si este conjunto de relaciones (o patrones) refleja la realidad, por lo que son válidas, además de aportar algo novedoso y útil para la toma de decisiones es posible que indique que la información toma un grado de valor mayor que el inicial [18]. Para esta transformación se aplican los Procesos de Explotación de Información [7].

A partir del problema de negocio que se desea resolver y las características de los datos disponibles, se selecciona el proceso que mejor se adecúe. Cada proceso de Explotación de Información tiene asociado un conjunto de técnicas o algoritmos de Minería de Datos, para obtener los resultados necesarios. Muchas de estas técnicas provienen del campo del Aprendizaje Automático [19], por lo que los modelos, o patrones de conocimiento, se obtienen automáticamente [20]. Lo que significa que en estos procesos no existe la necesidad de formular hipótesis previas [21], aunque los resultados obtenidos se deben interpretar con cuidado. Existe una diferencia importante entre la Explotación de Información y los sistemas que buscan extraer conocimiento mediante técnicas estadísticas tradicionales (como pueden ser los reportes OLAP de un Datawarehouse, entre otras implementaciones). Al utilizar técnicas estadísticas tradicionales, primero se debe formular una hipótesis de trabajo de acuerdo con el problema de negocio que se quiere resolver, luego se deben aplicar las operaciones necesarias y, con los resultados obtenidos, se

confirma (o refuta) la hipótesis propuesta. Por lo tanto, una persona que utiliza estas técnicas debe tener un gran conocimiento sobre el dominio y sobre los datos, porque la complejidad de los datos almacenados y sus interrelaciones dificulta la verificación del modelo. Al contrario, aplicar Minería de Datos no se requiere una hipótesis previa, porque los algoritmos la podrían genera automáticamente.

Finalmente, en esta instancia es necesario realizar una distinción entre los términos *Minería de Datos* y *Explotación de Información*. Aunque suelen utilizarse como sinónimos para referir el mismo cuerpo de conocimientos, poseen un alcance diferente [22]. La *Minería de Datos* se encuentra relacionada con la tecnología (es decir las herramientas y algoritmos) necesaria para transformar los datos en conocimiento; mientras que, la *Explotación de Información*, está relacionada con los procesos y las metodologías necesarias para obtener este objetivo. De esta manera, se podría decir que la primera se encuentra más cercana a la problemática de la programación del software, mientras que la segunda se encuentra a la Ingeniería del Software.

- *Aplicación de procesos para analizar el comportamiento de pago.* Para llevar a cabo el análisis del comportamiento de pago de los clientes, por medio de la Explotación de Información, se utiliza *valorComportamientoPago* como atributo objetivo, el cual indica la apreciación que utiliza la empresa para valorar la cantidad de días que normalmente se demora el cliente para pagar sus facturas, después de su vencimiento. Con este atributo se aplica el proceso de descubrimiento de reglas de comportamiento y el de ponderación de interdependencia de atributos. Para ello se utiliza nuevamente la herramienta RapidMiner Studio [10] que incluye los principales algoritmos asociados a la Minería de Datos.
- *Descubrimiento de reglas para el comportamiento de pago.* Al aplicar el proceso de descubrimiento de reglas de comportamiento [7], es posible identificar cómo influyen los valores de otros atributos en los valores que toma el atributo objetivo. En este caso, se aplica el operador Random Tree [23], conocido como Randomized C4.5, por ser una extensión del algoritmo de aprendizaje C4.5 [24], donde se selecciona aleatoriamente entre los mejores 20 nodos para dividir una rama. Por lo tanto, este operador permite generar un árbol de decisión, con datos numéricos y/o no-numéricos, teniendo la ventaja de ser significativo y fácil de interpretar, en comparación con otros enfoques [25]. De esta manera, una vez generado el árbol es posible identificar las reglas asociadas correspondientes.

Como resultado de la aplicación de este operador se obtienen 27 reglas (que se muestran en [11]), las cuales poseen una precisión general de sólo el 58%. Esta situación se debe a que solamente seis son totalmente correctas (por tener una precisión del 100%) y ocho pueden ser consideradas como confiables (por tener una precisión superior o mayor al 60% y menor al 100%). Por otro lado, las 13 reglas restantes tienen una precisión promedio del 52%, por lo que son poco confiables. Esto se debe a que ninguna posee como consecuente los valores REGULAR o MALO del comportamiento de pago. Estos comportamientos se encuentran incluidos dentro de las reglas generadas para los valores BUENO y MUY BUENO, que poseen baja precisión. Por consiguiente, estos resultados no se consideran útiles y se descarta su análisis.

- *Ponderación de atributos para el comportamiento de pago.* Teniendo en cuenta los mismos datos, se aplica el proceso de ponderación de interdependencia de atributos

[7], para identificar el grado de relación que existe entre los valores de cada atributo de entrada y el atributo objetivo. Para ello, se utiliza el método *Näive Bayes* [26, 27], que permite calcular la probabilidad condicional entre cada par de atributos, asumiendo que la relación es independiente del resto de los atributos. Como resultado de aplicar el algoritmo, la herramienta genera un gráfico en dos dimensiones que representa la densidad o ponderación de cada valor del atributo objetivo (indicado con barras de diferentes colores) para cada valor del atributo de entrada. En este caso, en [11] se muestran los cinco gráficos de barras más significativos y el análisis de los mismos.

- *Aplicación de procesos para analizar el grado de riesgo de los clientes.* Para llevar a cabo el análisis del grado de riesgo de los clientes se utiliza como atributo objetivo a *riesgoInterno*, que indica la valoración asignada por los expertos al cliente con respecto a la posibilidad de que no abonen sus deudas. Con este atributo seleccionado se aplica el proceso de descubrimiento de reglas de comportamiento y el de ponderación de interdependencia de atributos.
- *Descubrimiento de reglas para el grado de riesgo de los clientes.* Primero se aplica el proceso de descubrimiento de reglas de comportamiento aplicando el operador *Random Tree*. Como resultado, se obtienen 28 reglas [11], que poseen una precisión general baja (aproximadamente el 40%). Aunque en este caso existen reglas para los tres valores del atributo objetivo (ALTO, REGULAR y BAJO), solamente dos son totalmente confiables (es decir, con precisión del 100%) y siete algo confiables (entre 60 y 100%). Las otras 19 tienen una precisión entre 30 y 60%, por lo que no deben ser consideradas. Por consiguiente, estos resultados no se consideran útiles y no se procede a su correspondiente análisis.
- *Ponderación de atributos para el grado de riesgo de los clientes.* Como parte del proceso de ponderación de interdependencia de atributos se aplica *Näive Bayes*. En este proceso resultan seis gráficos significativos [11]. Para el atributo de entrada *tipoCliente*, para el atributo de entrada *antigüedad*, para el atributo de entrada *tieneReclamo*, para atributo *montoTotal*, para *montoAbonoTelefonia* y usando a *valorComportamientoPago* como atributo de entrada.
- *Conclusiones del análisis general sobre los resultados de los procesos.* Una vez obtenidos los resultados para el comportamiento de pago de las facturas y el grado de riesgo, se realiza un análisis general y luego una reunión con los expertos de la organización, para discutirlos y validarlos. De este proceso se llegó a las siguientes conclusiones:
 1. Las reglas identificadas no son útiles, dado que no consideran todos los valores existentes (como es el caso para el comportamiento de pago) y/o tienen baja precisión (como sucede sobre todo para grado de riesgo).
 2. Los resultados de la ponderación de atributos aportan relaciones útiles, pero presentan un panorama parcial de la situación. Al considerar la influencia de cada atributo de entrada sobre el atributo objetivo en forma independiente, no es posible determinar su influencia en forma conjunta. Entre las relaciones más importantes se destacan las siguientes:
 - Los servicios de telefonía facturados tienen mayor variación de valores entre los clientes e influyen los tipos de comportamiento de pago y riesgo, que el resto de los servicios. Aunque en varios casos, a los clientes que poseen

servicios de Internet se les aprecia de forma diferente, pero esta influencia no tiene tanto peso como la anterior.

- Aunque existe influencia de los valores del comportamiento de pago de las facturas sobre el grado de riesgo de los clientes, no es determinante. Lo que significa que, para definir el grado de riesgo del cliente además de considerar su comportamiento de pago, se deben evaluar otras características (tales como el segmento al que pertenece, su categoría de IVA frente al gobierno y antigüedad, entre otras).
 - La diferencia subjetiva entre los clientes que tienen asignado un riesgo alto o regular es mucho menor que la diferencia que existe entre los clientes con riesgo regular o bajo. Esto produce que, bajo ciertas situaciones, a un cliente con riesgo regular se le trate como de alto riesgo, pero no como a uno de bajo.
3. Teniendo en cuenta las conclusiones anteriores, se considera de interés estudiar con mayor detalle la interacción entre los atributos y su influencia en los dos atributos objetivos. Para ello se usan las Redes Bayesianas, cuya construcción y resultados obtenidos se describen a continuación.

3.3 Modelo Bayesiano

- *Introducción a las Redes Bayesianas.* Las Redes Bayesianas o Probabilísticas [28] se fundamentan en la teoría de la probabilidad y combinan la potencia del Teorema de Bayes con la expresividad semántica de los grafos dirigidos [29]. También permiten representar un modelo causal por medio de una representación gráfica de las independencias/dependencias entre las variables que forman parte del dominio de aplicación [30]. Formalmente, una Red Bayesiana es un grafo acíclico dirigido, en el que los nodos representan variables aleatorias que toman valores discretos o lingüísticos [31]. Los estados que puede tener una variable deben cumplir con dos propiedades: 1) ser mutuamente excluyentes, es decir, un nodo solamente puede encontrarse en uno de sus estados en un momento dado; y 2) ser un conjunto exhaustivo, es decir, un nodo no puede tener ningún valor por fuera de ese conjunto.

De esta manera, la red permite representar relaciones causales en el dominio del conocimiento a través de una estructura gráfica y las tablas de probabilidad condicional entre los nodos padres e hijos. Por lo tanto, el conocimiento que representa la red está compuesto por los siguientes elementos:

- Un conjunto de nodos que representan cada una de las variables del modelo.
- Un conjunto de enlaces o arcos entre los nodos que tienen una relación causal.
- Una tabla de probabilidad condicional asociada a cada nodo, indicando la probabilidad de sus estados para cada combinación de los estados padres. Si un nodo no tiene padres, se indican sus probabilidades a priori [32].
- Un conjunto de observaciones o evidencias que, en un momento dado, se saben ciertas y que deben ser propagadas por la red para generar la predicción correspondiente.

Sobre la base de las Redes Bayesianas es posible construir sistemas capaces de predecir, estimar o clasificar a través de datos conocidos. Estos sistemas tienen las ventajas de: facilidad de interpretación de los resultados, manejo sencillo de los parámetros de problemas complejos, existencia de algoritmos eficientes para el aprendizaje, y aplicabilidad exitosa en problemas del mundo real [9].

- *Herramienta utilizada para la construcción del Modelo Bayesiano.* Aunque la herramienta utilizada antes, RapidMiner, incluye un operador para la construcción de Redes Bayesianas, el operador es limitado. Por consiguiente, se decidió seleccionar otra herramienta software, que incluya las funcionalidades de aprendizaje automático de las probabilidades condicionales entre los nodos a partir de datos históricos, que contenga una propagación eficaz de las probabilidades a partir de evidencias conocidas y que permita su integración a futuro con los sistemas actuales de la empresa de Telecomunicaciones.

A partir de las recomendaciones del sitio [33], se optó por emplear la herramienta Graphical Network Interface o GeNIe [34]. Desarrollada por un grupo de investigadores de la Universidad de Pittsburgh, cuenta con diversas recomendaciones que fueron confirmadas por su uso. Entre sus principales características se destaca que, a partir de la versión 2, es posible integrar las redes generadas con otras aplicaciones software implementadas en lenguajes C++, Java y .NET, mediante el framework Structural Modeling, Inference, and Learning Engine (SMILE).

- *Distribución de los datos para entrenamiento y prueba.* Con el objetivo de probar las redes bayesianas generadas y comparar su efectividad, a partir de los registros disponibles en la tabla DatosIntegradosPreparados se generan dos grupos de ejemplos cuya estructura se encuentra en [11]. El primero, denominado *datos de entrenamiento*, incluye los ejemplos que serán aplicados para definir la estructura y parámetros de las redes bayesianas, mientras que el segundo, denominado *datos de prueba*, incluye los ejemplos a ser usados para probar la precisión de la red. Para generar estos dos grupos se aplica una muestra estratificada sobre los 573.937 registros de la tabla DatosIntegradosPreparados, seleccionando el 85% de los registros como ejemplos de entrenamiento, mientras que el resto son usados como datos de prueba. De esta manera, como se puede observar en la Tabla 3, las proporciones de los valores para cada uno de los atributos objetivos es similar para los datos de entrenamiento y prueba.

Tabla 3. Resultados de la prueba realizada al prototipo creado con el método Nàive Bayes

Atributo	Valor del Atributo	Precisión
Comportamiento del Pago de las facturas (valorComportamientoPago)	MUY BUENO	100%
	BUENO	0%
	REGULAR	0%
	MALO	0%
	Sin evaluación	0%
Grado de Riesgo del Cliente (riesgoInterno)	ALTO	49%
	REGULAR	51%
	BAJO	66%

- *Desarrollo de los prototipos mediante aprendizaje automático.* Haciendo uso de la capacidad de aprendizaje o entrenamiento automático que poseen las Redes Bayesianas, se generan tres prototipos del modelo, utilizando en cada caso un método diferente. Para ello se hace uso de la funcionalidad *aprender nueva red*, de la herramienta GeNIe, con los datos de entrenamiento previamente importados. Asimismo, luego de la construcción de cada se prueba su efectividad usando los datos de prueba. Finalmente, con todos los prototipos generados se procede a su análisis con la ayuda de los expertos del dominio.
- *Construcción y prueba del primer prototipo.* Para la construcción del primer prototipo se aplica el método de aprendizaje Nàive Bayes [26, 27], guiado por el algoritmo K2

[35] para ordenar los atributos. Para su utilización se indica como objetivo o clase al Grado de Riesgo del Cliente (atributo *riesgoInterno*) lo cual genera la red que se muestra en la Figura 2. Las relaciones con mayor peso se muestran con líneas gruesas, mientras que las que tienen menor peso tienen líneas más delgadas. Asimismo, se puede observar que, de acuerdo a la hipótesis de este método (que considera a todos los atributos como independientes), las únicas relaciones (o flechas) son entre cada atributo de entrada y el atributo objetivo, no existiendo relaciones entre los atributos de entrada.

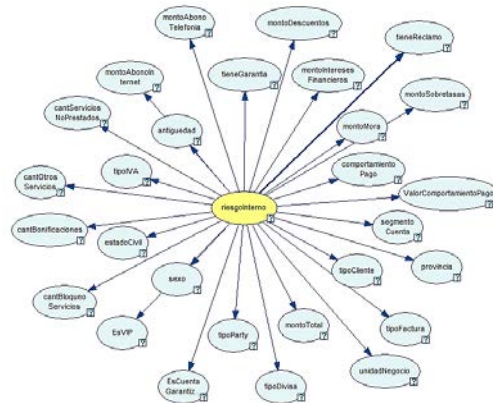


Figura 2. Prototipo creado usando el método Nàive Bayes

Al probar esta red se obtiene una precisión general de 56%, que se calcula considerando la precisión correspondiente para el riesgo interno (de aproximadamente 55%) y para el comportamiento de pago (que posee un 56%). Aunque estos valores parecen aceptables, si se observa el valor de precisión para cada valor predicho de la Tabla 3, se puede determinar que los resultados son poco confiables. En el caso del comportamiento de pago, solamente se podría confiar para los que tienen el valor MUY BUENO y para el resto nada confiable, mientras que para el riesgo interno los porcentajes se encuentran más parejos. Por consiguiente, se concluye que, aunque el método Nàive Bayes genera una red muy simple y sencilla para entender, los resultados generados para este caso no son útiles para este problema.

- **Construcción y prueba del segundo prototipo.** Para el segundo prototipo se aplica el método de aprendizaje Greedy Tick Thinning (GTT) [36], también guiado por el algoritmo K2 [34] para ordenar los atributos. La principal diferencia de este algoritmo con respecto a Nàive Bayes es que es no-supervisado, por lo que detecta automáticamente las relaciones que existen entre los nodos sin indicarle previamente cuál es el atributo clase. Para ello, aplica el algoritmo de Simulated Annealing [37] con el objetivo de optimizar la topología de la red y depurar las relaciones [38]. Por lo tanto, primero produce un grafo nulo basado en probabilidades mutuas entre las variables, sobre el que se generan relaciones entre nodos que no sean condicionalmente independientes y posteriormente revisa el grafo generado eliminando las conexiones redundantes.

Como resultado de aplicar este método se genera la red que se muestra en la Figura 3 (en la que también se destacan las relaciones con mayor peso utilizando líneas más gruesas). Se puede notar que la red generada es más compleja por existir más relaciones, tanto con los atributos objetivo como con los atributos de entrada. Al utilizar esta red se obtienen resultados más desfavorables que con el prototipo

anterior. La precisión general es menor al 38%, con un 46% para el riesgo del cliente y con un 33% para el comportamiento de pago.

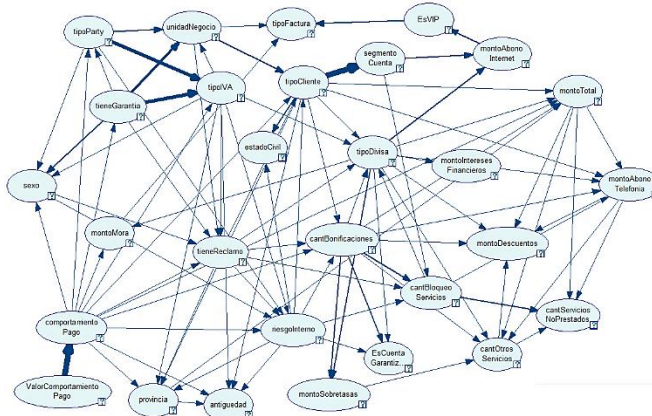


Figura 3. Prototipo creado usando el método GTT

Pero, al observar el valor de precisión para cada valor predicho de la Tabla 4, se puede determinar que los resultados no son confiables. Por consiguiente, este prototipo, además de generar una red compleja (que se podría calificar como inentendible), tampoco aporta resultados útiles para resolver este problema.

Tabla 4. Resultados de la prueba realizada al prototipo creado con el método GTT

Atributo	Valor del Atributo	Predicción
Comportamiento del Pago de las facturas (valorComportamientoPago)	MUY BUENO	58%
	BUENO	0%
	REGULAR	0%
	MALO	0%
	Sin evaluación	58%
	ALTO	55%
Grado de Riesgo del Cliente (riesgoInterno)	REGULAR	38%
	BAJO	36%

- Construcción y prueba del tercer prototipo.** En la generación del tercer prototipo se aplica el algoritmo de aprendizaje Tree Augmented Naïve Bayes (TAN) [39, 40], en el que se indica al atributo *riesgoInterno* como atributo objetivo o clase. Este algoritmo define automáticamente un árbol de relaciones entre los estados, buscando la mayor correlación entre los datos a través de un algoritmo que utiliza eficientemente un tiempo polinomial para obtener parámetros de estimación robustos [41]. Como diferencia significativa con los otros dos métodos, en TAN el atributo clase no tiene padres, sino que se relaciona con los otros atributos tomando el rol de padre (en otras palabras, no tiene conexiones que llegan a él, pero sí conexiones que salen de él hacia otros atributos). De esta manera se busca evitar la necesidad de tener una estructura compleja para garantizar estimaciones de probabilidad fiables [9], es decir, busca obtener un buen nivel de generalización y predicción con una estructura medianamente sencilla.

Al aplicar este método sobre los datos se genera la red de la Figura 4, que incluye relaciones entre atributos no-clase, a diferencia de Naïve Bayes, pero es más sencilla que la producida por GTT. Asimismo, como se puede ver en la Tabla 5, los resultados de probar este prototipo son mejores que los anteriores. En este caso, la precisión general es aproximadamente del 77%, con un 54% para el grado de riesgo y un 100% para el comportamiento de pago. Esto significa que la red es totalmente fiable para

predecir el comportamiento de pago, pero no es tan confiable para clasificar el riesgo del cliente (sobre todo con clientes con riesgo regular). Por consiguiente, aunque este prototipo es prometedor, se requieren llevar a cabo algunas modificaciones para mejorar la precisión de las predicciones.

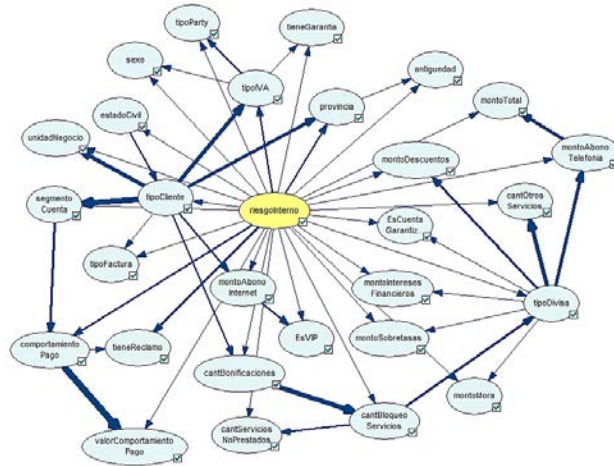


Figura 4. Prototipo creado usando el método TAN

Tabla 5. Resultados de la prueba realizada al prototipo creado con el método TAN

Atributo	Valor del Atributo	Predicción
Comportamiento del Pago de las facturas (valorcomportamientopago)	MUY BUENO	100%
	BUENO	100%
	REGULAR	100%
	MALO	100%
	Sin evaluación	100%
Grado de Riesgo del Cliente (riesgoInterno)	ALTO	63%
	REGULAR	40%
	BAJO	58%

- **Análisis de los prototipos.** A partir de los tres prototipos generados se lleva a cabo una reunión con los expertos en riesgos y facturación de la empresa. Primero se utilizan los prototipos para demostrar las características generales de la tecnología; luego se han discuten las características de cada prototipo, teniendo en cuenta la precisión obtenida y las relaciones entre los datos definidos por cada algoritmo de entrenamiento. A partir de la puesta en común y la discusión, se determina tomar como base para la construcción del modelo bayesiano al tercer prototipo, por ser el que tiene mayor precisión. Sobre dicha red se determinan las siguientes modificaciones teniendo en cuenta el conocimiento de los expertos:
 - Eliminar relaciones redundantes entre atributos: relaciones entre riesgoInterno y los atributos tipoCliente, unidadNegocio, tipoFactura, montoSobretasas, montoInteresesFinancieros, montoMora, sexo y estadoCivil, entre otros, no poseen mayor influencia sobre la definición del valor del grado de riesgo y dificultan el entendimiento del modelo.
 - Agregar relaciones faltantes entre atributos: se agregan relaciones entre los atributos tipoParty, sexo y estadoCivil, así como entre tipoFactura y comportamientoPago y entre tipoCliente y unidadNegocio.
 - Ajustar los valores probabilísticos debido a las modificaciones anteriores, así como para ajustar la influencia entre otros atributos: se aumenta la dependencia existente

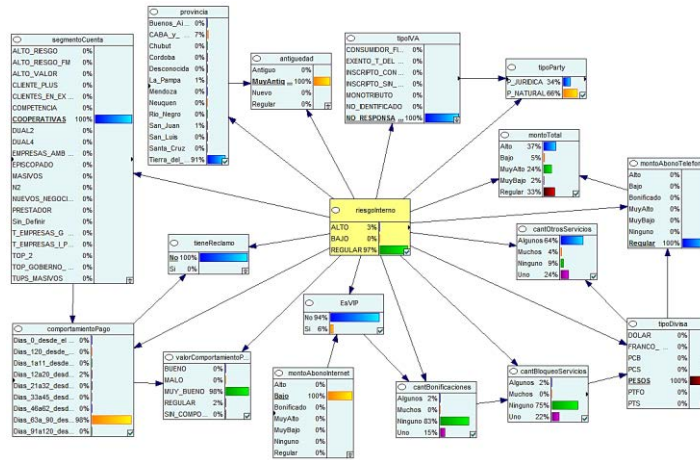


Figura 10. Resultado de la aplicación del caso #14 de validación en el Modelo Bayesiano

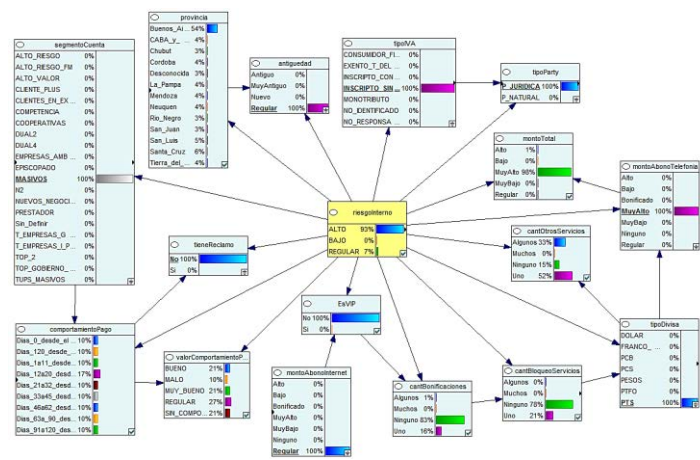


Figura 11. Resultado de la aplicación del caso #40 de validación en el Modelo Bayesiano

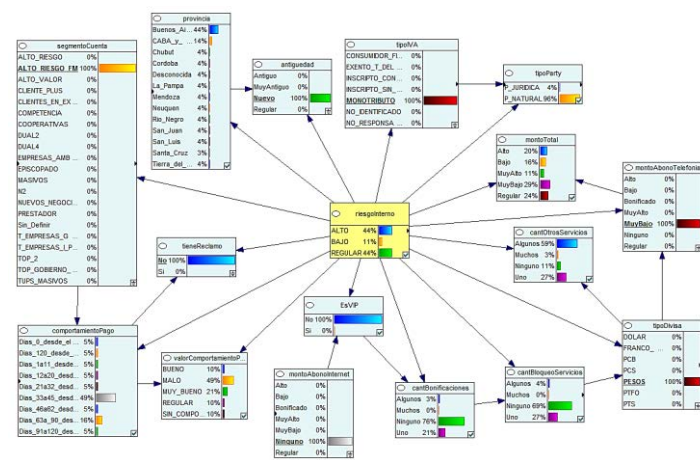


Figura 12. Resultado de la aplicación del caso #75 de validación en el Modelo Bayesiano

Cabe destacar que los resultados son diversos habiendo predicciones de clientes con bajo riesgo (caso #1), riesgo regular (caso #14), riesgo alto (caso #40) y, un aparente empate entre regular y alto (caso #75), donde en realidad no hay empate por una diferencia de 0,4 a favor del valor alto. Los resultados detallados de la aplicación de cada caso, así como su comparación con los valores indicados por los expertos, se encuentran disponibles en [11].

- *Resultados de la comparación entre valores reales y predichos por el modelo.* Una vez obtenidos los valores reales suministrados por los expertos y los predichos por el Modelo Bayesiano, se lleva a cabo una comparación de los mismos. Para ello, se genera una matriz de confusión correspondiente al comportamiento del pago de las facturas (Tabla 8) y al grado de riesgo (Tabla 9).

Tabla 8. Matriz de confusión de la validación para el Comportamiento de Pago

Comportamiento Pago de las facturas (valorComportamientoPago)		Valor Predicho por el Modelo			
		MUY BUENO	BUENO	REGULAR	MALO
Valor definido por Expertos	MUY BUENO	27	0	0	0
	BUENO	3	40	0	0
	REGULAR	0	0	1	0
	MALO	0	0	1	3

Para el primer atributo (Tabla 8) sólo hay 4 casos con diferencias, por lo que se puede decir que el modelo tiene una precisión del 95% con respecto a lo indicado por los expertos. De las diferencias detectadas, tres corresponden a clientes catalogados con comportamiento bueno por los expertos, pero definidos como muy bueno por el modelo, casos #14, #15 y #20. Salvo para #14, la diferencia de probabilidades asignadas entre bueno y muy bueno son menores al 10% (en cambio para #14 la diferencia es del 97%). La otra diferencia corresponde al caso #40, el cual fue indicado como malo por los expertos, pero clasificado como regular por el modelo (con una diferencia de probabilidad del 6% aproximadamente).

Por otra parte, para el segundo atributo (Tabla 9) hay 10 casos con diferencias, donde la mayoría (siete) se encuentra entre los valores alto y regular (casos #5, #6, #14, #15, #37, #66 y #70) con una diferencia de probabilidad promedio alrededor del 33%. Las otras diferencias corresponden a los casos #19 (con una gran diferencia, alrededor del 97%), #43 y #51 (ambos con una diferencia de probabilidad menor al 10%). Por consiguiente, se puede concluir que el modelo tiene una precisión del 87% con respecto a lo indicado por los expertos.

Tabla 9. Matriz de confusión de la validación para el Grado de Riesgo

Grado de Riesgo del Cliente (riesgoInterno)		Valor Predicho por el Modelo		
		ALTO	REGULAR	BAJO
Valor definido por los Expertos	ALTO	36	5	0
	REGULAR	2	19	1
	BAJO	2	0	10

- *Resultados de la aplicación del Método de Wilcoxon.* Para completar la validación del modelo, se realiza una comparación de los casos utilizando la prueba de rangos con signo de Wilcoxon [41]. Esta prueba no-paramétrica se utiliza para comprobar que no hay diferencia significativa entre los valores definidos por los expertos y los valores calculados por el modelo para cada uno de los atributos objetivos. Dado que los valores están expresados en forma lingüística y la prueba de Wilcoxon necesita valores numéricos para calcular las diferencias, a cada etiqueta lingüística se le asigna un valor numérico arbitrario. Estos valores se muestran entre corchetes junto con el valor lingüístico en cada una de las pruebas realizadas. Para realizar cada prueba se utiliza las siguientes hipótesis nula (H0) y alternativa (H1):

1. H0: los valores definidos por los expertos y los calculados por el modelo son tales que la mediana de la población de las diferencias es igual a cero; es decir, no hay diferencias significativas entre lo estimado por expertos y lo generado por modelo.

2. H1: la mediana de la población de diferencias no es igual a cero; es decir, existen diferencias significativas entre lo estimado por los expertos y lo generado por el modelo.

El objetivo de cada prueba es probar si la hipótesis nula es válida o debe ser refutada. A tal efecto se utiliza un nivel de significancia (α) de 0,01 (lo que equivale a un grado de confianza del 99%). En este contexto, la hipótesis nula (H_0) será rechazada si la menor suma de rangos (W) es menor o igual al valor crítico correspondiente para la cantidad de diferencias de pares distinta a cero y el valor α seleccionado. En caso contrario, no se rechaza y se considera válida. A continuación, se presenta la aplicación de la prueba sobre los atributos objetivos:

- *Prueba de Wilcoxon sobre el Comportamiento de Pago.* Como observa en la matriz de confusión para este atributo (Tabla 8), solamente hay 4 diferencias entre los valores definidos por los expertos y los calculados por el modelo. Dado que la cantidad mínima de diferencias requerida por la prueba de rangos de Wilcoxon es de 5 diferencias [41], en este caso no es posible aplicarla. De todas maneras, se puede considerar que no existen diferencias significativas para predecir el comportamiento de pago de las facturas.
- *Prueba de Wilcoxon sobre el Grado de Riesgo.* En el caso del grado de riesgo existen 10 diferencias entre los valores definidos por los expertos y los calculados por el modelo (Tabla 9), por lo que se puede aplicar la prueba de Wilcoxon. En [11] se muestran los resultados de su aplicación indicando solamente los 10 casos donde la diferencia es mayor a cero.

Para comprobar la hipótesis nula se utiliza la menor suma de rangos, que corresponde a la de rangos positivos (W^+), por consiguiente, la menor suma de rangos considerada (W) es igual a 27. Este valor se debe comparar con el valor crítico 3, obtenido de la tabla correspondiente [42] para n igual a 10 pares y un nivel de significancia (α) igual a 0,01. Dado que $W = 27 > 3$ (valor crítico), la hipótesis nula (H_0) no se rechaza. Esto significa que no hay diferencia significativa entre el valor predicho por el modelo para el grado de riesgo y el valor definido por los expertos.

- *Conclusiones de la validación del Modelo Bayesiano.* A partir de las pruebas realizadas se observa que el modelo propuesto asigna tanto el comportamiento de pago como el grado de riesgo en forma similar a lo definido por los expertos de la Empresa. Aunque el grado de riesgo presenta un error superior, al corroborar las diferencias mediante la prueba de rangos de Wilcoxon (con un grado de confianza del 99%) se puede determinar que no existen diferencias significativas. En función de lo expuesto, es razonable inferir que el Modelo Bayesiano propuesto es confiable a los efectos de ser utilizado.
- *Análisis del Comportamiento de los Clientes.* En primer término, se analizan las características de los clientes promedio o normal de la empresa, luego se presentan los resultados del análisis de los clientes dependiendo de su tipo de comportamiento de pago y de acuerdo con su grado de riesgo. Finalmente, se analizan otros atributos de los clientes que se consideran relevantes.
- *Análisis de los Clientes Promedios.* Se considera *normal* o *promedio* al comportamiento general de los clientes que no se conoce ninguna evidencia. Por consiguiente, para estos clientes lo que se analiza es la distribución de las probabilidades a priori [31] de los valores de cada nodo que se observa en la Figura 13. Además de la utilidad que tiene

para la empresa dicho análisis, con el objetivo de conocer las características generales de sus clientes, este *cliente promedio* se utiliza como base para el estudio de los diferentes tipos de comportamiento de pago y grado de riesgo.

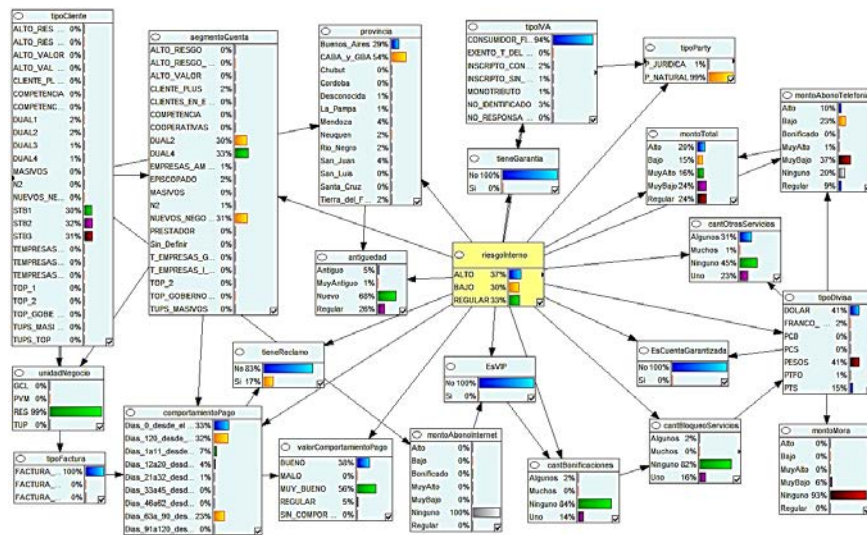


Figura 13. Características del Cliente Promedio

Como se observa en la Figura 13, el comportamiento de pago de los clientes suele tender a ser *muy bueno* (con 58% de probabilidad) o *bueno* (con 38%), siendo para el resto *muy bajo* (menor al 6%). Sin embargo, esto no garantiza que el grado de riesgo también sea aceptable, encontrándose una distribución pareja entre los tres valores (con una probabilidad algo mayor para riesgo alto y menor para riesgo bajo). Esta situación ya había sido detectada al momento de analizar el grado de riesgo utilizando el proceso de ponderación de atributos, donde se observaba que no existía una relación directa entre las dos variables.

Por otro lado, al analizar los otros atributos, se observa que la mayoría son personas naturales (atributo tipoParty con 99%), que son consumidores finales (atributo tipo IVA) y que viven en Buenos Aires (Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Gran Buenos Aires o provincia). La mayoría no tiene ningún tipo de garantía, ni es un cliente VIP, por lo que se los consideran clientes con Servicio Telefónico Básico (STB1, STB2 y STB3), siendo la mayoría relativamente nuevos (con un 68% en antigüedad). Por lo tanto, en sus facturas el principal ítem es el de abono de telefonía (la mayoría no tiene servicios de Internet contratados ni ninguno otro) con montos bajos (menores a \$100) por servicios a nivel nacional (en pesos argentinos) o internacional (en dólares). Finalmente, salvo unos pocos (alrededor del 17%), la mayoría no ha realizado ningún reclamo a la empresa.

- **Análisis de los clientes según su Comportamiento de Pago.** Se analiza la probabilidad de los atributos calculada por el modelo, una vez que se asigna como evidencia un valor en el atributo valorComportamientoPago.
 - Al indicar como evidencia que el comportamiento de pago del cliente es *muy bueno*, se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 14. Salvo algunos detalles menores, para la distribución de probabilidades obtenida el comportamiento es similar al generado para los clientes promedio (Figura 13). Esto se debe a que para este tipo de cliente la mayor proporción se encuentra en los que tienen un comportamiento de pago *muy bueno*.

- Los clientes con un comportamiento malo (Figura 17) tienen una probabilidad de un riesgo *alto mayor*, superando el 65%. Sin embargo, el resto de sus características son similares a las anteriores.

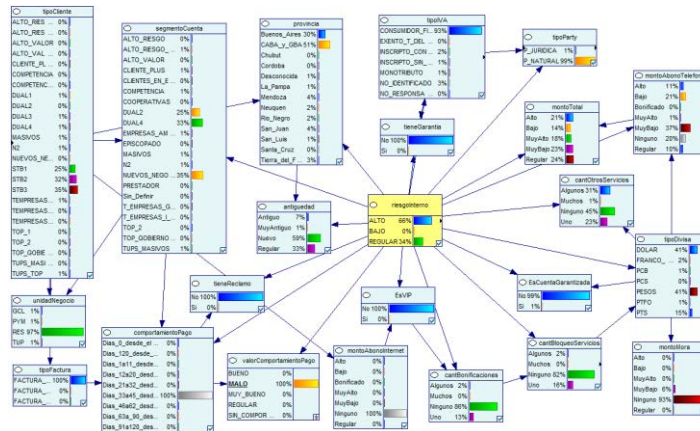


Figura 17. Características de clientes con comportamiento de pago *malo*

- Análisis de los clientes según su grado de riesgo.** De forma similar a la sección anterior, para estudiar a los clientes de acuerdo a su grado de riesgo, se analiza la probabilidad de los atributos calculada por el modelo, una vez que se asigna como evidencia un valor en el atributo riesgoInterno. A continuación, se presentan los principales resultados y las figuras correspondientes para cada evidencia.
 - Los clientes con riesgo bajo (Figura 18) también poseen características similares a los clientes promedio (Figura 13). Sin embargo, se destaca que tienen mayor probabilidad de ser clientes nuevos (con un 89%), tener al menos un reclamo realizado (55%) y aumenta levemente (alrededor del 4%) la posibilidad de que tengan alguna bonificación. Esto se debe a que para captar nuevos clientes (o para tranquilizar a un cliente que se queja), la empresa suele asignarles algún tipo de bonificación a los servicios.

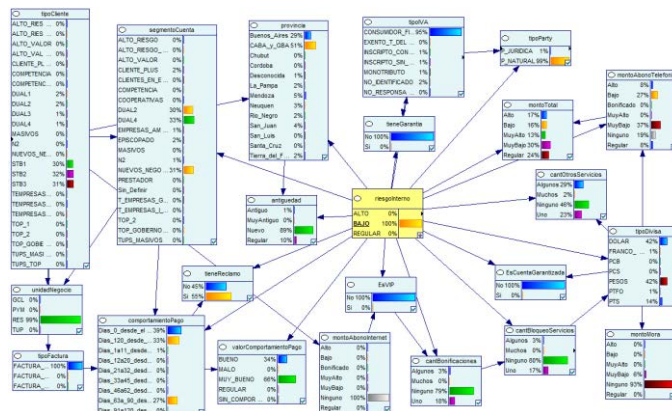


Figura 18. Características de clientes con grado de riesgo *bajo*

- En cambio, para los clientes con riesgo regular (Figura 19) y alto (Figura 20), estas diferencias se revierten, volviéndose aún más similares a los clientes promedio. La mayor diferencia que se detecta con respecto a los promedios es que casi ningún cliente, con riesgo regular o alto, ha hecho algún tipo de reclamo (la probabilidad es de aproximadamente el 99%). Además, los clientes con mayor riesgo suelen tener una antigüedad algo mayor, tendiendo a ser considerados antiguos clientes.

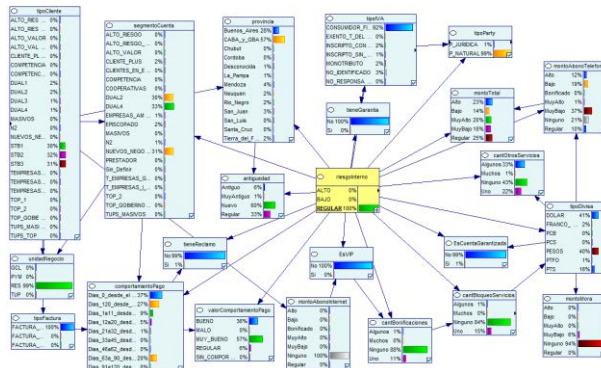


Figura 19. Características de clientes con grado de riesgo regular

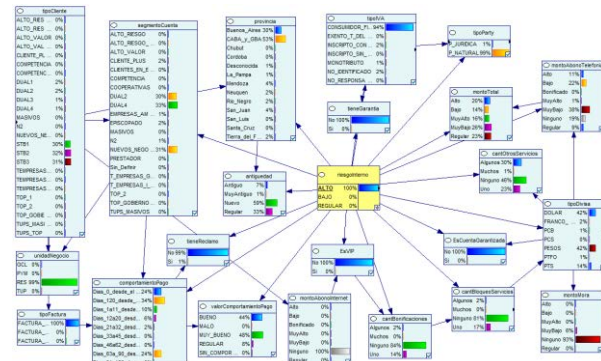


Figura 20. Características de clientes con grado de riesgo alto

- Otros análisis de los clientes.** Por último, se presenta la variación de otras tres características de los clientes, que se encontraron interesantes y relevantes durante la elaboración del presente trabajo.
 - Al definir que el cliente es *muy importante*, o VIP (valor sí en el atributo esVIP), en la Figura 21 se pueden apreciar diferencias con respecto a los clientes promedios (Figura 13), dado que, como lo indica su denominación, no es normal que un cliente pertenezca a esta categoría. Al contrario de los clientes normales, los VIP se destacan por contratar servicios de Internet con diferentes valores de consumo. Por lo tanto, se corresponden a los segmentos episcopado, empresas VIP del Área Metropolitana de Buenos Aires, N2, DUAL4 y DUAL2. Entre estos clientes el comportamiento de pago también se encuentra bien catalogado (entre bueno y muy bueno) y su grado de riesgo se encuentra entre bajo y regular.

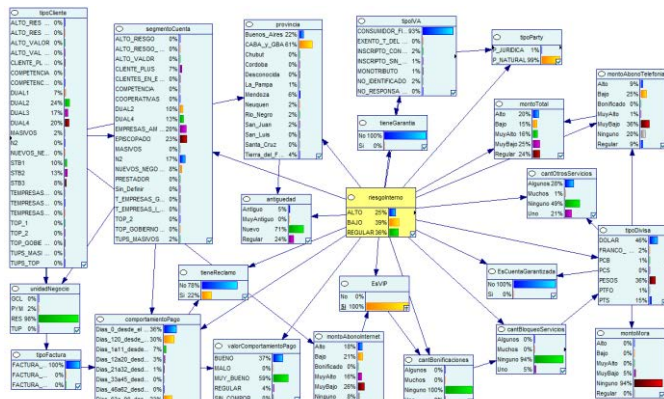


Figura 21. Características de clientes VIP

- En el caso de clientes normales pertenecientes al gobierno, se observa en la Figura 22 que el grado de riesgo siempre es alto. Esto se debe a que, sin importar si se trata de un gobierno municipal, provincial o nacional, estos clientes siempre tienen demoras y problemas para pagar sus facturas. A su vez, la posibilidad de que cambien los servicios a un competidor, también son muy altas.

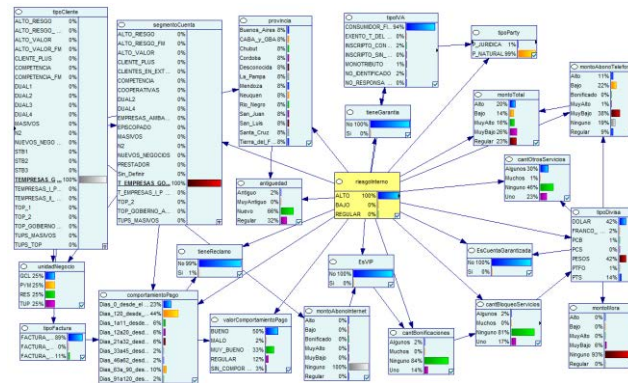


Figura 22. Características de Clientes Normales pertenecientes al Gobierno

Sin embargo, esta situación no sucede con los clientes importantes pertenecientes al gobierno en la zona metropolitana (Figura 23), donde la posibilidad de que suceda es menor y, por lo tanto, se los considera con un riesgo más regular que alto.

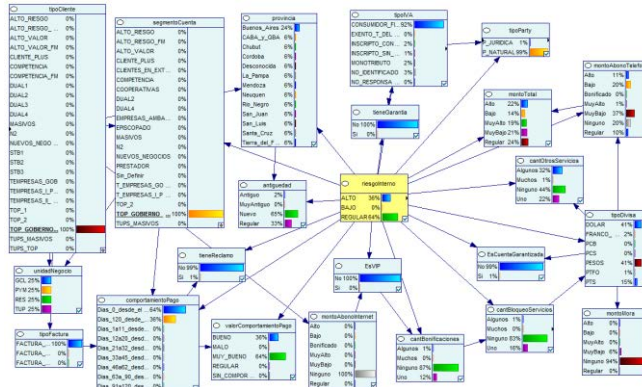


Figura 23. Características de Clientes Importantes pertenecientes al Gobierno

- Algo similar sucede al analizar los clientes antiguos (o muy antiguos) con abonos de telefonía e Internet muy altos, que se muestran en las Figuras 24 y 25, respectivamente. Se puede notar que el riesgo está bastante equilibrado entre regular y alto, aunque su comportamiento de pago sea bueno o muy bueno.

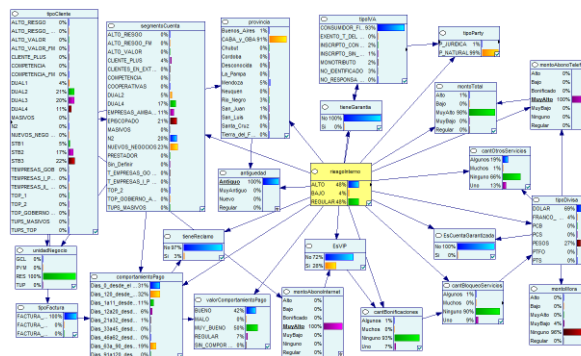


Figura 24. Características de Clientes Antiguos con Abonos Muy Altos

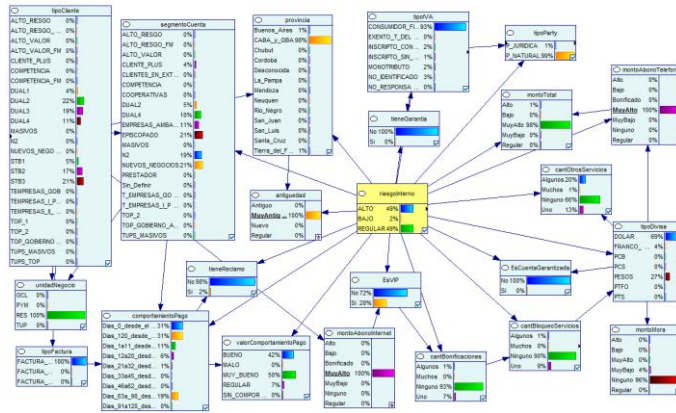


Figura 25. Características de Clientes Muy Antiguos con Abonos Muy Altos

4. Conclusiones

En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación de mecanismos provenientes de la Inteligencia Artificial, para asistir las tareas de evaluación y asignación de grado de riesgos de los clientes de una Empresa de Telecomunicaciones. Debido a la complejidad de dichas tareas, no es posible identificar un modelo de solución simple que se pueda implementar mediante un sistema software tradicional. Por lo tanto, es necesario usar mecanismos que permitan evaluar las características del cliente aplicando los conocimientos de analistas y así aumentar el grado de confiabilidad de los resultados.

En este contexto, se utiliza la Explotación de Información para descubrir patrones de conocimientos que determinen el comportamiento de los analistas, al momento de evaluar las características de los clientes. De esta manera, mediante el uso de dos algoritmos de Minería de Datos, aplicados sobre los datos suministrados por la Empresa, se obtiene un conjunto de reglas y una ponderación de las características del cliente. Aunque estos resultados han servido para comprender mejor las relaciones entre los atributos del cliente e identificar los atributos más relevantes, no resultan suficientemente generales ni confiables para su implementación. Esto se debe a que, por un lado, los patrones descubiertos presentan visiones parciales de las distintas condiciones (o combinación de características) y, por otro lado, al intentar generalizar se detecta un bajo nivel de precisión.

Por consiguiente, se considera oportuna la aplicación de Redes Bayesianas sobre los mismos datos. Este tipo de modelo se basa en principios de la Estadística, por lo que permite llevar a cabo un tratamiento de la incertidumbre de forma simple, mediante la combinación de efectos a partir de un conjunto (generalmente pequeño) de evidencias. De esta manera, se ha buscado estudiar con mayor detalle la interacción entre los atributos del cliente y, así, determinar diferentes estilos de comportamiento de los clientes.

En este caso, para la implementación del Modelo Bayesiano se provecha la capacidad de la herramienta para *aprender* de forma automática. A pesar de que se construyeron tres versiones iniciales de la red, su precisión fue suficientemente aceptable. Por lo tanto, son utilizadas como prototipos en reuniones con los analistas de la Empresa y, de esta manera, educir con mayor detalle los conocimientos clave (que se podrían considerar como heurísticas del dominio), para incorporarlos en el modelo. Como resultado, se logra generar un Modelo Bayesiano con una mejora significativa en su precisión. Por lo tanto,

es posible recalcar que es muy útil contar con herramientas que puedan aprender automáticamente a partir de los datos, pero que, al menos todavía, no reemplazan los conocimientos de los expertos del dominio. No obstante, este Modelo Bayesiano ha sido validado satisfactoriamente, por lo que se considera adecuado para emular la forma en que los expertos llevan a cabo la evaluación de riesgos de los clientes y prestarles asistencia en sus actividades. Asimismo, ha sido posible identificar las características de diferentes estilos de clientes para su posterior estudio.

Como futuras líneas de trabajo se prevé, en primera instancia, integrar la solución validada al sistema de información actual disponible en la empresa. De esta manera se buscará mejorar los resultados del sistema inteligente construido. Así, se realizará un mantenimiento perfectivo que incorporará cambios y ajustes al sistema de información, a partir de la retroalimentación de los analistas expertos de la organización sobre las predicciones generadas por el modelo. Por otro lado, se pretende evaluar la pertinencia de aplicación de Sistemas Inteligentes para solucionar otros problemas de la Empresa.

Referencias

- [1] Decreto 764/2000. [Boletín Oficial, Presidencia de la Nación Argentina](#). Online [Apr 2016].
- [2] ENACOM. [La Telefonía Fija](#). Ente Nacional de Comunicaciones, Argentina. Online [Apr 2016].
- [3] CNC. [Portabilidad Numérica Móvil](#). Comisión Nacional de Comunicaciones, Argentina. Online [Apr 2016].
- [4] Riveros, H. & Rosas, L. (1990). [El Método Científico Aplicado a las Ciencias Experimentales](#). México: Editorial Trillas.
- [5] Sábato, J. & Mackenzie, M. (1982). [La Producción de Tecnología: Autónoma o Transnacional](#). Suiza: Instituto Latinoamericano de Estudios Transnacionales.
- [6] Chapman, P. et al. (2000). [CRISP-DM 1.0 Step by step BI guide](#). Edited by SPSS..
- [7] Britos, P. & García, R. (2009). [Propuesta de Procesos de Explotación de Información](#). Proceedings XV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (pp. 1041-1050). Universidad Nacional de Jujuy, Argentina.
- [8] García, R., Servente, M. & Pasquini, D. (2003). [Sistemas Inteligentes](#). Buenos Aires: Nueva Librería.
- [9] Bielza, C. & Larranaga, P. (2014). [Discrete Bayesian network classifiers: A survey](#). ACM Computing Surveys 47(1), Art. 5.
- [10] <https://rapidminer.com/products/studio/>. Online [Apr 2016].
- [11] Vegega, C., Pytel, P. & Pollo, M. (2016). [Descripción detallada de propuesta de Sistema Inteligente para clasificación automática de clientes en empresa de telecomunicaciones](#). Reporte Técnico GEMIS-TD-2015-03-TR-2016-06. Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires.
- [12] KDnuggets (2013). [KDnuggets 14th Annual Analytics, Data Mining, Data Science Software Poll](#). Online [Apr 2016].
- [13] KDnuggets (2014). [KDnuggets 15th Annual Analytics, Data Mining, Data Science Software Poll](#). Online [Apr 2016].
- [14] KDnuggets (2015). [R leads RapidMiner, Python catches up, Big Data tools grow, Spark ignites](#). Online [Apr 2016].
- [15] Schiefer, J. et al. (2004). [Process Information Factory: A Data Management Approach for Enhancing Business Process Intelligence](#). Proceedings 2004 IEEE International Conference on E-Commerce Technology (pp. 162-169). San Diego, USA.
- [16] Thomsen, E. (2003). [BI's Promised Land](#). Intelligent Enterprise 6(4), pp. 21-25.
- [17] Negash, S. & Gray, P. (2008). [Business Intelligence](#). In Burstein, F. & Holsapple, C. (Eds.), Handbook on Decision Support Systems (pp. 175-193). USA: Springer.
- [18] Kanungo, S. (2005). [Using Process Theory to Analyze Direct and Indirect Value-Drivers of Information Systems](#). Proceedings 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (pp. 231-240). Hawaii, USA.
- [19] Alpaydin, E. (2014). [Introduction to machine learning](#). Massachusetts: MIT press.
- [20] Witten, I. & Frank, E. (2005). [Data Mining: Practical machine learning tools and techniques](#). Amsterdam: Morgan Kaufmann.
- [21] Pyle, D. (1999). [Data preparation for data Mining](#). Amsterdam: Morgan Kaufmann.
- [22] García, R. et al. (2011). [Towards an Information Mining Engineering](#). En Software Engineering, Methods, Modeling and Teaching (pp. 83-99). Medellín: Editorial Universidad de Medellín.

- [23] Dietterich, T. (2000). [An experimental comparison of three methods for constructing ensembles of decision trees: Bagging, boosting, and randomization](#). *Machine learning* 40(2), pp. 139-157.
- [24] Quinlan, J. (1992). [C4.5: Programs for Machine Learning](#). San Mateo: Morgan Kaufmann.
- [25] Zhao, Y. & Zhang, Y. (2008). [Comparison of decision tree methods for finding active objects](#). *Advances in Space Research* 41(12), pp. 1955-1959.
- [26] Duda, R. & Hart, P. (1973). [Pattern Classification and Scene Analysis](#). New York: John Wiley.
- [27] Langley, P., Iba, W. & Thompson, K. (1992). [An analysis of Bayesian classifiers](#). *Proceedings Tenth National Conference on Artificial Intelligence* (pp. 223-228). Menlo Park, USA.
- [28] Pearl, J. (1988). [Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems](#). San Francisco: Morgan Kaufmann.
- [29] Barber, D. (2012). [Bayesian Reasoning and Machine Learning](#). Massachusetts: The MIT Press.
- [30] Premchaiswadi, W. (2012). [Bayesian Networks](#). London: In-Tech.
- [31] Sucar, L. (2006). [Redes Bayesianas](#). En Araujo, B. (Ed.), *Aprendizaje Automático: Conceptos básicos y avanzados* (pp. 77-100). México: Pearson Educación.
- [32] Aycaguer, L. & Gil, P. (2000). [¿Qué es la inferencia bayesiana?](#) *Jano* 58(1338), pp. 65-66.
- [33] <http://www.kdnuggets.com/software/bayesian.html>. Online [Apr 2016].
- [34] <https://dslpitt.org/genie/>. Online [Apr 2016].
- [35] Cooper, G. & Herskovits, E. (1992). [A Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data](#). *Machine Learning* 9(4), pp. 309-347.
- [36] Pernkopf, F. & Wohlmayr, M. (2013). [Stochastic margin-based structure learning of Bayesian network classifiers](#). *Pattern Recognition* 46(2), pp. 464-471.
- [37] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. & Vecchi, M. (1983). [Optimization by simulated annealing](#). *Science* 220(4598), pp. 671-680.
- [38] Hesar, A. (2013). [Structure Learning of Bayesian Belief Networks Using Simulated Annealing Algorithm](#). *Middle-East Journal of Scientific Research* 18(9), pp. 1343-1348.
- [39] Friedman, N., Geiger, D. & Goldszmidt, M. (1997). [Bayesian network classifiers](#). *Machine learning* 29(2-3), pp. 131-163.
- [40] Zheng, F. & Webb, G. (2010). [Tree Augmented Naive Bayes](#). *Encyclopedia of Machine Learning*. USA: Springer.
- [41] Frank, E., Hall, M. & Pfahringer, B. (2002). [Locally weighted naive bayes](#). *Proceedings Nineteenth conference on Uncertainty in Artificial Intelligence* (pp. 249-256). Acapulco, Mexico.
- [42] Corder, G. & Foreman, D. (2009). [Nonparametric statistics for non-statisticians: A step-by-step approach](#). USA: John Wiley.

36. Strongly bioinspired, hardware-implementable ciphering

Jaime Parra P.

Institución Universitaria Antonio José Camacho. Cali, Colombia

1. Introduction

In this information age, data are omnipresent, and keep them away from undesired eyes is an important concern, hence the need for algorithms and tools that permit people to hide their private information in a secure, yet easily recoverable way. Ciphering is either encrypting or decrypting a message. Cryptography is the scientific field dedicated to the study and development of methods to keep information secret, i.e., hidden to unwanted intruders by transforming the desired information (the message) into an unrelated string (the cipher). Another associated area is cryptanalysis, the science of attacking ciphers and/or finding weaknesses in the methods suggested. Together, they comprise the wider area of cryptology [1].

There is an agreement that messages contain textual information, since numeric information is on its own indecipherable without knowledge of the context it refers to. Two differentiable epochs are recognized in cryptography: the classical epoch, prior to the World War I, and the modern epoch, after that. In the former, cryptology was synonymous of encryption, i.e., transforming the messages into nonsense. In the latter, the focus is on hiding the messages by developing computational hardness assumptions, considered hard to break by an adversary. Among the main assumptions employed are: factorization of composite numbers having as factors only prime numbers [2], and computing logarithms in finite fields [3].

Cryptography is mainly dedicated to keep secrets. This implies the existence of an adversary, who wants to gain unauthorized access to the contents of a message that some sender wants to transmit to a receiver. To do that, the sender does not transmit the message, but a cipher, a modified version of the message. Encrypting is good when three properties are guaranteed:

1. If the adversary captures the message, he must have great difficulty in understanding the content of the message (i.e., it must be difficult to decode the cipher, even if the adversary knows what the method of encryption is).
2. The authorized receiver must be able to figure out, with relative ease, the content of the message by decoding the cipher. This can be done because both the sender and the receiver know a private key that is used to perform the decoding.
3. Its strength must lie in maintaining the key private, whereas the method employed should be public, to allow standardization of algorithms and their large-scale diffusion. Of course, the key must be managed and distributed properly. In this way, the cryptosystem is practical (this viewpoint is also known as Kerckhoff's principle [4]).

The classic methods for cryptography produce ciphers either by substitution or transposition [5]. A substitution or shift cipher is obtained by systematically replacing letters (or groups of letters) with other letters (or groups of letters). For a given letter in the message, its replacement corresponds to the letter present k positions forward in the common alphabet. These ciphers are also known as Caesar ciphers since they were used by Julius Caesar to communicate with his generals during his military campaigns, especially in his battles against the Gauls. Supposing a shift of three positions, ciphering will proceed as follows (messages are presented in lowercase, and ciphers in uppercase):

Message: all of gaul is divided into three parts

Cipher: DOO RI JDXO LV GLYLGHG LQWR WKUHH SDUWV

Of course, one way to harden decoding is by allowing the amount of shift to be variable, becoming a shared, private key between the sender and the receiver. Nonetheless, the fact that the length of the original words is preserved makes possible that a brute force attack can easily discover the message content. Its weakness derives from the fact of being monoalphabetic in the sense that, given a key, it always encrypts a letter the same way.

A transposition cipher appears when the letters of a message are rearranged, i.e., moved to other positions in the message. The concept can also be expressed by saying that the cipher is a permutation of the message. Another name for these ciphers is anagrams. Several methods have been proposed using this idea. One example of this method is the route cipher {Simmonds}. It is based on the construction of a matrix using the message letters. The length and width of such matrix constitute the key. Consider obtaining a route cipher using as key a 3x7 matrix for the following text:

Message: this is a secret message

First, the text is put on the matrix:

*T S A C T S G
H I S R M S E
I S E E E A J*

Second, the cipher is created by reading out the matrix row by row:

Cipher: TSACTSGEJAEESISIHRMSE

Transposition ciphers are harder to decode than substitution ciphers. Nonetheless, since the original letters remain, applying frequency count it is possible to break the code, providing there is some knowledge about how frequent letters are in the language used to write the message. Moreover, the cipher is created as a monolithic entity and requires the entire content of the message to be present.

As classical encryption has important weaknesses, modern cryptography is based on hiding the message into a cipher created by applying some transformation manifesting a very hard to compute property. Consider the case of the RSA cipher [6], which bases its power on the following fact about prime numbers: Given two prime numbers (p , q), calculating the product $n=p*q$ is not hard, but factoring n into its prime factors is essentially impossible if $p, q \geq 10^{80}$. RSA ciphering/deciphering is performed following these steps:

1. Select two private keys p and q .
2. Select a public key e .
3. Calculate n and d using the formulas:
$$n=p*q$$
$$d=(1/e) \text{ mod } [(p-1)*(q-1)]$$
4. Encode each message letter (l) as a positive integer to obtain encoded message x .
5. Encrypt the message by applying the formula:
$$y = E(x,n,e) = x^e \text{ mod } n$$
6. Decrypt the cipher by applying the formula:
$$x = D(y,n,d) = y^d \text{ mod } n$$

Consider the following numerical example, which, for simplicity, uses small numbers (strong ciphering requires using very large numbers). Suppose $p=71$, $q=59$, hence

$n=4189$. Suppose also $e=3$, hence $d=2707$. n and e are publishable, whereas p and q must be kept secret. Suppose the sender wants to send message 1234. He will calculate the corresponding cipher as:

$$y = E(1234, 4189, 3) = 1234^3 \bmod 4189 = 229$$

And transmit it to the receiver, who can recover the hidden message by applying:

$$x = D(229, 4189, 2707) = 229^{2707} \bmod 4189 = 1234$$

2. Biociphering

The idea behind modern cryptographers is very powerful. However, they can only produce hard-to-break ciphers at the cost of managing extremely large numbers, which requires sophisticated arithmetic computation and important memory resources. On the other hand, classical cryptographers are very simple, but usually impractical because of their evident weakness. It is because of such extreme characteristics that it was decided to propose a strategy that takes the good aspects of each approach and discourages the bad ones. Another desire was to have an approach that allows a serial, character-based processing taking into account that such a property permits real-time processing and also facilitates its implementation in reconfigurable hardware. To do that, a bioinspired approach was considered.

Cyto-computation is a strongly bio-inspired computational intelligence strategy, which uses as inspiration the biomolecular dynamics occurring within biological cells [7]. It has been employed successfully for a variety of applications, including optimization, data discovery, unsupervised learning, and constraint-based processing [8]. There is a variety of cells and cell components, however all cells share two common and universal characteristics: a genetic machinery and a set of proteins [9]. The purpose of a particular gene is the creation of a molecule called polypeptide. When a group of polypeptides are linked in a certain way, a protein is created (see Figure 1).

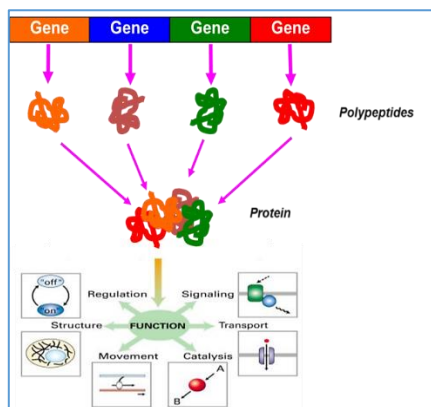


Figure 1. Genes, polypeptides, and proteins

Proteins serve for very different aspects inside a cell, among which is the control of genes themselves. Through them genes can regulate each other, establishing a differentiation between genes that only produce proteins (structural genes), and genes that produce special proteins (transcription factors) that regulate other genes (regulatory genes) [10]. Besides that, basic behavior, proteins are also used as a means of carrying information for the outside of the cell. A general view of these components and their relationships is shown in Figure 2.

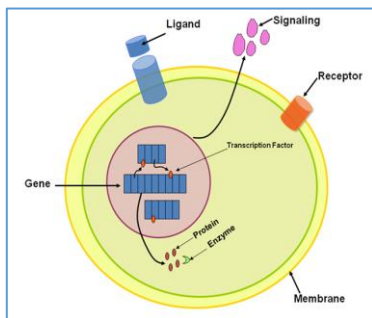


Figure 2. Functions of genes and proteins

Within a cell there is a huge amount of proteins, with very different configurations and functionality, but, for the sake of computational purposes, three of them are the most important: enzymes, ribozymes and transcription factors (TF). They are in charge of building, analyzing, and decoding information present in standard proteins, which can be seen as data at this respect [11].

An enzyme is responsible for creating and/or modifying the structure of a protein, a ribozyme analyzes the structure of a protein and generates molecules that account for that analysis, a TF's mission is to join a particular gene and modulate the production rate of its polypeptide, either promoting or inhibiting generation (see Figure 3). It should be noted that formally a ribozyme is not a protein but an RNA, but functionally acts as if it were an enzyme [12].

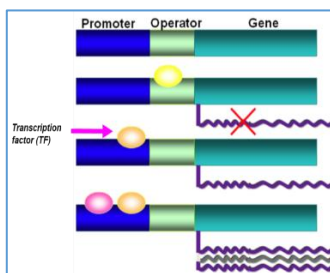


Figure 3. Gene activity modulation by transcription factors

These two processes, the genomic one and the proteinic one, cross-control each other, allowing different computational schemes exploiting the various possibilities of interaction. The diagram presented in Figure 4 shows the computational model obtained from this biological behavior. In it, several processes exist. Although they run concurrently, for the purpose of explanation they are described as sequential.

The first activity is the creation of features by genes, the second is the assembly of compounds joining the features available, the third is the modification of such compounds to insert/adjust them into the current computational space, the fourth is event detection, its association with existing features and activation of promotion and/or inhibition modulators, the fifth is the application of such modulators for the next iteration. Not all these processes are mandatory, and the designer is free to select those more appropriated for the task in hand. In the case of ciphering and deciphering, they are straightforward processes that can be optimized for speed of resource utilization, moreover taken into account that the system is intended to be run on a basic hardware at full speed for real-time processing.

With that consideration, the adaptive machinery of Cyto is optional and concentration will be devoted to the transformation processes. The two main processes will be

employed in order to maximize the two aspects abovementioned. Genes will produce fragments of the cipher and proteins will encourage maximal distortion of patterns in original message so as to prevent any attempt to detect possible relationships between both.

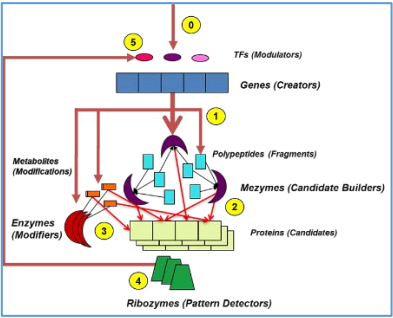


Figure 4. Cytocomputational scheme

Cyto Crypto, the cytocomputational alternative for cryptography, retakes the classical approach, and makes it more robust by adding a highly strong dynamism to the application of every operation in order to make predictability negligible. Substitution is designed in such a way that periodicity and trivial linear relationships are completely disrupted. Transposition is replaced by translation; which also implies that the process can be run on a letter basis, allowing the possibility for real time encryption, while the amount of memory required for buffering the input message is significantly reduced.

In words of Claude Shannon [13], a good cipher must incorporate both confusion and diffusion. In pattern terms, it is equivalent to say that a cipher should hide local patterns (confusion) and disintegrate global structure (diffusion), i.e., both small-scale and large-scale structures must be destroyed. Cyto Crypto takes the best of the classical cryptographers and removes their weaknesses by applying its bioinspired approach to satisfy these conditions. The system can be set to work at different levels of complexity. Hence, let us start by introducing the simplest scenario for Cyto Crypto, one without regulatory genes.

Without loss of generality, small numbers will be used for the contents of messages and ciphers. A real implementation uses enough values to represent all the letters and symbols present in the desired alphabet. A given gene can be instructed to express several polypeptides, hardening the labor of an attacker by incrementing the polyalphabetic repertoire of the system. Modeling of a ciphering in cytocomputational terms implies assigning functionality to each cyto agent: genes, polypeptides, proteins, and transcriptions factors for this initial simple approach.

The cipher to be created will be a protein. Each letter in it will be a polypeptide. A given gene will produce one or more polypeptides. Transcription factor will force genes to modify their behavior in accordance to a given rule. The secret key in Cyto Crypto is constituted by the original affinity and expressivity of the genes. Affinity has to do to how a gene relates to a transcription factor, and expressivity indicates the number of polypeptides a gene can generate. The secret key is given as a structure indicating the affinity and expressivity of the set of genes. Suppose a simple example in which the input alphabet is comprised of digits from 1 to 5, and output alphabet is the numbers from 1 to 9. Table 1 presents such a structure. Consider the following input: *Message: 315311*. The system proceeds to read the first letter (3) and to check genes' affinity to it. In this case, that affinity is with gene 3 (fifth data column in Table 1). This gene in turn expresses the

substring comprised of polypeptides 5, 1, and 3 (expression row in TableTable 1). After that, the affinity of the transcription factor used is modified to become favorable to another gene. In this simple case that change is done by “moving” the affinity value to a new location, as far as the first polypeptide expressed indicates (5 in this case, corresponding to the entry in fifth data column and expression row). Again, that moving action is given in that simple way for this example, not as a general rule.

Table 1. Initial representation for the simplest Cyto Crypto

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Gene		1		2	3			4	5
Affinity		5		2	3			1	4
Expression	9	7	2	8	5	1	3	4	6

Assuming that movement will always proceed rightward, the new location will be position 1. Observe how positions must be considered as continuous, with the position at the right extreme contiguous to the first one. The current position for such transcription factor is 5, and the moving value is also 5, that will give a new position of 10. Since there are only 9 columns, values are 9-modulus. That is the reason why new location is 1. Table 2 shows the new state of the system, when, for the message=315311, the current cipher is 513.

Table 2. Cyto Crypto state after processing the first letter

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Gene	1	2		3				4	5
Affinity	3	5		2				1	4
Expression	9	7	2	8	5	1	3	4	6

Now the current letter to process is 1, which shows affinity for gene 4, whose expression is polypeptide 4. After affinity moves to its next position, the system is on the state shown in Table 3, when, for message=315311, the current cipher is 5134.

Table 3. Cyto Crypto state after processing the second letter

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Gene	1	2	3	4					5
Affinity	3	5	1	2					4
Expression	9	7	2	8	5	1	3	4	6

The next letter on the message is 5, affine to gene 2. After the gene expresses polypeptide 7 and affinity moves to its next position, the system is on the state shown in Table 4 (message=315311; current cipher=51347). Observe here how the movement is performed. Affinity must move 7 places, but this location is occupied by another affinity. The searching for an empty place finishes at position 5.

Table 4. Cyto Crypto state after processing the third letter

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Gene	1		2	3	4				5
Affinity	3		1	2	5				4
Expression	9	7	2	8	5	1	3	4	6

The fourth letter to be processed is 3, which matches gene 1 and promotes creation of polypeptides 9 and 7. Movement places affinity at position 2 because the domain is finite, which implies that moving M places is the same as moving $M \bmod \text{DomainLength}$, which in this case is 5. This action reports a new position that equals the current one, movement proceeds from that point until finding an empty place. Table 5Table shows the new state of the system (message=315311; current cipher=5134797).

Table 5. Cyto Crypto state after processing the fourth letter

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Gene		1	2	3	4				5
Affinity		3	1	2	5				4
Expression	9	7	2	8	5	1	3	4	6

The next value on the message is letter 1, which promotes gene 2 to express. The product of the expression, along with the current distribution of genes, motivates affinity to jump to position 6. Table Table 6 summarizes the current state of the crypto system (message=315311; current cipher=51347972).

Table 6. Cyto Crypto state after processing the fifth letter

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Gene		1		2	3	4			5
Affinity		3		2	5	1			4
Expression	9	7	2	8	5	1	3	4	6

The last letter to be processed is letter 1 again. After expression of the gene, three new polypeptides are added to the cipher and the process is suspended. The state of the system after suspension is shown in Table 7 (message=315311; current cipher=51347972134). The cipher obtained is: *Cipher: 51347972134*.

Table 7. Cyto Crypto state after processing the sixth letter

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Gene		1		2	3		4		5
Affinity		3		2	5		1		4
Expression	9	7	2	8	5	1	3	4	6

Deciphering is performed symmetrically. The components of the cipher can be seen in one of two ways: if their status as polypeptides is preserved, deciphering is a kind of reverse transcription, process in which the products expressed by a gene activate it, or they can be considered as TFs, case in which the original TFs become now polypeptides. Irrespective of the way the process is seen, it runs in only one way. The machinery reads ciphers one by one, detects the gene related to it, obtains the corresponding message element and updates cipher and gene positions. Table 8 depicts the whole process (cipher=51347972134; expected message=315311).

Table 8. Deciphering a Cyto cipher

Cipher Head	Ciphers skipped	Position									Message Decoded
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
		Expression									
		9	7	2	8	5	1	3	4	6	
		Affinity									
5	13		5	2	3		1	4		3	
4			3	5	2		1	4		31	
7			3	5	1	2		4		315	
9	7		3	1	2	5		4		3153	
2				3	1	2	5		4	31531	
1	34			3	2	5	1		4	315311	
end				3	2	5	1		4	315311	

The cipher is treated as a stream, when the first character is red (5 in this case), it is searched in the expression characters (see Figure 1for this explanation). When found (position 5 in this case), Cyto Crypto looks for the corresponding gene (3 in this case). It also analyzes the next genes in order to determine whether they are active. In this case the next two genes are inactive, hence the next two polypeptides (1 and 3 in this case) are skipped. Process continues in a similar way as when ciphering, being the only difference the order in which elements are explored. In ciphering it goes from message to genes to

polypeptides to cipher, and in deciphering it runs from cipher to polypeptides to genes to message.

3. Hardciphering

Taking into account that the approach considered employs very simple mathematics (just operations such as addition of shifting), a hardware implementation is viable. Moreover, one in custom hardware where the designer can decide what resources to use. Reconfigurable hardware is one of such possibilities. It is a kind of hardware that is initially in an omnipotent state, i.e., all its resources are available for any functionality. An FPGA (field-programmable gate array) is one kind of reconfigurable hardware; it allows prototyping different architectures thanks to its capability of universality. By default, the device comes with a sea of digital resources in the form of logic blocks, all of them with the possibility of being interconnected in a very liberal way [14], see Figure 5.

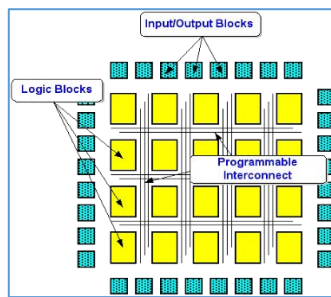


Figure 5. FPGA architecture

Each logic block has a mixture of combinatorial blocks (or LUTs, for look-up tables) and sequential, storing elements (flip-flops), in which the implementation is made. Depending of the complexity of the logic blocks, the device is classed as fine-, medium- or coarse-grain. Figure 6 shows an example of the first case and Figure 7 of the second case.

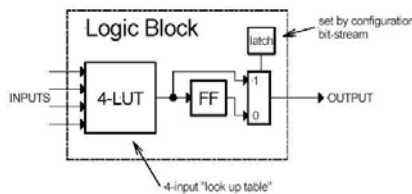


Figure 6. Fine-grain logic block

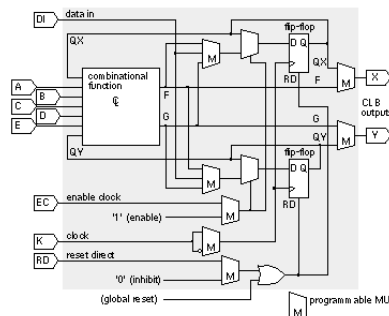


Figure 7. Medium-grain logic block

To define a particular architecture, the designer describes it by means of a Hardware Description Language (or HDL). Through it, a rather high-level description can be presented to the synthesis tool which takes it and generates a configuration file that

contain information for the device indicating which fuses must be kept and which ones should be blocked [15]. Figure 8 shows an example of an HDL code intended to describe in a high level fashion a resettable, loadable, ascending counter.

```

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
use IEEE.numeric_std.all; -- for the unsigned type
entity COUNTER is
  generic (
    WIDTH : in natural := 32);
  port (
    RST : in std_logic;
    CLK : in std_logic;
    LOAD : in std_logic;
    DATA : in std_logic_vector(WIDTH-1 downto 0);
    Q : out std_logic_vector(WIDTH-1 downto 0));
end entity COUNTER;
architecture RTL of COUNTER is
  signal CNT : unsigned(WIDTH-1 downto 0);
begin
  process(RST, CLK) is
  begin
    if RST = '1' then
      CNT <= (others => '0');
    elsif rising_edge(CLK) then
      if LOAD = '1' then
        CNT <= unsigned(DATA); -- converted to unsigned
      else
        CNT <= CNT + 1;
      end if;
    end if;
  end process;
  Q <= std_logic_vector(CNT); -- converted back to slv
end architecture RTL;

```

Figure 8. HDL code example

Figure 9 shows the main aspects of the implementation of Cyto Crypto in an FPGA. It was implemented on an Altera EP3SL50F484C2. It includes two Register files (RF1 and RF3) to store the initial values for genes and proteins respectively. A special register file (RF2) is used to store intermediate values obtained during the shifting stages, case in which signal Flag indicates when the value present in the register is valid. The different moves performed on genes are managed with the help of three counters (COUNT-Address, COUNT1, and COUNT2). Finally, some comparators are used to compare the input data MSG with the RF2 output in encryption mode (CMP1) or with the RF3 outputs in decryption mode (CMP2).

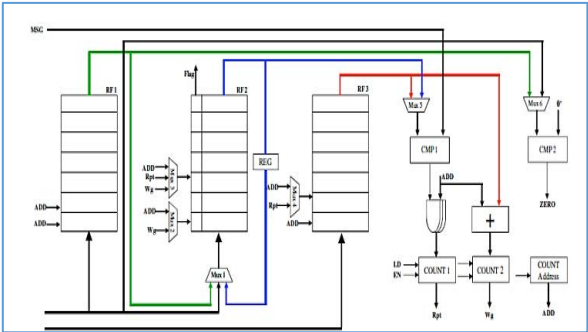


Figure 9. Hardware implementation of Cyto Crypto

Table 9 presents the resources used by CytoCrypto for different alphabet lengths. Observe how, in spite of the changes in the number of proteins, the maximum frequency for the implementation, which is an indication of how fast the processing can be done, only decreases very slightly, even for a drastic change in the alphabet length such as that from eight to 256. The amount of resources are only a small percentage of those present in the device, allowing the insertion of other systems which can interact with Cyto Crypto in the same device, providing a convenient way of adding a service.

Table 9. Physical resources required by CytoCrypto

#proteins	LUTs	Registers	Fmax(MHz)
8	208	254	244,62
16	278	384	209,03
32	381	643	216,26
64	660	1159	198,22
128	1069	2186	167,36
256	1873	4236	160,93

Figure 10 shows a comparison between combinatorial and sequential resources required for different lengths in alphabet for Cyto Crypto. It is observed how the amount of resources increases linearly with a slope of less than the unit. When the number of proteins is duplicated, the increment in the amount of resources is inferior to the double. This is particularly important for the case of LUTs, which are a very precious resource in reconfigurable hardware, since registers can be provided externally given a situation.

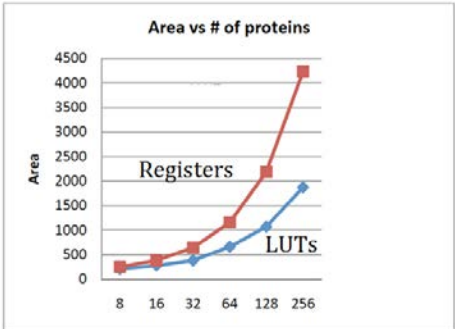


Figure 10. CytoCrypto Area for different alphabet sizes

Figure 11 presents a snapshot of the simulation of the system during the encryption process. The circles show the current letter of the input message and the corresponding produced ciphers. Figure 12 presents another snapshot in this case during the decryption process. The circles again show the input cipher and the corresponding decrypted letter.

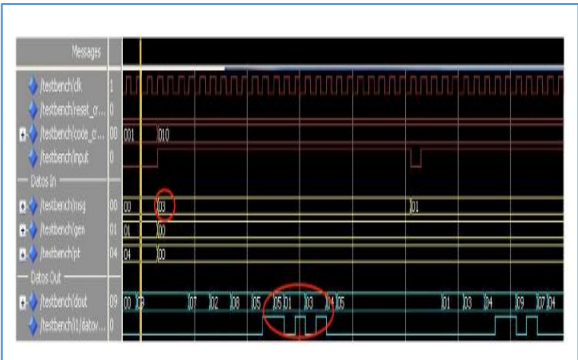


Figure 11. Simulation of CytoCrypto working on encryption

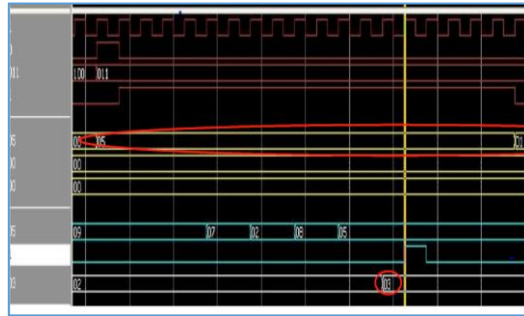


Figure 12. Simulation of CytoCrypto working on decryption

4. Tests and results

In order to determine how difficult breaking a cyto cypher could be, several tests were run. The scenario offers sets with combinations of:

- Genome length: from seven to 12 positions.
- Message length: from ten to 15 characters.
- Alphabet length: from five to seven characters.

The hacker is allowed to know this information. Moreover, he was given to know the language the message is written in. This information is not mandatory, since users are allowed to exchange information in the language they desire, however, without this knowledge; hackers were unable to detect messages ciphered by Cyto Crypto, even using alphabets with only some characters. This evidences the strength of the proposal.

Nonetheless, tests were run in order to establish a reference to provide data for comparison and parameter analysis. For each set, 10 runs, each using up to 12 machine hours were allowed for the hacker to do his attacks, using a desktop computer based on an Intel Core i7 microprocessor, running with a frequency of 2.8 GHz and an L3 Cache of 8 MB. The test consisted of trying to enter to an email account by providing a known username and guessing the password, ciphered by Cyto Crypto. After the ten runs, the one with the lowest time was chosen. Previous to show the results, let us consider how probable would be that an attacker can successfully decode a cyto cipher. Since there is no way to establish any kind of pattern to predict how substitution of translation proceeds, the only possibility is to try a brute-force approach. Hence, it is important to dimension the search space the attacker must explore. In its simplest version, Cyto Crypto manages three independent degrees of variability:

- Genome size
- Gene distribution
- Gene expression

Genome size is the total number of genes, including both coding and non-coding genes. Gene distribution has to do with how genes are initially located. Gene expression is related to what the relationship between coding genes and transcription factors is. Combining these three parameters, the number of possible scenarios the attacker must explore is calculated as **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**equation (1) shows.

$$\frac{P!}{(P-G)!} * G! * P! \quad (1)$$

Where P is the total number of genes (equal to the total number of symbols in the message alphabet) and G is the total number of coding genes.

Equation (1) has three parts, each one corresponding to one of the variability degrees. The first term calculates the possible permutations with respect to the positions coding genes can occupy in the genome, the second one is the possible orderings gene distribution can have with respect to their affinity to transcription factors, and the third one determines the number of possible associations between genes and polypeptides. For the example presented before, with $P=9$ and $G=5$, the number of possible scenarios is an astonishing 6.58×10^{11} . This value is on its own excessive and increases very fast with little increments in parameters, getting unmanageable figures even using massive computation.

For the smallest set, with $P=7$ and $G=5$, the search space is superior to 1524 million combinations. This does not consider the number of combinations that must be explored later when the candidate deciphered message is obtained, number that depends on both the length of the message and the interpretation of it as sense information, an aspect that depends on many other variables. The fact is that the search exploration is only a small value in the number of possible combinations the attack may employ and nonetheless they are astonishing even for the simplest case.

Table 10 shows the results for some sets. As seen, the time necessary for a successful attack increases exponentially and is only meaningful for very small sizes both for alphabet and genome. With values as small as nine positions and an alphabet length of five characters, the time required is near the limit time allowed. With just a very little increase in such a value (by increasing the number of positions to 12) the attack completely fails, even reducing the length of the message. A theoretical calculation for the last two rows of Table 10 gives values of seven and 19260 years respectively, certainly not to be considered in any practical attack. In a real environment, sizes for genome and alphabet will be greater, which guarantees the highest security for messages ciphered with Cyto Crypto. The fact that ciphering is performed in real time is another characteristic that drastically reduces the possibility for a successful attack.

Table 10. Tests results for Cyto Crypto attacking

Genome	Msg Len	Alpha Len	Hack Time
7	10	5	57 segs
7	15	7	2.2 hours
8	10	6	7 hours
9	15	5	11.5 hours
12	10	5	Unhacked
12	15	7	Unhacked

It is interesting to consider in more detail the behavior of Cyto Crypto, to determine what characteristics makes it so strong:

1. The strategy is highly polyalphabetic. Each time a message letter is processed, its representation on the cipher is different. In the example presented before, the message was chosen to have several letters repeated. It has two 3s and three 1s and all of them have different representations. The first 3 was ciphered as 513, whereas the second one was ciphered as 97. The three 1s were ciphered as 4, 2, and 134.
2. The strategy is also highly polysymbolic. The number of ciphers associated to a message letter is variable. In the example in question, there are six message letters, and the ciphers created for each one of them are 3, 1, 1, 2, 1, and 3 respectively. Moreover, this fact is optional and depends on the spaces left between genes. If the lengths of the message and the cipher are required to be equal, it is simply a matter of eliminating the intergenic spaces or of only expressing the first possible polypeptide.

3. Identical letters happening consecutive in the message are processed as if they were completely different. In the example presented, the last two 1s were ciphered as 2 and 134, without any evident relationship between these two strings.
4. The next position a gene will occupy is not easily deduced. It depends on the current interaction of three independent values: the input letter, the gene distribution, and the polypeptides expressed.
5. Complexity of the implementation is very low, being in general similar to that of a classical method. For a conventional transposition-based approach, complexity is $O(N*D)$, with N being the number of letters in the text message and D the average distance where to find the replacement symbol. Cyto complexity is, at worst, $O(N*(G+S))$, where N is as before, G is the number of genes, and S is the number of spaces, inactive genes, in the genome. Since $G+S$ is the total length of the genome, it follows that the complexity of Cyto is similar to the conventional transposition approach and, however, the strength of Cyto is much greater.

Suppose an attacker has access to much more machine power, for instance through a grid of computers working in parallel. Cyto crypto can be instructed to increase the complexity of the ciphering in many ways; turning unauthorized deciphering impossible in practice. Moreover, because of the astronomical number of possibilities that arises, a brute-force attack is also prohibitive. The level of sophistication that can be added is only limited by the imagination of the programmer. Following is the explanation of two suggested alternatives: multiple gene levels, and variable jumping command.

Multiple gene levels can be added through gene regulatory networks. Consider the case of two levels. Message will be now affine with regulatory genes, which will create TFs affine with structural genes. Besides of making notably difficult the work of an intruder, this alternative adds another interesting feature: the management of an internal alphabet, different from that used by TFs and polypeptides, i.e., messages and ciphers will continue using a common alphabet, but regulatory-gene-created TFs and structural genes can be defined in another alphabet, completely hidden from intruders. In this case, it is evident that, in principle, the possibility of deciphering is zero.

Variable jumping command can be built by modifying the gene expression. Instead of calculating the skip length just by using the own polypeptide, a more elaborated alternative can be easily defined, one more robust by providing variable, unpredictable lengths. Suppose one scenario where genes create not only the cipher polypeptide, but also a second polypeptide used to determine the skip length. This second polypeptide can direct length calculation by some method. As an example, consider that these skip polypeptides are created with a random value in the range 0 to 3, where this value will mean indirect addressing for obtaining the skip length. Hence, a possible coding is: 0=use the gene on the left, 1=use the gene on the right, 2=use the message letter, 3=use the polypeptide (which is the simple case explained before). Increasing the range, more coding is possible, for example, to vary not only the skip length, but also the skip direction (left or right).

5. Conclusions

- The inspiration for Cyto Crypto is taken from nature, in particular from the processes happening inside biological cells, more precisely, the way genes produce proteins and the way special kind of proteins modulate genes' activity.

- This biological inspiration makes Cyto Crypto very simple and yet very strong in the degree of difficulty it imposes for a possible attack. Attacks were only possible for tiny combinations of the parameters: alphabet size, genome size, and message size. For more conventional values, the time required for a successful attack using brute-force techniques is in the range of years, even using state-of-the-art machines.
- It was devised a method, Cyto Crypto, for ciphering and deciphering messages. The approach can work in a character-based, streaming way, allowing real-time behavior.
- Because of the degree of confusion and diffusion Cyto Crypto imposes, the cipher created is highly polyalphabetic and highly polysymbolic, making the attempt to deduce any kind of predictable pattern negligible.
- Although the degree of safety Cyto Crypto generates is extremely high, its complexity is very low, being at the level of a conventional transposition-based approach. This allows processing of large amounts of data in short times.
- Since Cyto Crypto does not required sophisticated mathematics, it can be implemented in simple machines. In fact, an implementation in reconfigurable hardware was carried out, using only a small fraction of a basic reconfigurable hardware device.

Acknowledgments

The author thanks Colciencias, the Colombia Science Foundation, for its support through his doctorate studies, from which this work emanated. He also expresses his gratitude to professors Jaime Velasco and Vladimir Trujillo for their collaboration and advice with the hardware implementation of Cyto Crypto.

References

- [1] Izmailov, I. & Poizner, B. (2016). [Cryptology Transmitted Message Protection: From Deterministic Chaos up to Optical Vortices](#). USA: Springer.
- [2] Rivest, R., Shamir, A. & Adleman, L. (1978). [A method for obtaining digital signatures and publickey cryptosystems](#). Communications of ACM 21, pp. 120-126.
- [3] ElGamal, T. (1985). [A public key cryptosystem and signature scheme based on discrete algorithms](#). IEEE Transactions on Information Theory 31, pp. 469-473.
- [4] Kerckhoff, A. (1883). [La cryptographie militaire](#). Journal des sciences militaires IX, pp. 161-191.
- [5] Coutinho, S. (1999). [The Mathematics of Ciphers: Number Theory and RSA Cryptography](#). UK: CRC Press.
- [6] Holden, J. (2016). [The Mathematics of Secrets: Cryptography from Caesar Ciphers to Digital Encryption](#). Princeton: Princeton University Press.
- [7] Parra, J. (2012). [Cyto computation: a strongly bioinspired computational framework](#). Ph.D Dissertation, Universidad del Valle.
- [8] Parra, J., Velasco, J. & Caicedo, E. (2013). [Enzyme Computation: computing the way proteins do](#). Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics 11(4), pp. 19-24.
- [9] Watson, J. & Baker, T. (2013). [Molecular Biology of the Gene](#). USA: Pearson.
- [10] Davidson, E. (2006). [The Regulatory Genome: Gene Regulatory Networks In Development And Evolution](#). New York: Academic Press.
- [11] Cook, P. & Cleland, W. (2007). [Enzyme Kinetics and Mechanism](#). London: Garland Science.
- [12] Krebs, J., Goldstein, E. & Kilpatrick, S. (2014). [Lewin's Genes XI](#). UK: Jones & Bartlett Learning.
- [13] Shannon, C. (1949). [Communication Theory of Secrecy Systems](#). Bell System Technical Journal 4(28), pp. 656-715.
- [14] Sass, R. & Schmidt, A. (2010). [Embedded Systems Design with Platform FPGAs: Principles and Practices](#). USA: Morgan Kaufmann.
- [15] Jasinski, R. (2016). [Effective Coding with VHDL: Principles and Best Practice](#). Massachusetts: MIT Press.

37. Estrategia de validación para aplicaciones móviles de salud

Leonardo Ramírez L.**Edward Guillen P.****Yuli Cifuentes S.**

Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia

1. Introducción

La movilidad que ofrecen las plataformas tecnológicas y la conectividad en tiempo real, han facilitado la creación de diversas *herramientas* que orientan con mayor eficiencia las actividades diarias de los usuarios de dispositivos móviles. Las aplicaciones móviles (Apps) hacen parte de este grupo de herramientas, que se han convertido en la forma favorita de los usuarios para conectarse desde sus dispositivos. De acuerdo con el informe Ditrendia [1], los usuarios destinan el 90% del tiempo de conexión al uso de aplicaciones móviles.

Al mercado móvil, mensualmente se lanzan aproximadamente 40.000 Apps, a través de las plataformas de distribución digital iTunes store y Google Play, que, para el 2014, tenían más de 2.5 millones de aplicaciones disponibles. Durante 2015, las categorías de Apps con mayor crecimiento fueron: personalización 332%, noticias y magazines 135%, utilidades y productividad 125%, estilo de vida y compras 81%; mientras que viajes 54%, deportes 53%, salud y fitness 52%, mensajería y redes sociales 51%, música y entretenimiento 21% se mantuvieron y los juegos presentó decrecimiento de -1% [2].

En el área de la salud, la adopción de tecnologías móviles presenta un crecimiento constante a nivel global, como resultado de dos factores: 1) el aumento de dispositivos móviles en el mercado, tales como Smartphone, tabletas y PDA, entre otros, y la variedad de modelos de negocio utilizados para su adquisición. De acuerdo con The Mobile Economy [3], en 2014 el índice de suscripciones de telefonía móvil fue de 3.6 mil millones y se pronostica un aumento a 4.6 millones para el 2020. 2) El interés de las personas por encontrar métodos eficientes que les permita administrar mejor su salud [4]. Como resultado a esta necesidad se han creado diferentes aplicaciones móviles de salud o mHealth Apps, que son software que se ejecutan en teléfonos inteligentes o en otros dispositivos de comunicación móvil y que, generalmente, se distribuyen en plataformas digitales o las generan personas u organizaciones mediante Ingeniería del Software [5].

The Food and Drug Administration [6] define las aplicaciones móviles de salud como: ... un software que se puede ejecutar en una plataforma móvil, o un software basado en web que necesita para su funcionamiento una aplicación que se adapte a una plataforma móvil y que se ejecute en un servidor, para posteriormente ser utilizado como dispositivo médico.

Las aplicaciones móviles presentan potenciales beneficios, entre los que se encuentran: 1) mejorar la calidad de los servicios con mayor demanda, tales como los servicios de educación y programas de sensibilización, la recolección remota de datos, el monitoreo remoto, la comunicación y formación para profesionales de la salud y el soporte de diagnóstico y tratamiento [7]; 2) contribuir minimizar errores médicos a través de algoritmos clínicos; y 3) disminuir costos al evitar consultas médicas innecesarias [5]. Algunas investigaciones emergentes determinaron que, las Apps instaladas en dispositivos móviles, han aumentado la productividad y el acceso a la información clínica en las entidades de salud [8, 9].

El informe mHealth App Developer Economics [10] estableció que, en 2015, existieron 160.000 aplicaciones de salud, de las cuales 103.000 se publicaron en múltiples plataformas. Se estima que el 3% de las Apps publicadas se encuentra disponible en Google Play, iTunes y Microsoft Phone, en la categoría de *fitness* y salud. El mercado a nivel mundial tiene la siguiente distribución: 30% Asia, 30% Europa, 22% EEUU y Canadá, 7% Latinoamérica y 5% África [11], y los índices de descargas van en aumento. Para el periodo 2013-2014, el aumento fue de 36% y entre 2014 y 2015 de 35%. Esto representó pasar de 1.7 billones de descargas a 2.3 billones entre 2013 y 2014, y de 2.3 a 3.0 billones entre 2014 y 2015 [10]. Las áreas terapéuticas que tuvieron mayor participación fueron: Diabetes 65%, Obesidad 39%, Hipertensión 29%, Depresión 22% y Cáncer 19% [13].

A nivel latinoamericano el mercado de las Apps tiene un fuerte impulso de crecimiento a causa de la penetración del 37% que tiene los Smartphone con sistema operativo Android. La preferencia por este sistema es del 45%, donde Argentina tiene 63%, Chile 63% y México 62%. Por otra parte, iOS toma fuerza en Chile 25%, Colombia 23% y Ecuador 20% [11]. Los pronósticos realizados por PwC [14] valoran que, para el 2017, en Latinoamérica las categorías de servicio que tendrán mayor crecimiento son: Monitoreo 60%, tratamiento 15%, diagnóstico 11%, apoyo a profesionales de la salud 6%, bienestar 3%, apoyo en la vigilancia de salud 2%, prevención 2% y administración 1%.

Aunque los indicadores de descarga y la cantidad de aplicaciones de salud han aumentado en el transcurso del tiempo, los profesionales de la salud y los usuarios todavía tienen desconfianza y dudas sobre la fiabilidad de los datos generados. Estas limitaciones han llevado a que algunas compañías desarrolladoras de software para Apps, integren personal médico en sus equipos de trabajo. Para el 2015 se reportó que el 51% de equipos desarrolladores de Apps contaban con profesionales de la salud, el 45% con la ayuda con un profesional de la salud y que el 3% no trabajan con personal médico [10]. La estrategia de inclusión de personal médico ha funcionado, pero no ha sido suficiente porque todavía existe poco conocimiento sobre la eficacia, idoneidad y riesgos asociados a la utilización de Apps en la práctica clínica. Algunos organismos de salud recomiendan realizar una valoración previa de las Apps antes de su utilización, evaluando algunos requisitos necesarios que proporcionen seguridad al paciente y profesional sanitario [11].

A causa de las anteriores premisas, los investigadores del grupo TIGUM-GISSIC han planteado una estrategia de validación que les permitirá a los usuarios y profesionales de la salud identificar falencias a nivel técnico y clínico de las aplicaciones móviles. Inicialmente, este trabajo describe algunos atributos técnicos y clínicos evaluables y, posteriormente, se implementa la estrategia en tres aplicaciones móviles. Los resultados indican que existen deficiencias asociadas al diseño de la aplicación, el dispositivo utilizado, la plataforma de desarrollo y la fiabilidad de los datos registrados, entre otros.

2. Materiales y Método

El proceso utilizado en la creación de la estrategia de validación para aplicaciones móviles de salud, inicia con un análisis de las características técnicas de la aplicación y de los requerimientos clínicos necesarios para su funcionamiento, lo que permitirá establecer los criterios de validación que certifican el desempeño de la App. Luego se evalúan los criterios establecidos a través de diferentes pruebas, a las que se someten las aplicaciones móviles de salud y, finalmente, se genera un reporte con los resultados obtenidos de las pruebas. Estos resultados facilitarán la toma de decisiones por parte del usuario y del profesional médico, acerca de la calidad que tiene la mHealth App.

2.1 Análisis de los atributos de calidad en aplicaciones móviles

Las características específicas que tiene cada una de las aplicaciones móviles se asocian a los requerimientos necesarios para la prestación eficaz de los servicios para los cuales fue diseñada. Esto hace necesario validar los siguientes atributos técnicos que determinan la calidad de una App: rendimiento, estructura de la Interfaz gráfica, usabilidad, robustez, seguridad de la información, soporte técnico y optimización de los recursos.

1. *Rendimiento*. Se define como la rapidez y eficacia que tiene una aplicación móvil para desarrollar una tarea en condiciones de trabajo [15], su valoración les proporcionará a los usuarios finales una experiencia de calidad. Las pruebas de rendimiento se utilizan frecuentemente para validar y verificar los atributos de calidad de la Apps, las cuales se componen de dos evaluaciones: prueba de carga y prueba de estrés. La de carga se utiliza básicamente para observar el comportamiento que tiene la aplicación bajo una cantidad de peticiones, y permite conocer los tiempos de respuesta en las transacciones más importantes para la aplicación [15]. La prueba de estrés evalúa la solidez de la aplicación en caso de un uso extremo, mediante el desarrollo de acciones con menores tiempos de respuesta [15]. Para el caso de una App, los niveles de rendimiento se asocian con la capacidad para funcionar adecuadamente, en términos de uso de memoria durante la ejecución en el dispositivo móvil, debido a que estos dispositivos, por lo general, tienen menos memoria que los convencionales [16].
2. *Interfaz Gráfica de Usuario*. Es el medio que permite la interacción entre el usuario y la aplicación móvil. La arquitectura de la GUI se caracteriza por ser de fácil comprensión y por la sencillez para ser accionada [17]; la percepción y evaluación que pueda tener el usuario final con respecto a ella se ha convertido en un factor determinante en el proceso de evaluación de la calidad de la aplicación [18]. En la mayoría de las aplicaciones móviles, la GUI se pueden someter a pruebas de validación para determinar no solamente el cumplimiento de los requisitos del usuario, sino también el cumplimiento de las *características deseables*, que determinarán el buen desarrollo y funcionamiento de la misma [19]. Dentro de las características o cualidades anatómicas deseables en una interfaz gráfica se encuentran: ayuda, robustez, funcionalidad, efectividad, consistencia, portabilidad, estética y vocabulario.

Investigadores y desarrolladores de software han propuesto algunos métodos para evaluar las interfaces de usuario, utilizando el método Lógic Scoring of Preference (LPS). Este método multi-criterio es útil para analizar, comparar y seleccionar la mejor opción de un conjunto finito de alternativas [20], a través de las siguientes etapas: 1) Elaboración de un árbol de criterios, 2) Descripción de funciones de criterios elementales y 3) Desarrollo de una estructura de agregación [21]. La elaboración del árbol de criterios corresponde a la primera aproximación en la evaluación de una GUI y representa todas las características deseables del elemento a evaluar, mediante una lista que contiene una distribución jerárquica de cada una de las características, como se visualiza en la Tabla 1. Posteriormente, se definen los criterios elementales, asignando un valor para cada atributo en el intervalo de 0 a 100 puntos. Los criterios multi-variables se califican con la siguiente escala: no-satisfacción (0 a 30 puntos), neutro (40 a 60) y satisfacción (70 a 100). Finalmente, la estructura de agregación establece la preferencia global que representa la satisfacción total del elemento evaluado, con respecto a todos los atributos definidos previamente [21].

Tabla 1. Árbol de criterios [21]

Atributo	Árbol de criterios
Características de ayuda	Existencia de ayuda (Help) Existencia de ayuda On Line Existencia de un Asistente
Funcionalidad	Multitarea (varias tareas la vez) Atajos (posibilidad de usar atajos) Respuesta ante sobrecarga Actualizaciones
Efectividad	Facilidad para buscar tareas
Consistencia	Cada elemento siempre representa lo mismo Cada elemento es representativo del dominio que representa Cada imagen se asocia a palabras claves del proceso Los mensajes siempre se muestran iguales
Flexibilidad	Elección de idioma Configuración personalizada
Estética	Fuente: legibilidad en tipo y tamaño Colores: Combinación armoniosa
Organización	Cantidad de opciones del menú principal Promedio de cantidad de opciones por cada opción del menú principal
Vocabulario	Utiliza diferentes términos técnicos, sofisticados y desconocidos

3. *Usabilidad.* La usabilidad es un concepto que se relaciona con la facilidad que tiene una aplicación para ser utilizada en pro a un objetivo específico [22]. Generalmente, este concepto se relaciona con los atributos de la aplicación o sistema y su contexto. La evaluación de usabilidad en una aplicación móvil es una tarea compleja, debido a que sus niveles no pueden ser tomados de manera directa, a causa de los diferentes factores subjetivos que influyen en su determinación, como es el caso de la experiencia del usuario. Causas que han llevado a los investigadores a medir la usabilidad a través de atributos como efectividad, eficiencia, satisfacción, facilidad de aprendizaje, memorabilidad, errores, contenido, accesibilidad, seguridad, portabilidad y contexto, como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Métricas para evaluar la usabilidad de una aplicación móvil [22]

Atributo	Métricas
Efectividad	Tareas resueltas en un tiempo limitado Porcentaje de tareas completadas con éxito al primer intento Número de funciones aprendidas
Eficiencia	Tiempo empleado en completar una tarea Número de teclas presionadas por tarea Tiempo transcurrido en cada pantalla Eficiencia relativa en comparación con un usuario experto Tiempo productivo
Satisfacción	Nivel de dificultad Agrada o no agrada Preferencias
Facilidad de aprendizaje	Tiempo usado para terminar una tarea la primera vez Cantidad de entrenamiento Curva de aprendizaje
Memorabilidad	Número de pasos, <i>clicks</i> o páginas usadas para terminar una tarea
Errores	Número de errores
Contenido	Cantidad de palabras por página Cantidad total de imágenes Número de páginas
Accesibilidad	Tamaño de letra ajustable Cantidad de imágenes con texto alternativo

El método Metrics for Usability Standards in Computing (MUSIC), se presenta como un medio válido y fiable para la especificación y medición de la usabilidad de una aplicación móvil [23]. Su uso principal se relaciona con la formación de un proceso de desarrollo en prototipos y en el mejoramiento iterativo. La calificación se puede designar de acuerdo con métricas objetivas y subjetivas. Para el caso de esta investigación se tomará la siguiente escala de calificación: no-cumplimiento 0 a 30 puntos, cumplimiento normal 40 a 60 y cumplimiento satisfactorio 70 a 100.

4. **Robustez.** La robustez es una característica que define la capacidad que tiene una aplicación para funcionar, correctamente, en presencia de entradas no-válidas o condiciones ambientales estresantes producidas por un error en uno de los aspectos de la misma [24]. Las pruebas de robustez que se han desarrollado durante los últimos años y que se presentan en la Tabla 3, verifican la capacidad que tiene el sistema, aplicación y API al ser *bombardado* con este tipo de entradas. En los casos en que las Apps no presentan fallos, ni se saturan con la gran cantidad de información emitida, se consideran robustas [25].

Tabla 3. Pruebas de robustez de software, aplicación y API [25]

Prueba técnica	Año	Evaluación de aplicabilidad
Introducción de errores	Década 1990	En dominios específicos para sistemas de seguridad crítica
Entradas al azar	Mediados 1990	Todavía es útil para software estándar
Entrada Inválida	Finales 1990	Es utilizado para un tipo de pruebas específicas
Pruebas específicas	Alrededor 2000	Técnica efectiva, que se utiliza junto con la mutación
Enfoque OO	Principio 2000	Extensión de pruebas específicas para lenguaje OO
Técnicas de mutación	Principio 2000	Complementa eficazmente diferentes técnicas de pruebas específicas

5. **Seguridad de la información.** La seguridad es un conjunto de medidas preventivas y reactivas utilizadas para preservar la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información [26]. Para los usuarios de aplicaciones móviles para la salud, el concepto de seguridad tiene un efecto significativo con privacidad, porque se puede afectar si la aplicación mHealth no cuenta con medidas preventivas que bloqueen posibles ataques o si presenta vulnerabilidades en su estructura. Para 2014, el centro de recursos de robo de identidad –ITRC– realizó un estudio [27] para determinar los índices de violación de confidencialidad en aplicaciones móviles en diferentes categorías. Este estudio concluyó que, para la categoría salud, existieron 333 incidentes de violación a la información, de los usuarios de 8.277.991 registros analizados. Las pruebas de seguridad en aplicaciones móviles se rigen por la norma introducida por Mobile Security Project (OWASP) [28], que define posibles factores de riesgos y establece controles para minimizar su impacto. En la Figura 1 se presenta los riesgos de OWASP y las vulnerabilidades a las que se asocian [29].

Para testear los niveles de seguridad en las aplicaciones móviles es necesario ejecutar los siguientes pasos:

1. **Recopilación de la información:** Determina el alcance que tiene la aplicación.
2. **Análisis estático:** Se verifica el código fuente de la aplicación y se identifican fallos de seguridad en su programación.
3. **Análisis dinámico:** se basa en la ejecución de la aplicación, en un dispositivo o en un simulador/emulador, para verificar la interacción con los servicios remotos, con los que se comunica la aplicación [15].

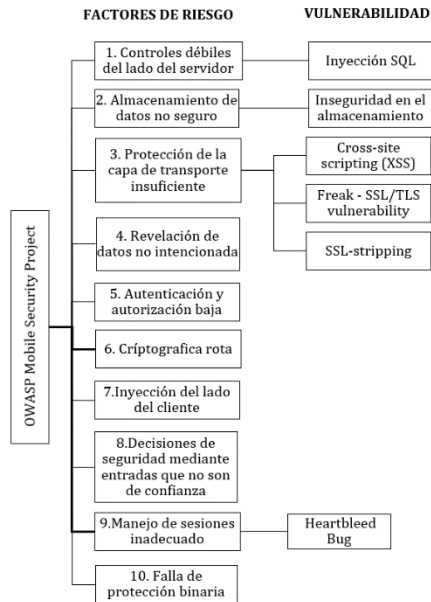


Figura 1. Factores de riesgo y vulnerabilidades detectadas en aplicaciones móviles [29]

6. *Soporte técnico.* El soporte técnico es un rango de servicio, en el que se proporciona asistencia técnica por parte de los desarrolladores de la aplicación en caso de presentar problemas con su uso [22]. Este tipo de servicio puede ser prestado en algunas aplicaciones, dependiendo principalmente de su tipo: 1) nativa, generalmente está preinstalada en el dispositivo móvil y solamente se puede ejecutar en la plataforma en la fue desarrollada para aprovechar todas las características del sistema operativo; 3) web, un programa que almacena la información de manera remota y utiliza múltiples plataformas que no se instalan localmente; y 3) híbridas, combina las características de las nativas y las web [31].

El soporte técnico puede ser evaluado mediante criterios subjetivos proporcionados por el usuario, teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones para la App: 1) dispone de un sistema de ayuda sobre su manejo, 2) proporciona un mecanismo de contacto para asistencia técnica y soporte, garantizando un tiempo de respuesta determinado al usuario [11].

7. *Optimización de los recursos.* Los dispositivos móviles tienen recursos limitados que, al no ser utilizados adecuadamente, pueden disminuir su rendimiento y generar una experiencia de usuario negativa. Esto ha llevado a los expertos a evaluar el consumo de recursos generado por el uso las aplicaciones móviles, mediante el análisis de índices de uso en almacenamiento, índices de uso memoria caché, permisos solicitados para su funcionamiento de la App, % de batería consumida y cantidad de datos consumidos por la App.

8. *Análisis de parámetros clínicos.* La magnitud de aplicaciones móviles para salud, que les ofrecen a los usuarios oportunidades sin precedentes para mejorar sus condiciones de salud y a su vez dar cumplimiento a los objetivos sanitarios de las entidades, han generado preocupación en los profesionales de la salud, en relación con la idoneidad y riesgos asociados a su uso. Algunos investigadores consideran que existe muy poca investigación que valide la eficacia de estas aplicaciones en los contextos de salud y sanidad [32]. Aunque organizaciones como la Comisión Europea han descrito pautas para evaluar los criterios de efectividad y seguridad de

los datos a través de la ejecución de una evaluación clínica para las Apps, algunos desarrolladores todavía no las ponen en práctica.

9. *Evaluación clínica.* La evaluación clínica es un procedimiento que permite evaluar y analizar los datos clínicos tomados por un dispositivo médico, para asegurar la fiabilidad clínica de los datos y el rendimiento del dispositivo y/o de la aplicación [33]. El procedimiento utilizado es:

1. Definir el alcance: En esta etapa se determina el cálculo, el algoritmo o el valor que se debe avalar clínicamente.
2. Identificar los datos clínicos: Consiste en localizar los datos relevantes para el dispositivo y su uso, mediante búsquedas bibliográficas, experiencia de uso de la App o productos sanitarios equivalentes y/o de ensayo clínico.
3. Evaluar datos y concluir: Examinar la idoneidad de los datos en comparación con una medida patrón y concluir sobre la contribución con la seguridad clínica y el rendimiento del dispositivo.

3. Diseño de estrategias de validación para aplicaciones mHealth

3.1 Descripción

La estrategia de validación propuesta en este trabajo se presenta en la Figura 2, y hace referencia a un conjunto de acciones que permiten validar los atributos técnicos y parámetros clínicos que debe tener una aplicación de salud, para generar un valor agregado en el mercado de las Apps. Inicialmente, se analiza los atributos de calidad más relevantes en una aplicación móvil, mediante algunos métodos planteados por diferentes autores y por software de evaluación, como se observa en la Tabla 4. Luego se evalúan los parámetros clínicos, mediante la toma de registros que se comparan con un patrón de medida, adquirido con un dispositivo clínico.



Figura 2. Estrategia de validación para aplicaciones de salud mHealth Apps

3.2 Implementación

En el proceso de implementación se utilizaron tres aplicaciones móviles utilizadas para monitorear la frecuencia cardíaca del usuario. La primera es un desarrollo del grupo de investigación TIGUM-UMNG que emplea un dispositivo externo (banda de frecuencia cardíaca) para la toma de los datos; las otras dos son Apps descargadas de las plataformas iTunes y Google Play de la categoría de medicina, que solamente utilizan los sensores del dispositivo para la toma de datos.

Tabla 4. Descripción de métodos para analizar los atributos técnicos de calidad y parámetros clínicos de apps de salud

Propiedad	Método	Resultado
Rendimiento	Pruebas de rendimiento	Memoria RAM utilizada Porcentaje de frecuencia del CPU Tipo de acción
Interfaz Gráfica	Árbol de criterios Evaluación de criterios elementales	Evaluación de criterios elementales
Usabilidad	Observación	Calificación de efectividad, eficiencia, satisfacción, facilidad de aprendizaje, memorabilidad, errores, contenido, accesibilidad.
Seguridad de la Información	Análisis de APK con OWASP	Número de problemas de seguridad Tipo de problemas de seguridad OWASP top 10.
Soporte Técnico	Observación de criterios de soporte	Definición de medio utilizado para prestar el servicio
Optimización de recursos	Verificación de uso de recursos	Índices de uso en almacenamiento Índices de uso memoria caché Permisos solicitados para su funcionamiento % de batería consumida Uso de datos
Parámetros clínicos	Comparación de datos con medida patrón	Desviación estándar de la medida Porcentaje de error

4. Resultados

4.1 Evaluación de rendimiento

Se verificó la cantidad de memoria utilizada durante la ejecución de cada una de las aplicaciones durante un minuto, el porcentaje de la frecuencia del CPU y el tipo de acción en las que se ejecutaron (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados de pruebas de rendimiento

	Rendimiento		
	TIGUM-UMNG	Doogle play	iTunes
Memoria	17.3Mb	42.6 Mb	79.4 Mb
% frecuencia CPU	0.7%	26.6%	55.9%
Tipo de acción	Primer plano	Primer plano	Primer plano

Los resultados indican que la aplicación que consume mayor cantidad de memoria es la aplicación iTunes, la cual se analizó durante su acción en primer plano, es decir, cuando se utiliza directamente la aplicación. Se puede inferir que este resultado se debe a las propiedades de plataforma iOS, que permite ejecutar diversas tareas simultánea y rápidamente. Se considera que a futuro esta acción puede generar fallas en el rendimiento del dispositivo.

4.2 Evaluación de interfaz gráfica de usuario

En esta evaluación se comparó, en las tres aplicaciones, los criterios deseables de una GUI, tal como se observa en la Tabla 6. Los resultados determinaron que la aplicación desarrollada en la plataforma iOS y descargada de iTunes, tiene una mejor interfaz gráfica, en lo referente a los criterios de diseño y estética. Este resultado se debe a que cada Apps de esta tienda tiene una lógica de interacción y estilo fuertemente influenciados por el sistema operativo y por su enfoque a la experiencia de usuario. Además, se encontró que

las tres aplicaciones no cumplen adecuadamente con el criterio de funcionalidad y consistencia, debido a la falta de enlaces para acceder a las funciones de la App. Con respecto al segundo criterio, las gráficas de frecuencia cardíaca que se presentan en las tres aplicaciones no corresponden a una gráfica de ECG, por lo que se considera que este elemento no es representativo con el mundo real.

Tabla 6. Resultados de prueba de Interfaz Gráfica de usuario

Árbol de criterios		Evaluación de criterios		
		TIGUM - UMNG	Google Play	iTunes
Características de ayuda	Existe asistente de ayuda	0	100	100
	Actualizaciones	0	100	100
Funcionalidad	Multitareas	50	80	100
	Atajos	0	0	0
Efectividad	Facilidad para buscar tareas	100	100	100
Consistencia	Los mensajes siempre se muestran en el mismo formato	100	100	100
	Elemento representan mundo real	0	0	0
Flexibilidad	Elección del idioma	0	0	100
	Configuración personalizada	100	100	100
Estética	Fuente: legibilidad en tipo y tamaño	50	100	100
	Colores: Combinación armoniosa	30	80	100
Organización	Utiliza diferentes opciones de menú	100	100	100
Vocabulario	Utiliza diferentes términos técnicos	0	100	100
Totales		530	960	1100

0-40: Calificación de no-cumplimiento. 41-70: Calificación normal. 71-100: Calificación satisfactoria

4.3 Evaluación de usabilidad

La evaluación de usabilidad de una aplicación móvil está fuertemente influenciada por el contexto en que se utiliza y, para el caso de esta investigación, los resultados, que se presentan en la Tabla 7, indican que la App de iTunes tiene mejor calificación. Esta calificación es subjetiva debido a que asocia tanto las interacciones directas del usuario con la aplicación, como el contexto externo que percibe durante su interacción [34]. La métrica de memorabilidad para las aplicaciones no cumple con el estándar, debido a que las tres utilizan muchos pasos para terminar un registro del usuario, después de no usar la aplicación por un periodo de tiempo.

Tabla 7. Resultados de prueba de usabilidad de la aplicación móvil

Atributo	TIGUM-UMNG	Google Play	iTunes
Efectividad	20	50	80
Eficiencia	50	70	50
Satisfacción	50	80	50
Facilidad de aprendizaje	100	100	100
Memorabilidad	30	30	20
Errores	50	50	70
Contenido	50	80	80
Accesibilidad	50	100	100
Totales	400	560	550

4.4 Evaluación de seguridad de la información

Este análisis se ejecutó a través de una aplicación software de la compañía IBM, que permitió identificar las vulnerabilidades que presentan las aplicaciones móviles en su código APK, con respecto al modelo OWASP. Los resultados, presentados en la Tabla 8, determinan que la aplicación Google Play presenta un alto índice de vulnerabilidades de seguridad, los cuales se pueden asociar a la cantidad de permisos solicitados para su instalación y funcionamiento. Dentro de las vulnerabilidades encontradas están: falta de fijación de certificados, usurpación mediante MiTM y generador de números aleatorios

débiles. Estas vulnerabilidades pueden comprometer la integridad, disponibilidad y confidencialidad de la información registrada por los usuarios.

Es importante resaltar que las aplicaciones solamente pueden ser seguras si la plataforma en la que fue construida proporciona los niveles de seguridad apropiados, tal como se puede apreciar en los resultados de la Tabla 8, donde la aplicación iTunes tiene menos problemas de seguridad, debido a que la plataforma evalúa las aplicaciones móviles en su totalidad antes de ponerlas a disposición de los clientes.

Tabla 8. Resultado de la evaluación seguridad de la información

Problemas	TIGUM-UMNG 1	Google Play 21	iTunes 1
Tipo de problemas	Distintivo de copia de seguridad habilitado	Fábrica de sockets TLS/SSL no segura (1) Generador de números aleatorios débiles (3) Filtración de información (3) Usurpación mediante MiTM (1) Falta de fijación de certificados (10) Apropiación de actividad (1) Distintivo de copia de seguridad habilitado (1) Uso de Mixed Content Mode no seguro	Distintivo de copia de seguridad habilitado
OWASP top 10.	Controles débiles del lado del servidor	Protección de la capa de transporte insuficiente Revelación de datos no intencionada Criptografía rota Decisiones de seguridad mediante entradas que no son de confianza	Controles débiles del lado del servidor

4.5 Evaluación de soporte técnico

Con respecto a la valoración del soporte técnico, es importante resaltar que las aplicaciones descargadas de las plataformas Google Play y iTunes, cuentan con la opción de soporte técnico en caso de que el usuario lo requiera. Este soporte, por lo general, es prestado por el desarrollador de la App o por la plataforma de distribución, a través de diferentes medios, tal como se puede observar en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados de evaluación de soporte técnico

	TIGUM-UMNG	Google Play	iTunes
Cuenta con un soporte técnico	No	Si	Si
Medio por el cual se presta el soporte técnico	N/A	Aplicación <i>feedback</i>	Correo electrónico
Incluye guías sobre su funcionamiento	No	Si	Si
Cuenta con un sitio web con información complementaria	No	Si	Si

4.6 Evaluación de Optimización de Recursos

El consumo de recursos del dispositivo móvil genera diferentes inconvenientes en el rendimiento del equipo. El ítem evaluado en las tres aplicaciones arrojó como resultado (Tabla 10) que la aplicación iTunes utiliza más bytes para el almacenamiento que las otras dos, lo que genera que el consumo de batería sea mayor.

Tabla 10. Resultados de evaluación de optimización de recursos

	TIGUM - UMNG	Google Play	iTunes
Índices de uso en almacenamiento	1.13 Mb	23.38 Mb	43.7 Mb
Índices de uso memoria caché	36 Kb	72 Kb	1.2 Mb
Permisos para su funcionamiento	Configuración bluetooth Controlar la vibración	Tomar fotos y grabar videos Leer contenido de tarjeta SD Buscar cuentas en el dispositivo Acceso completo a la red Controlar la vibración	Cámara Ubicación Notificaciones
% de batería consumida	0.1%	0.1%	1%
Uso de datos	N/A	566 Kb	111Kb

4.7 Evaluación clínica

Los resultados de la evaluación clínica y su análisis, tienen mayor relevancia en la relación beneficio-riesgo. En la cual se identifican y valoran las situaciones de riesgo que pueden comprometer el estado clínico o la seguridad del usuario, con el uso de aplicación móvil. Los resultados arrojados en la evaluación clínica aplicada a las tres aplicaciones, presentados en la Tabla 11, señalan una falencia con respecto al alcance que tienen las tres aplicaciones evaluadas. Ya que no existe una delimitación explícita y objetiva del público para el cual están dirigidas, hecho que puede generar variaciones en las métricas y cálculos registrados. Es importante resaltar que solamente la aplicación iTunes informa de manera explícita que su uso no sustituye la relación médico-paciente.

Tabla 11. Evaluación clínica de apps

	TIGUM-UMNG	Google Play	iTunes
Alcance	Registro pulso cardíaco Historial registros	Registro pulso cardíaco Historial registros Notificaciones	Registro pulso cardíaco Historial datos Análisis estadístico de rutinas Gráficas estadísticas 7 y 30 días
Identificación datos clínicos	Pulsaciones por minuto	Pulsaciones por minuto	Pulsaciones por minuto

Con respecto al proceso de evaluación del conjunto de datos obtenido por las aplicaciones (Tabla 12), se presentó un porcentaje de error de $\pm 3\%$ en comparación con el registro tomado por el elemento patrón. Este error se puede asociar a diferentes factores: 1) calidad del sensor del dispositivo, que, posiblemente, no está diseñado con los materiales adecuados para tomas de registros clínicos. 2) El tiempo de retardo en la conexión entre el dispositivo móvil y los accesorios digitales corporales (Wearables), como es el caso de la banda de frecuencia cardíaca utilizada en la aplicación TIGUM-UMNG. 3) Errores del usuario durante el registro de datos, por falta de información sobre las funciones que cumple la aplicación y las condiciones para obtener resultados óptimos.

Tabla 12. Registro de pulsaciones por minuto

Tiempo	Patrón	TIGUM-UMNG	Patrón	Google Play	Patrón	iTunes
1 min	78	77	68	69	61	52
2 min	66	64	65	63	61	63
3 min	66	67	72	68	60	62
4 min	69	67	75	72	63	65
5 min	75	70	70	71	66	65
6 min	70	69	70	69	61	61
7 min	69	69	72	72	63	63
8 min	76	75	73	72	64	62
9 min	87	86	71	74	62	64
10 min	72	66	91	88	65	65
Promedio	72.8	71	72.7	71.8	62.6	62.2
Desviación estándar	6.4	6.6	7.0	6.5	2.0	3.9
% de error		2.8		2.6		3.2

El Patrón de medida fue tomado con un pulsioxímetro clínico

% de error: ((registro de app-registro patrón) / registro patrón) * 100

5. Conclusiones

La adopción de Tecnologías de Información y Comunicación en el área de la salud ha revolucionado los modelos de atención sanitaria, mediante la implementación de herramientas tecnológicas instaladas en dispositivos móviles. Las aplicaciones móviles de salud o mHealth Apps tienen amplia penetración en el mercado mundial y una rápida aceptación por parte de pacientes y profesionales de la salud.

Actualmente, este tipo de aplicaciones no cuentan con medidas de control regulatorias que garanticen la calidad técnica y clínica de los datos obtenidos, porque en algunas ocasiones los *markets* solamente les solicitan a los desarrolladores cumplir con algunos estándares básicos en la programación y descuidan aspectos importantes que pueden provocar riesgos para salud de los usuarios.

La estrategia de validación propuesta en esta investigación, e implementada en tres aplicaciones móviles, permitió establecer los criterios mínimos de calidad y seguridad que deben tener las Apps de salud, a través de un análisis detallado del conjunto de atributos técnicos y parámetros clínicos establecidos por las diferentes entidades regulatorias.

Los resultados obtenidos indican que, las aplicaciones móviles disponibles en plataformas de distribución comercial, presentan falencias con respecto a algunos atributos técnicos, tales como seguridad, rendimiento, usabilidad y con parámetros clínicos. Motivos que llevan a los investigadores a recomendar la inclusión, en los equipos de desarrollo, de personal médico que pueda validar la aplicación antes de lanzarla a una plataforma de distribución. Para las aplicaciones que están en marcha se sugiere a los usuarios validarlas antes de utilizarlas, mediante la estrategia de validación propuesta en este trabajo, la cual garantizara la calidad, la fiabilidad y la seguridad de la información que se gestiona a través de la App de salud.

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo fue posible gracias al apoyo financiero proporcionado por la Universidad Militar Nueva Granada, mediante el proyecto INV-ING-2108 “Validación de clínica de aplicaciones para el autocuidado de la salud.”

Referencias

- [1] Ditrendia (2015). [Informe Ditrendia: Mobile en España y en el Mundo 2015](#). España: Ditrendia Digital Marketing Trends.
- [2] Statista (2015). [Year-on-year growth in time spent per mobile app category in 2015](#). Online [Jun 2016].
- [3] GSM (2016). [The Mobile Economy 2016](#). Online [Jun 2016].
- [4] Cho, J. (2016). [The impact of post-adoption beliefs on the continued use of health apps](#). International Journal of Medical Informatics 87, pp.75-83.
- [5] Santamaria, G., & Hernández, E. (2015). [Aplicaciones Médicas Móviles definiciones, beneficios y riesgos](#). Revista Científica Salud Uninorte 31(3), pp. 599-607.
- [6] CDRH-CBER (2015). [Mobile medical applications: guidance for industry and Food and Drug Administration staff](#). USA: Center for Devices and Radiological Health & Center for Biologics Evaluation and Research.
- [7] Vital Wave Consulting (2009). [mHealth for development: the opportunity of mobile technology for healthcare in the developing world](#). UK: Vodafone.
- [8] Goldbach, H. et al. (2014). [Evaluation of generic medical information accessed via mobile phones at the point of care in resource-limited settings](#). Journal of the American Medical Informatics Association 21(1), pp. 37-42.
- [9] Patel, B. et al. (2012). [Impact of mobile tablet computers on internal medicine resident efficiency](#). JAMA Internal Medicine 172(5), pp.436-438.
- [10] Research2guidance's (2015). [mHealth App Developer Economics 2015](#). Online [Jun 2016].
- [11] Mugarza, F. (2014). [Informe apps salud en español, 1 Informe de las mejores 50 apps de salud en español](#). The App Intelligence 2014, pp. 4-8.
- [12] Santillán, A. & Martínez, J. (2015). [Apps de salud: nuevas herramientas para el cuidado del paciente cardiológico](#). Enfermería en Cardiología 22(66), pp. 28-34.
- [13] Statista (2014). [Five-year forecast for mobile health market opportunities as of 2014, by therapeutic area](#). Online [Jun 2016].
- [14] Vishwanath, S. et al. (2012). [Touching lives through mobile health Assessment of the global market opportunity](#). India: PwCPL.
- [15] Díaz, S. (2013). [Mejores prácticas en las pruebas de aplicaciones móviles](#). España: ATSistemas.

- [16] Cruz, R., Alemán, J. & Álvarez, J. (2013). [Desarrollo de aplicaciones de salud para plataformas móviles: Un mercado emergente](#). *RevistaeSalud.com* 9(35), pp. 1-8.
- [17] Catalán, M. (2000). [Metodologías de evaluación de interfaces gráficas de usuario](#). E-LIS repository.
- [18] Shneiderman, B. & Plaisant, C. (2005). [Designing the User Interface](#). Boston: Pearson.
- [19] Albornoz, M., Berón, M. & Montejano, G. (2015). [Evaluación de interfaces gráfica de usuario](#). En XVII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación. Salta, Argentina.
- [20] Dujmovi'c, J. (1996). [A method for evaluation and selection of complex hardware and software systems](#). In Proceedings of the 22nd International Conference for the Resource Management and Performance Evaluation of Enterprise Computing Systems (pp. 368-378).
- [21] Albornoz, M., Miranda, E. & Berón, M. (2013). [Evaluación de Interfaces Gráficas de Usuario Usando LSP](#). En I Congreso Nacional de Ingeniería Informática / Sistemas de Información. Córdoba, Argentina.
- [22] Enríquez, J. & Casas, S. (2014). [Usabilidad en aplicaciones móviles](#). *Informes Científicos-Técnicos UNPA* 5(2), pp. 25-47.
- [23] Macleod, M. et al. (1997). [The MUSIC Performance Measurement Method](#). *Behaviour and Information Technology* 16 (4,5), pp. 279-293.
- [24] ISO (2010). [IEC/IEEE 24765: 2010 systems and software engineering-vocabulary](#). Technical report, IEEE.
- [25] Micskei, Z. et al. (2012). [Robustness Testing Techniques and Tools](#). In Wolter, K. et al. (Eds.), *Resilience Assessment and Evaluation of Computing Systems* (pp. 323-339). Berlin: Springer.
- [26] Disterer, G. (2013). [ISO/IEC 27000, 27001 and 27002 for information security management](#). *Journal of Information Security* 4(2), pp. 92-100.
- [27] ITRC (2015). [Identity Theft Resource Center Breach Report Hits Record High in 2014](#). Identity Theft Resource Center. Online [May 2016].
- [28] OWASP (2016). [Mobile Security Project Top 10 Mobile Risks](#). OWASP Mobile Security Project. Online [Jun 2016].
- [29] Cifuentes, Y., Beltrán, L. & Ramírez, L. (2015). [Analysis of Security Vulnerabilities for Mobile Health Applications'](#). *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering* 9(9), 999-1004.
- [30] Windley, P. (2001). [Delivering high availability services using a multi-tiered support model](#). *Windley's Technometria*. Online [Jun 2016].
- [31] Cuello, J. & Vittone, J. (2013). [Diseñando apps para móviles](#). Argentina: Vittone-Cuello.
- [32] Boulos, M. et al. (2014). [Mobile medical and health apps: State of the art, concerns, regulatory control and certification](#). *Online Journal of Public Health Informatics* 5(3), pp. 229-243.
- [33] Guidelines on Medical Devices (2009). [Clinical evaluation: A guide for manufacturers and notified bodies](#). European Commission Enterprise and Industry Directorate General. MEDDEV. 2.7.1 Rev. 3.
- [34] Lyons, K. & Starner, T. (2001). [Mobile capture for wearable computer usability testing](#). Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Wearable Computers (pp. 69-76). Zurich, Switzerland.

38. Prototipo para identificación de seguridad en envases de bebidas alcohólicas

Giovanny A. Cardona R.
Fabio N. Rendón C.
Rafael Reyes

Institución Universitaria Escolme. Medellín, Colombia

1. Introducción

La ilegalidad es una problemática social importante que ha sido persistente a lo largo del tiempo y que afecta a diferentes sectores de la economía, entre ellos el de las bebidas alcohólicas. Así mismo, la adulteración y falsificación es uno de los fenómenos que mayor preocupación genera, especialmente por su crecimiento en los últimos años [1]. Por otra parte, el consumo de alcohol en el país ha ido en aumento y la edad en que las personas empiezan a tomarlo es cada vez más temprana. Las razones son de diferente índole: socializar con familiares y amigos, cuestiones de cultura, dependencia o, simplemente, porque les gusta el sabor. Cualquiera que sea la razón es claro que Colombia es un país consumidor y, según cifras de la Organización Panamericana de la Salud OPS de 2015, ocupa el puesto 12 entre los países que más consumen en la región, a la vez que Latinoamérica es la segunda región con mayor consumo per cápita de alcohol en el mundo. Lo anterior conlleva un sentido de responsabilidad con los productos que se ofrecen a la ciudadanía y es por eso se debe estar en pro de un consumo responsable y de identificar con seguridad lo que se consume [2].

Con el incremento del consumo de bebidas alcohólicas también crece el riesgo de adquirir licor ilegal y, de acuerdo con el estudio de la Federación Nacional de Departamentos 2016, el 24% del licor en el país es ilegal: 70% es licor adulterado y 30% contrabando. En el país existen bandas criminales dedicadas a adulterar, sin las mínimas medidas sanitarias, en alambiques, de forma artesanal y con ingredientes peligrosos, tratando de simular el licor original. También existe la modalidad de mezcla, que consiste en combinar cantidades de licor bueno y costoso con licor barato y de baja calidad. Igualmente, han logrado un nivel de perfeccionamiento del licor adulterado, que algunas se constituyen en *empresarios* de la ilegalidad y cuentan con maquinaria de punta y grandes redes de distribución y comercialización, fabricando cantidades de licor que se asemeja en gran medida al original y, lo más preocupante, pueden llevarlo cada vez más lejos [2].

Los riesgos para la salud son altos y, en muchos casos, las personas desconocen que están tomando licor adulterado, ya sea porque no diferencian las señales o porque, incluso después de los primeros tragos y habiendo percibido alguna anomalía, no revisan lo que están tomando. En cualquiera caso, al momento que una persona toma licor adulterado puede presentar una serie de síntomas, tales como efecto de quemazón interna, dolor de cabeza extremadamente fuerte, ojos borrosos y ceguera permanente que, en casos graves, pueden ser fatales [3]. Con el contrabando, el licor adulterado ocasiona que los departamentos pierdan grandes cantidades de dinero que, en la mayoría, se destinan a la educación, la inversión social y la salud de los ciudadanos. Asimismo, genera desigualdad en competencia para los empresarios que importan legalmente, porque los que lo hacen por medio del contrabando golpean fuertemente el bienestar y el bolsillo de todos [3].

Durante mucho tiempo se ha hecho todo lo posible para combatir este flagelo de diferentes formas, con recomendaciones tales como comprar el licor en lugares

reconocidos y de confianza, revisar que la botella este limpia y sin partículas extrañas, rasgar la etiqueta de la botella para evitar que los delincuentes las usen de nuevo, entre otras, que brindan información al usuario sobre el producto. Aun así, los delincuentes se ingenian cómo seguir vendiendo licor adulterado y para simular las medidas de seguridad que se han aplicado. Esto sirve como detonante para pensar en la necesidad de crear más medidas que contrarresten este fenómeno en Colombia.

Para cualquier ciudadano que en algún momento de su vida desee consumir bebidas alcohólicas, es imperativo que cuente la seguridad de que ese licor es genuino, más aún cuando las cifras en el país revelan que de cada cuatro botellas disponibles en el país, una es ilegal (adulterada o de contrabando). Por eso se hace necesario maximizar ese grado de confiabilidad, sobre todo si ese producto atenta contra la salud de los consumidores. La propuesta de este proyecto de investigación es crear un prototipo alterno, que incremente la seguridad en los envases de bebidas alcohólicas y proteja la salud de la ciudadanía, generando impacto social en cuanto al bienestar de la población y reflejando una disminución importante de la ilegalidad, una significativa mejora en las utilidades del fabricante y un aumento en el recaudo del departamento. Para implementar esta solución, la idea es concretar y desarrollar el siguiente objetivo general: Crear un prototipo para la identificación y seguridad en los envases de las bebidas alcohólicas en la ciudad de Medellín. Para cumplirlo, se formulan los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar una interfaz para dispositivos móviles que se utilizará entre el usuario y el servidor.
2. Construir la base de datos con información de las bebidas alcohólicas que serán verificadas.
3. Implementar un mecanismo dual de seguridad para la verificación y la información de los envases de las bebidas alcohólicas.

2. Estado de la cuestión

2.1 Causas de la adulteración y falsificación de bebidas alcohólicas

Una de las causas es la falta de vigilancia y regulación de insumos para la fabricación de bebidas alcohólicas, porque se ha encontrado vacíos importantes en el control de algunas de las materias primas empleadas para la fabricación de las bebidas alcohólicas, en particular del alcohol potable y la reutilización de los envases de vidrio. En principio, los departamentos tienen el monopolio sobre los licores de más de 20 grados de alcohol y sobre la importación, distribución y venta del alcohol potable, sin embargo, hay poco control sobre las importaciones de alcohol etílico. Así mismo, las reglas sobre su distribución y venta no están unificadas en todos los departamentos, por esta razón se puede generar incentivos al desvío de este insumo hacia la adulteración y falsificación.

Por otro lado, con la Ley 693 de 2001, la producción, distribución, comercialización e importación de alcohol potable dejó de hacer parte del monopolio rentístico de los departamentos. Por lo tanto, las empresas que utilizan alcohol etílico potable en sus procesos, pueden producirlo con permisos o importarlo directamente como alcohol desnaturalizado. Además, la entrada en vigor de la mezcla de gasolina con alcohol carburante en el año 2005, generó un *boom* en la producción nacional de alcoholes carburantes por parte de los ingenios azucareros. Lo anterior, aunado a las exigencias de las Normas Técnicas Colombianas (NTC), las licencias ambientales para producir alcohol etílico potable y el importante incremento de los precios de la melaza, han llevado a las

licoreras e industrias nacionales a dejar de producir su propio alcohol y, por tanto, a importarlo. Los países de donde principalmente se importa en Colombia son Ecuador, Perú, Brasil y Bolivia, lo que ha permitido que exista una oferta residual sistemática de alcohol etílico potable, de fácil acceso para los adulteradores.

Otra causa para la adulteración es el fácil acceso a los envases de vidrio reciclados, porque su proceso de producción es complejo y en Colombia existe solamente una fábrica productora, por lo que los ilegales adquieren las botellas usadas. Adicionalmente, los precios de los envases reciclados son muy bajos, mientras que los adulteradores pagan precios mucho más altos, siendo un incentivo para acopiarlos [1].

2.2 Bajo nivel de coordinación y de recursos de las autoridades

Otro de los problemas es la falta de coordinación de las autoridades encargadas de la vigilancia y control de este sector. En particular, entre las diferentes autoridades que pueden incautar y aprehender bebidas alcohólicas ilegales (POLFA, DIJIN, SIJIN, CTI, Rentas Departamentales, ...), lo que genera vacíos jurídicos que favorecen a los ilegales y generan una baja judicialización. Además, las autoridades competentes no cuentan con los recursos suficientes para ser destinados al control y vigilancia de estos ilícitos. de igual manera, a pesar de que las transferencias del monopolio y sus rentas son manejadas directamente por entidades adscritas a los departamentos (Secretarías de Hacienda, Licoreras y Direcciones de Salud departamentales), no cuentan con la coordinación suficiente para que los recursos se manejen eficientemente, se evite la evasión y elusión y se eliminen los problemas en la extra-temporalidad de sus transferencias a los sectores destinados [6].

2.3 Falta de información sobre la adulteración y/o falsificación

La falta de información es otro problema que incentiva y favorece a la adulteración y falsificación de bebidas alcohólicas. Por un lado, hay poca información pública sobre los riesgos que se corren al comprar y consumir este tipo de bebidas (aunque el sector de las bebidas alcohólicas recientemente ha lanzado campañas de información y concientización); por otro lado, existe poca información para el público y las autoridades competentes sobre cómo distinguir las bebidas alcohólicas adulteradas de las originales. Para tratar de luchar contra esto, algunos productores de bebidas alcohólicas, las Direcciones de Rentas e incluso la DIAN, han apoyado innovaciones tecnológicas con el fin de dificultar la operación de los adulteradores y/o falsificadores. Además, han buscado avanzar en herramientas de fácil acceso a los consumidores y autoridades para detectar la trazabilidad y la originalidad de las bebidas [7].

3. Métodos para combatir la adulteración y/o falsificación

Desde hace algún tiempo se ha venido luchando contra la ilegalidad en cuanto a bebidas alcohólicas se refiere. Los actores privados y gubernamentales han elaborado estrategias que buscan atacar y disminuir las fuentes que originan este problema. En este proceso se han desarrollado métodos y procedimientos relevantes [1].

3.1 Inspección, vigilancia y control sanitario (IVC)

Buscan garantizar que las fábricas de alcohol y bebidas alcohólicas posean un registro sanitario y que cumplan con las prácticas generales de higiene en la manipulación, preparación, elaboración, envasado, almacenamiento, transporte, distribución, importación y exportación. Se realizan inspecciones periódicas a los establecimientos con Licencia Sanitaria bajo su jurisdicción, levantando un acta de visita y tomando muestras

de los productos, para someterlos a análisis de laboratorio cada vez que se considere conveniente. Tiene la facultad de comprobar el hecho y establecer la necesidad de aplicar medidas sanitarias de seguridad, con base en los peligros que pueda representar para la salud individual o colectiva [1]. Estas medidas se muestran en la Figura 1.

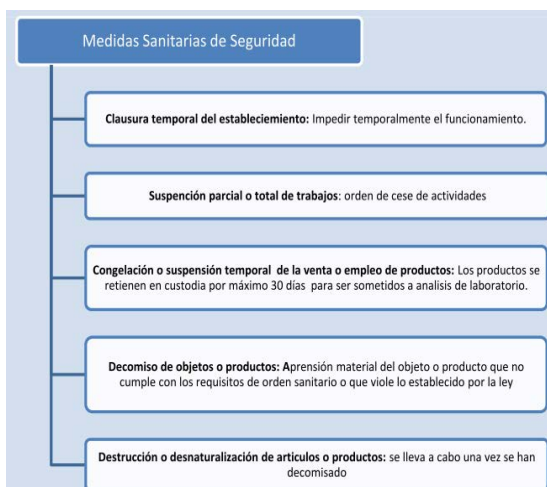


Figura 1. Medidas sanitarias de seguridad [1]

3.2 Sistema Único Nacional de Información y Rastreo (SUNIR)

Es una estrategia que adelanta el Departamento Nacional de Planeación (DNP), el Ministerio de Hacienda y Crédito Público (MHCP), la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN) y la Federación Nacional de Departamentos (FND), cuyo fin es fortalecer la acción policiva del Estado y combatir el contrabando y adulteración de licores, cervezas y otros productos [1]. La idea es registrar toda la información en línea y en tiempo real de todos los productos, mediante un dispositivo físico que permita esclarecer la trazabilidad de los mismos, para que los comercializadores y los consumidores verifiquen la procedencia y la legalidad de los productos que adquieren. Aunque actualmente es prácticamente imposible realizar trazabilidad a los productos, lo que constituye un espacio abierto a la ilegalidad y falta de control [1], el sistema posee las siguientes características:

1. Registro en línea de la información de producción, almacenamiento, marcas, tipo de producto, etc.
2. Marcación física de los bienes con una identificación única e irrepetible.
3. Conteo de todas las unidades producidas.
4. Carga de la información relacionada con el destino del producto.
5. Consulta y verificación del origen, autenticidad y destino del producto.
6. Generación de informes sobre exportación, importación, producción y consumo.
7. Herramientas de seguimiento y monitoreo [7]

3.3 Programas de recolección y reciclaje de botellas

La Asociación de Empresarios de Bares (Asobares), ACODIL y la Secretaría Distrital de Salud de Bogotá, lanzaron el programa Ecobares con el objetivo recoger las botellas vacías de todo tipo de licor, para luego destruirlas y evitar que lleguen al mercado ilegal y/o contaminen el medio ambiente. Con este programa se busca, además de evitar la reutilización de botellas vacías para la adulteración y la falsificación, ofrecerles a los recicladores un mejor precio del que conseguirían en el mercado negro y de esta forma desincentivar su participación como proveedores en este mercado ilegal [1].

3.4 Proyecto contra la falsificación y usurpación de marcas de la ANDI

Tiene como objetivo combatir la falsificación de productos que de alguna manera pueda atentar contra la vida y la salud de los ciudadanos, tal como es el caso de la adulteración de licores. También busca liderar la realización de operativos para incautar mercancía ilegal y judicializar a las personas implicadas. Se busca capacitar a los consumidores y operadores de la justicia y fortalecer las relaciones internacionales [1].

3.5 Syctrace

Busca hacerles seguimiento a todas botellas de licor que se produzcan y comercialicen en el mercado colombiano (trazabilidad). Para ello, en toda botella se incluye una estampilla (Figura 2) que tiene las siguientes características: un código único de identificación que debe ser igual al código de barras, contener el nombre del producto, la capacidad de la botella, fecha de impresión de la estampilla, control del lote de producción, empresa distribuidora, departamento de consumo, tinta invisible que se detecta con luz ultravioleta, tinta reactiva al hipoclorito y papel especial que evita su reutilización. De este modo, el consumidor puede corroborar la originalidad del producto con el acceso a la página web de la compañía para consultar el código de identificación de la estampilla [1].



Figura 2. Estampilla sistema Syctrace [1]

3.6 Estampilla inteligente

Incorpora un código bidimensional QR (*quick response*) para que el consumidor o el comerciante puedan identificar con su teléfono celular o vía web la legalidad del licor [1].

3.7 Capuchón Termo-incogible

En todas las botellas se pone un capuchón termo-incogible con un logo holográfico, para que se reconozca rápidamente la legalidad o ilegalidad del producto [1].

3.8 Lector portátil HVX

En primera instancia, en el capuchón se encuentran los logos de la licorera con una marcación molecular que permite identificar objetivamente la autenticidad del producto con la ayuda de un lector portátil HVX [1].

3.9 Lector LFD

Involucra la inclusión de un marcador orgánico en el contenido de las botellas legales, de forma tal que con un kit de muestra y un lector LFD se haga la identificación química. Si bien el Syctrace y la estampilla inteligente brindan soluciones, especialmente en términos de logística, no lo hacen a nivel de seguridad, porque sus estampillas como elementos impresos, son fácilmente replicables. Además, dado que hasta ahora el sistema de trazabilidad se encuentra en su fase inicial, estas iniciativas se quedan cortas en el control de la adulteración y falsificación de bebidas alcohólicas [1].

4. Estado de las tecnologías asociadas con la propuesta

4.1 Crecimiento de conectividad fija y móvil en Colombia

A continuación, se presenta un análisis a la estructura de los mercados de los servicios fijos y móviles de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC) (televisión

por suscripción y satelital, internet fijo y móvil - demanda y suscripción- y telefonía fija y móvil), en términos de conexiones, suscriptores y abonados (usuarios), teniendo en cuenta su evolución en el tiempo y la participación del mercado que tienen los principales proveedores [4]. Durante el 2014 se continuó con la senda creciente en el número de usuarios de servicios fijos y móviles del sector TIC, experimentada desde el 2013. Entre 2012 y 2014 el número total de usuarios de estos servicios registró un crecimiento del 18,1%, pasando de 82.389.026 usuarios en 2012 a 99.438.861 en 2014. Este crecimiento estuvo impulsado principalmente por el aumento de usuarios de Internet fijo y móvil, con una tasa de crecimiento anual promedio superior al 13% [4]. Se destacan los usuarios de internet móvil por suscripción que, en los últimos tres años, han estado creciendo a una tasa anual promedio del 32%, alcanzando 5.565.663 suscriptores en 2014 [4], como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Evolución número de usuarios de los servicios TIC 2012-2014 [4]

Servicio		Usuarios		
		2012	2013	2014
Televisión	Tv Suscripción	4.310.423	4.667.846	4.897.426
	Fijo	3.906.885	4.497.678	5.051.552
Internet	Móvil-Demanda	15.687.971	14.676.422	21.412.556
	Móvil-Suscripción	3.209.059	4.563.644	5.565.663
Telefonía	Fija	7.030.348	7.133.260	7.180.937
	Móvil	49.066.359	50.295.114	55.330.727

Analizando la composición de los usuarios según los servicios fijos y móviles de telecomunicaciones en este periodo, se encuentra que, en 2014, el servicio de telefonía móvil sigue siendo el servicio con mayor cantidad de usuarios en Colombia, con un total de 55.330.727 usuarios, que representó un 55,6% del total de los usuarios de los servicios TIC en estudio [4]. Los servicios de televisión por suscripción, internet fijo e internet móvil por suscripción, reportan un menor número de usuarios con una cantidad inferior a los 6.000.000, que significó para 2014 una participación porcentual inferior al 6% en el total de los servicios fijos y móviles. No obstante, esta diferencia con respecto a la telefonía móvil se ha ido reduciendo en los últimos años [4].

4.2 Usos dados a Internet en Colombia

De acuerdo con los resultados de la ECV en 2014 (Figura 3), para el total nacional los usos más frecuentes de Internet, de usuarios de 5 y más años de edad, fueron las redes sociales con 63.2%, obtención de información con 61.7% y el correo y mensajería con 57.6%. Otros usos importantes, pero con una menor participación, fueron la educación y el aprendizaje con 36.7% y las actividades de entretenimiento con 28.7%. Por otra parte, las actividades que menos se realizaron en Colombia a través de Internet fueron los trámites con organismos gubernamentales (4.1%), la compra u orden de bienes o servicios (5.6%), la banca electrónica u otros servicios financieros (6.4%) y la consulta de medios de comunicación (9.9%), entre otros (1.3%) [4].

Cuando se analiza el uso dado al Internet según la ubicación geográfica se observa que, en las cabeceras municipales se replicó el mismo comportamiento identificado para el total nacional, siendo los principales usos las redes sociales (65%), la obtención de información (63.0%) y el correo y mensajería (60.2%). Sin embargo, en el centro poblado y rural disperso, adicional a estas actividades, la educación y aprendizaje también fueron muy importantes, estando incluso por encima del correo y la mensajería [4].

Revisando la evolución del uso del Internet durante los últimos 3 años, se encuentra que el comportamiento de los colombianos en 2014 es una continuación de lo presentado

en años anteriores [4]. Para 2012-2014 el mayor uso del Internet, con un porcentaje superior al 50.0%, fueron las redes sociales, el correo y mensajería y la obtención de información. Por su parte, los trámites con organismos gubernamentales, la compra u orden de bienes o servicios y la banca electrónica u otros servicios financieros fueron las actividades de menor uso, y no superaron el 7.0% [4]. Dos hechos adicionales que llaman la atención es que, en la medida que los colombianos han incrementado el uso de las redes sociales, han disminuido el uso de correo y mensajería, mientras que las actividades de educación y aprendizaje, entretenimiento y consulta de medios de comunicación presentaron una disminución importante con respecto a los años anteriores [4].

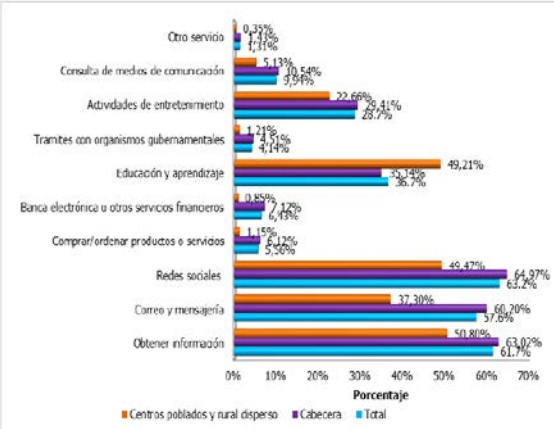


Figura 3. Usos dados al Internet en Colombia 2014 [4]

4.3 Contenidos y aplicaciones móviles en Colombia

De acuerdo con el App Annie Index: 2014 Retrospective, reporte anual realizado por la plataforma para el análisis de la economía de aplicaciones móviles, App Annie, en 2014 las aplicaciones móviles se volvieron más importantes para la población mundial. Examinando la información registrada para iOS App Store y Google Play, el número de descargas como el nivel de ingresos incrementaron a nivel mundial de manera importante con respecto al 2013 [4]. Las descargas registraron un incremento promedio de 25% y los ingresos un aumento promedio superior al 70%. Este último impulsado principalmente por Japón, Corea del Sur y Estados Unidos, que juntos generaron más ingresos por aplicación que el resto del mundo combinado. Un hecho relevante del 2014 fue que Google Play acentuó su liderazgo en términos de descargas con respecto iOS App Store, registrando casi un 60% más descargas a nivel mundial. Sin embargo, iOS App Store siguió manteniendo su ventaja en cuanto a ingresos, generando aproximadamente 70% más ingresos anuales por aplicación que Google Play [4].

4.4 Acceso a equipos de tecnología para redes móviles

De acuerdo con la información provista por los operadores móviles y con los datos suministrados por GfK para grandes superficies y tiendas especializadas, la venta de teléfonos en Colombia durante 2014 fue aproximadamente 11.5 millones, mostrando un crecimiento de unidades de equipos entre los años 2013 y 2014 del 9.1%, mientras que el valor en ventas aumentó 24.6% [4]. Según GfK, para las grandes superficies y tiendas especializadas la venta de equipos móviles tuvo un comportamiento estable durante los primeros nueve meses del 2014, con un crecimiento promedio mensual del 0.4% en el número de unidades vendidas y, en los últimos tres meses del año, la venta de teléfonos se incrementó de forma acelerada, alcanzando un crecimiento promedio mensual de 25% en las unidades vendidas [4].

Un hecho importante de 2014 fue que los teléfonos móviles estándar dejaron de ser los más vendidos en Colombia, para darle paso a los Smartphone, tendencia que se consolida con el pasar de los meses. Según información suministrada por GfK para grandes superficies y tiendas especializadas, teniendo en cuenta el número de unidades, los Smartphone incrementaron su participación en las ventas de 51.7% a 78.7%, entre enero y diciembre de 2014 (Figura 4), porcentaje que alcanza el 94.8% cuando se analizan las ventas en términos del valor monetario, indicando que, casi la totalidad de los ingresos, generados por venta de teléfonos durante el 2014, fue por la venta de estos equipos [4].

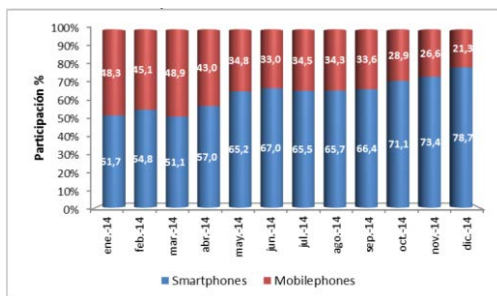


Figura 4. Participación porcentual de Smartphone y Mobilephones en Colombia en 2014 [4]

4.5 Códigos QR

Quick Response es un sistema para almacenar información y presentarla de forma rápida [9]. Los códigos QR están destinados a hacer parte de la vida diaria de los usuarios debido a que su predecesor, el código de barras creado en los años 50, está quedando obsoleto. Como factor positivo los códigos QR pueden almacenar miles de dígitos, a diferencia del código de barras que solamente puede almacenar 20 de forma unidimensional, mientras los QR son bidimensionales de cuadrados y pueden albergar hasta 7.089 caracteres numéricos o 4.296 caracteres alfanuméricos. Otro punto importante es que cualquier persona puede accederlos, porque no necesita lectores especiales, pudiendo utilizar una cámara de teléfono o una *webcam* con programas especiales para leerlos [8].

Tabla 2. Capacidad códigos QR [8]

Capacidad máxima de datos del código QR	
Numérico	7.089 caracteres
Alfanumérico	4.296 caracteres
Binario (8 bits)	2.953 bytes
Kanji/Kana	1.817 caracteres
Micro código QR	35 caracteres

Por otro lado, la información que contienen se puede emplear de diversas maneras: presentar un texto plano, enlazar una URL, hacer una llamada a un número de teléfono, enviar un SMS, enviar una tarjeta digital (vCard), enviar un *email*, enlazar con perfiles de redes sociales, añadir eventos en calendarios, y muchas otras actividades concernientes al entorno tecnológico [9]. Además, basta con un dispositivo que tenga una cámara y un pequeño software que ejerza como lector-traductor del código. El software utiliza los 3 cuadrados de 3 de las esquinas de los códigos para orientarlo correctamente y poderlo interpretar (Figura 5). La cuarta esquina la ocupa un cuadrado, aún menor, que hace la función de alineación del código. En otras zonas, se almacena la información referente a la versión, al formato y a la corrección de errores y, por supuesto, los patrones de puntos acogen los datos específicos de cada código. Los códigos QR se utilizan en muchos sectores y, actualmente, es fácil encontrarlos en productos farmacéuticos y etiquetas de productos

alimenticios, pero también se encuentran en el campo del arte o del comercio electrónico. La expansión de los Smartphone ha democratizado su uso, debido a que los códigos QR le permiten al usuario ahorrarse la escritura en teclados [10].



Figura 5. Funcionalidad código QR [8]

La mayoría de generadores de códigos QR son gratuitos, entre los que se destaca QuickMark, porque ofrece versiones para Android, iPhone, Windows Phone, Mac OS X y Windows, además, incluye una extensión para el navegador Google Chrome. Un caso parecido es el de Kaywa Reader [9]. Existen distintos tipos de generadores que permiten obtener:

- Códigos clásicos en blanco y negro (Figura 6).
- Códigos con bordes redondeados y de colores.
- Códigos que además incluyen alguna imagen o logotipo (Figura 7).
- Información estática, en la que el código siempre ofrece la misma información, por ejemplo, un texto o un enlace. Si se quiere cambiar la información es necesario cambiar el código.
- Información dinámica, en la que el autor del código puede cambiar la información ofrecida, de manera que se pueda reutilizar. El código enlaza con la base de datos del generador que, a su vez, enlaza con el contenido que el autor haya escogido.
- Tracking, que se refiere a que algunos de los generadores ofrecen la posibilidad de hacer un seguimiento de las veces que se visualiza un código, aportando, en algunos casos, detalles adicionales como el lugar desde donde ha sido visualizado [9].



Figura 6. Código con los nombres de los autores de este trabajo



Figura 7. Código con logotipo [9]

La utilización de estos códigos QR es variada, como llevar el control de inventarios, de actividades administrativas o de visitas a páginas web, pero, con la aparición de los Smartphone y las aplicaciones móviles, ha tenido mayor auge con las ofertas y premios que algunas empresas ofrecen. Si bien es cierto que existen otros métodos de codificación, pasados y emergentes, este proyecto se centrará en el código QR para el prototipo inicial, debido a su reconocida utilidad.

5. Descripción de la propuesta

5.1 Mecanismo

La forma tradicional de usar los códigos QR es simplemente informativa o de un sólo propósito; lo que quiere decir que solamente se cuenta con un código QR que llevará a cabo la tarea asignada por el fabricante o empresa prestadora de servicios. La propuesta con este prototipo es generar 2 códigos QR, que estén totalmente relacionados al producto, y donde la lectura de uno afectará inmediatamente la información del otro, ofreciendo al usuario información en tiempo real del estado que tiene ese producto. Para este caso, las bebidas alcohólicas serían controladas por una interfaz móvil que hará el control de su estado, evitando alteración o adulteración porque cada código es único y, una vez registrado el segundo código QR, el estado cambiará permanentemente. Con este proceso, la etiqueta o envase relacionado con el producto no se podría comercializar, porque evidenciaría que el producto ya fue consumido. Los componentes son:

1. *Código primario.* Este código QR estará visible en la parte externa del producto (Figura 8) y, para el caso de las bebidas alcohólicas, en las tapas, etiquetas o empaque externo. El usuario podrá, por medio de la interfaz móvil, escanear el código y conocer el estado actual del producto: si es nuevo y original, si ya fue consumido o si no existe en la base de datos del fabricante.

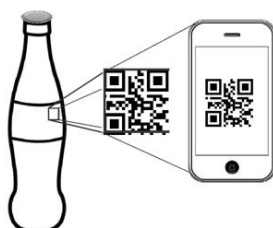


Figura 8. Código primario

2. *Código Secundario.* Este código estará visible solamente al destapar el producto (Figura 10) y, para el caso de las bebidas alcohólicas, estará ubicado por debajo de las tapas o dentro del empaque externo, como en plásticos o cajas. El usuario podrá registrar su producto con este código secundario, la interfaz escaneará el código y cambiará el estado del producto en la base de datos del fabricante, dejando información que evidencia el consumo del producto y la fecha en que se hizo.

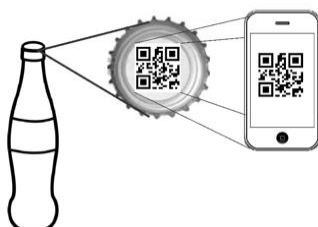


Figura 9. Código secundario

5.2 Base de Datos

MySQL es un sistema de gestión de base de datos relacional desarrollado por Oracle, considerado por muchos como la base de datos *open source* más popular. En desarrollos web tiene amplia aceptación, mayormente utilizado por prestadores de servicio de *hosting* para bases de datos de pruebas y desarrolladores orientados a internet. La base de datos del prototipo se realizó con este motor, debido a la cantidad de documentación existente y a la posibilidad de usarla de manera libre a través de los servicios *hosting*.

5.3 Hosting

La base de datos se encuentra alojada en 000webhost.com y permite, a modo de prueba, tener un máximo de 30 registros, que son suficientes para probar la interfaz móvil y crear un prototipo inicial.

5.4 Tabla y campos

Para la fase inicial del prototipo se creó la tabla *productos* (Tabla 3), que albergará toda la información de prueba de los productos que serán verificados por la interfaz móvil; las pruebas se realizaron con los siguientes campos, que componen las características más relevantes de los productos: bebidas alcohólicas.

- ID_PRODUCTO: código único de identificación de cada producto y que no puede ser repetido, este campo en la tabla es auto-incremental.
- NOMBRE: alberga el nombre completo de la bebida alcohólica.
- COD_PRIMARIO: el primer código QR en formato texto y es el código externo al que pueden acceder los consumidores sin abrir el producto.
- COD_SECUNDARIO: es el segundo código QR del producto y es el código interno al cual solamente se puede acceder al destapar o dañar el empaque del producto.
- FABRICANTE: nombre del fabricante responsable de la bebida alcohólica.
- PRESENTACION: el modo de presentación del producto: botella, caja o lata.
- VOLUMEN_DEL_LIQUIDO: cantidad de líquido contenido en el envase, en mililitros.
- FECHA_VENCE: Fecha vencimiento que asigna el fabricante al producto.
- GRADOS_DE_ALCOHOL: grados de alcohol asignados por el fabricante.
- LOTE: el grupo específico en la producción al que pertenece el producto.
- FECHA_FABRICACION: la fecha de producción del producto.
- FECHA_CONSUMO: fecha en la que se consumió el producto.
- ESTADO: estado actual del producto: Sin Consumir o Consumido.

Tabla 3. Base de datos

Field	Type	Collation	Attributes	Null	Default	Extra
ID_PRODUCTO	int(10)		UNSIGNED	No		auto_increment
NOMBRE	varchar(300)	utf8_unicode_ci		No		
COD_PRIMARIO	varchar(50)	utf8_unicode_ci		No		
COD_SECUNDARIO	varchar(50)	utf8_unicode_ci		No		
FABRICANTE	varchar(300)	utf8_unicode_ci		No		
PRESENTACION	varchar(300)	utf8_unicode_ci		No		
VOLUMEN_DEL_LIQUIDO	varchar(10)	utf8_unicode_ci		No		
FECHA_VENCE	date			No		
GRADOS_DE_ALCOHOL	varchar(10)	utf8_unicode_ci		No		
LOTE	varchar(10)	utf8_unicode_ci		No		
FECHA_FABRICACION	date			No		
FECHA_CONSUMO	date			No		
ESTADO	varchar(100)	utf8_unicode_ci		No		

5.5 Registro

Se alimenta la base de datos directamente en la plataforma del *hosting* con información de las bebidas alcohólicas a controlar, quedando un registro inicial de fábrica, tal como se observa en las Tablas 4, 5 y 6.

Tabla 4. Registro de productos

ID_PRODUCTO	NOMBRE	COD_PRIMARIO	COD_SECUNDARIO
102	925 Cranberry Lemon Vodka MIX	prima0303	prima3030

Tabla 5. Características de productos

FABRICANTE	PRESENTACION	VOLUMEN_DEL_LIQUIDO	FECHA_VENCE
Guz and London Beverages S.A.S.	botella	275 ML	2016-09-15

Tabla 6. Características de productos

GRADOS_DE_ALCOHOL	LOTE	FECHA_FABRICACION	FECHA_CONSUMO	ESTADO
5	255	2014-09-12	0000-00-00	Sin Consumir

Después que la interfaz móvil registre el segundo código QR, los campos FECHA_CONSUMO y ESTADO cambiaran, dejando esta bebida alcohólica por fuera del mercado o de cualquier comercialización, evitando que se utilicen los envases para la adulteración o el re-empaque. El cambio de estado se registra como en la Tabla 7.

Tabla 7. Cambio de estado del producto

GRADOS_DE_ALCOHOL	LOTE	FECHA_FABRICACION	FECHA_CONSUMO	ESTADO
5	255	2014-09-12	2016-06-10	Consumido

6. Prototipo de la solución

Presenciamos una continua revolución tecnológica y es imperativo estar a la búsqueda de soluciones a los principales problemas sociales, mediante ideas innovadoras que los solucionen positivamente. Estas ideas tienen una fase inicial y de desarrollo hasta llegar a un bosquejo o primera versión de la solución, a lo que se llamará prototipo inicial. Este primer prototipo demostrará la concepción para mejorar determinada situación o proceso. La principal meta de este prototipo es brindar una solución a la inseguridad de los envases de bebidas alcohólicas, para que la ilegalidad y adulteración minimicen su impacto en la industria, el gobierno y la sociedad en general.

Liquor Inspector (Figura 10) es la aplicación o interfaz móvil que ayudará a estar en contacto con la información que posee el fabricante acerca del producto, de forma directa y en tiempo real. Fue desarrollada en App Inventor 2 y se encuentra funcional, permitiendo al usuario una inspección directa al Código QR de cada envase y recibiendo la información necesaria del estado de determinado licor.



LIQUOR INSPECTOR

Figura 10. Prototipo de la aplicación

App Inventor 2 es una plataforma de Google Labs para generar aplicaciones software para el sistema operativo Android. De forma visual y a partir de un conjunto de herramientas básicas, una persona puede ir construyendo bloques hasta terminar una aplicación, además, es gratuito y se basa en librerías OpenBlock. App Inventor se ejecuta como un servicio web administrado por personal del Massachusetts Institute of Technology (MIT) para el aprendizaje móvil. Su interfaz amigable e intuitiva la convierte en una buena opción para crear aplicaciones iniciales o, para el proyecto, prototipos que ilustren con funcionalidad básica la idea que se va dar a conocer en una primera fase.

En la Figura 11 se muestra la primera pantalla al entrar en la interfaz, su arquitectura es simple con el propósito de que los usuarios la entiendan y utilicen fácilmente. Los elementos que la constituyen, enumerados en círculos amarillos, son:

1. Barra de estado: muestra información de la pantalla actual.
2. Barra Menú: contiene los diferentes botones de la aplicación y el logo.
3. Bombilla: enciende y apaga la luz del flash.
4. Información: muestra una ayuda básica para el uso de la aplicación.
5. Salir: Permite salir de la aplicación.
6. Escanear: permite empezar a capturar el código QR en el envase.



Figura 11. Pantalla inicial

El usuario ingresa a la interfaz y presiona escanear, inmediatamente ingresa a la zona de captura de código QR usando la cámara del dispositivo móvil (Figura 12). Con la cámara se enfoca el código primario (código QR externo del producto) y, mediante un proceso de escaneo automático, se debe centrar imagen para que la captura tenga éxito. Después de tener el código, la aplicación se conectará con la base de datos del fabricante y pasará a la siguiente pantalla.



Figura 12. Captura de código

Si este resultado indica que el envase de la bebida alcohólica está intacto, es decir, que el producto no ha sido consumido y por ende es de confianza para el usuario final, en la pantalla (Figura 13) se mostrará una barra el mensaje: *producto original y sin consumir*, seguido de la información del producto que el usuario puede constatar.

1. Home: volver a la pantalla inicial de la aplicación.
2. Barra de Mensaje: mensaje pertinente y acorde al código escaneado.
3. Producto: nombre del producto.
4. Presentación: presentación de fábrica del producto.
5. Fabricante: nombre del fabricante del producto.
6. Volumen: cantidad de líquido que contiene el producto, en mililitros.
7. Fecha de Vencimiento: fecha exacta de caducidad dada por el fabricante.
8. Grados de Alcohol: grados de alcohol de la bebida.
9. Lote: conjunto de producción al cual pertenece la bebida.
10. Fecha de Fabricación: fecha exacta de fábrica del producto.



Figura 13. Código externo sin problemas

Después de abrir la bebida se tendrá acceso al código QR secundario (código QR interno) ubicado debajo de las tapas o debajo de los empaques externos del producto. Cuando se escanea mostrará el mensaje (Figura 14): *producto registrado exitosamente disfruta 15 minutos gratis* y, al mismo tiempo, cambiará el estado del producto en la base de datos del fabricante. Como recompensa por el registro del código, la aplicación premiará al usuario con incentivos de diferente índole, estipulados por el fabricante.

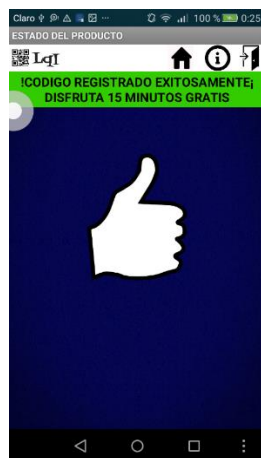


Figura 14. Código interno sin problemas

Luego de registrar el segundo código no se puede utilizarse más y se inutiliza, por lo que, para los casos en que el producto ha sido destapado y el código secundario este expuesto a diferentes personas, la aplicación premiará al primero que lo registre y a los demás les mostrará el mensaje: *este código ya estaba registrado, sigue participando*. Este mensaje intenta incentivar al usuario final a seguir colaborando con el proceso de registro y ganar los diferentes incentivos en otra oportunidad, a través de los productos que el fabricante tiene a disposición.

Luego que el código secundario ha sido registrado, la aplicación cambia el estado en la base de datos del fabricante y, por lo tanto, una nueva lectura del código primario dará como resultado un comportamiento diferente. En este caso muestra: *producto consumido*, en un fondo de color rojo para alertar que el producto no es óptimo. Además, muestra un campo adicional al final de la lista (número 1 en la Figura 15) con la fecha exacta en que el producto fue consumido. El usuario podrá ver las características del producto correspondiente al código QR utilizado y la aplicación habrá cumplido con su función de control, evitando el re-ensado y comercialización de un producto no-original.

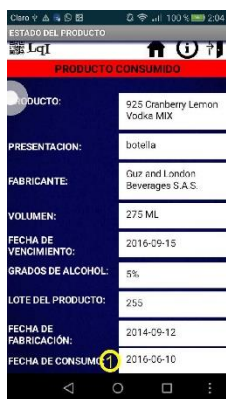


Figura 15. Producto consumido

Si el código QR capturado por la aplicación no es válido en de la base de datos del fabricante, la interfaz mostrará (Figura 16): *código errado o producto inexistente*.

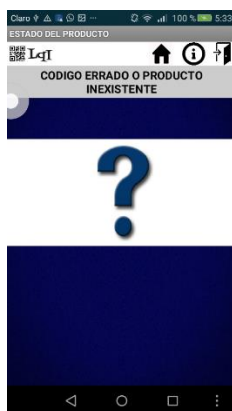


Figura 17. Código no-válido

7. Conclusiones

La interfaz móvil Liquor Inspector es un prototipo viable y eficaz en la lucha contra la ilegalidad en el sector de las bebidas alcohólicas en el país, además, brinda una forma rápida de comunicación con el fabricante para inspeccionar el producto a consumir y

consultar su estado actual en tiempo real, con la seguridad de que solamente el fabricante podría alterar esos datos. Esta interfaz se une a los demás sistemas de seguridad para aumentar la percepción de confianza del consumidor, proteger la salud de la población y aumentar los recaudos que benefician a todos.

Aunque el prototipo actual fue enfocado en códigos QR, el sistema de codificación dual se puede adaptar a cualquier sistema de codificación emergente, que pueda mejorar en el futuro la experiencia del usuario con los productos del fabricante y, de esta manera, seguir a la par de las nuevas tecnologías protegiendo la sociedad y los recursos.

La tecnología es la respuesta a muchos de los problemas de ilegalidad en el país, además, los sistemas y autoridades que persiguen la ilegalidad del contrabando y del licor adulterado son insuficientes. De ahí la importancia de los desarrollos tecnológicos que ayuden a mejorar estas carencias, convirtiendo a cada ciudadano en un elemento activo que puede ayudar a disminuir las entradas y estrategias utilizadas por la ilegalidad. Por otro lado, con este sistema el usuario se convierte en un veedor de la protección de su a la vez que de la población en general.

App Inventor es una aplicación para desarrollo de apps, funcional y amigable con el usuario, donde se puede materializar muchas ideas iniciales y primeros prototipos que den una visión tangible de una aplicación, como el caso de Liquor Inspector. Sin embargo, para hacer aplicaciones más robustas y complejas se necesitan otras opciones que brinden desarrollo multiplataforma, para evitar desarrollar para cada sistema operativo. Se podría necesitar que estas aplicaciones se desarrollen en plataformas que agilicen la conversión a otros sistemas operativos, diferentes a Android. En definitiva, App inventor ofrece la posibilidad del primer prototipo, pero, para un desarrollo más profesional, se deben buscar otras alternativas.

Gracias a la masificación de internet en el país y al aumento de los teléfonos inteligentes, es viable el uso de aplicaciones móviles con conexión para solucionar problemáticas sociales, como las expuestas en este trabajo, ofreciendo mayor seguridad a la sociedad.

Si bien el mecanismo dual de codificación basado en códigos QR, la base de datos y la aplicación móvil están dirigidos a maximizar la seguridad en los envases de bebidas alcohólicas, el sistema puede ser implementado en diferentes productos que se puedan adulterar o falsificar, tales como medicamentos, perfumes, zapatos, alimentos, libros, música y películas, entre otros. Este tipo de seguridad les ayudará a los fabricantes a proteger su producto, a la vez que le brinda al consumidor final un mecanismo de protección y eleva su confianza en la marca.

Referencias

- [1] Zapata, J. et al. (2012). [Una estimación de la adulteración y la falsificación de bebidas alcohólicas en Colombia](#). Colombia: Fedesarrollo.
- [2] FND (2016.) [Reveladoras cifras sobre alcohol ilegal y contrabando de cigarrillos en Colombia](#). Bogotá: Federación Nacional de Departamentos.
- [3] OPS (2015). [Informe de situación regional sobre el alcohol y la salud en las Américas](#). Washington: Organización Panamericana de la Salud.
- [4] CRC (2015). [Reporte de industria del sector TICS](#). Colombia: Comisión de Regulación de Comunicaciones.
- [5] Los Informantes (2016). [Malos Tragos](#). Canal Caracol. Online [Jun 2016].
- [6] Zuleta, L. & Jaramillo L. (2000). [Los impuestos a los licores en Colombia](#). Colombia: Fedesarrollo.
- [7] [Decreto 602 de 2013](#). Por el cual se reglamenta el Sistema Único Nacional de Información y Rastreo (SUNIR).

- [8] Estrada, D. et al. (2016). [Alternativas tecnológicas para reducir el volumen de las vinazas de la industria alcoholera y su tratamiento](#). *Centro Azúcar* 43(1), pp. 30-36.
- [9] Huidobro, J. (2009). [Código QR](#). *Bit* 172, pp. 47-49.
- [10] Minguell, M. et al. (2012). [Realidad aumentada y códigos QR en educación](#). En Hernández, J. et al. (Eds.), *Tendencias emergentes en educación con TIC* (pp. 135-157). Barcelona: Espiral.

39. Software de diagramado de UML: Definición de criterios de accesibilidad necesarios para la construcción de diagramas por usuarios con limitación visual

**Luis Ortiz C.
Anderson Aristizabal L.
Francia Caraballo M.**

Universidad Autónoma Latinoamericana. Medellín, Colombia

1. Introducción

UML es un estándar aprobado por ISO mediante referencia ISO/IEC 19501:2005 Information technology -Open Distributed Processing- Unified Modeling Language (UML) Versión 1.4.2 [1], que, en la Ingeniería del Software, se utiliza como diagramado para representar el comportamiento y las funcionalidades de un programa. En contexto, estos diagramas son un medio de comunicación entre los profesionales involucrados en los diferentes procesos de análisis, diseño y desarrollo; permitiendo comunicar y clarificar requisitos, que se solucionarán con la creación de determinado software. En términos generales, los diagramas UML tienen las siguientes características:

- Muestran una idea general del software a desarrollar
- Muestran posibles comportamientos que podría tener el programa al ejecutar tareas específicas
- Dan una perspectiva sobre todos los aspectos que quiere cubrir la aplicación
- Permiten mejorar o corregir posibles inconformidades o puntos imprecisos en el levantamiento de los requisitos
- Permiten visualizar y realizar los ajustes necesarios en la etapa de desarrollo.

El software para el modelamiento UML disponible en la actualidad, cumple la función para la cual ha sido diseñado. No obstante, en la revisión del software disponible se encontró una marcada ausencia de herramientas o mecanismos de accesibilidad para usuarios con limitación visual, que son imprescindibles para que ellos puedan usar eficientemente del software para el modelamiento en su ejercicio profesional. Con esta perspectiva y teniendo en cuenta la ausencia descrita, se inició una revisión de la literatura, complementada con la experiencia de usuario de uno de los autores, con el objetivo de definir los criterios mínimos de accesibilidad con los que debe contar un software para el modelamiento UML. Contribuyendo de esta manera a que estos usuarios tengan la posibilidad de usar adecuadamente las funcionalidades del software.

Este trabajo se estructura de la siguiente forma: 1) se presenta una revisión de la literatura, que incluye conceptos acerca de la limitación visual tomados de la Organización Mundial de la Salud (OMS), tales como: usabilidad, accesibilidad y diseño centrado en el usuario; finalmente se contextualiza la tiflotecnología como un conjunto de teorías y técnicas que permiten el aprovechamiento práctico de los conocimientos tecnológicos por parte de personas con limitación visual, además de los lectores de pantalla y los programas para la diagramación y el modelamiento UML.

2) Se relacionan los antecedentes de la investigación, donde se evidencian los referentes teóricos, la descripción de la metodología, basada en investigación cualitativa, de forma explicativa y descriptiva. Se presentan, además, los resultados del análisis de dos herramientas de diagramación UML en términos de accesibilidad: Microsoft Visio y ArgoUML. También se expone una opinión general sobre la identificación de mejores prácticas de diseño de software, en los que se incluyan mecanismos para la accesibilidad.

2. Revisión de la literatura

2.1 Limitación visual

El Instituto Nacional para Ciegos de Colombia (INCI), define limitación visual como la pérdida total o parcial de la visión de ambos ojos, como consecuencia de un accidente, de una enfermedad congénita (adquirida en el vientre de la madre o al nacer) o de una enfermedad que se presenta en el transcurso de la vida [2]. Según la OMS, las deficiencias se producen como consecuencia de la pérdida o anormalidad de una estructura o función psicológica, fisiológica o anatómica. Cuando las deficiencias provocan una restricción o ausencia de la capacidad para realizar una actividad en la forma o dentro del margen que se considera normal para un ser humano, estamos ante una discapacidad [3].

De acuerdo con datos de esta organización, en el mundo hay aproximadamente 285 millones de personas con discapacidad visual, de las cuales 39 millones son ciegas y 246 millones presentan baja visión. Aproximadamente un 90% de la población mundial con discapacidad visual se concentra en países de bajos ingresos, mientras que el 82% de las personas que padecen ceguera tienen 50 años o más [4].

2.2 Usabilidad y accesibilidad

En la norma ISO 9241-11, sobre requerimientos ergonómicos para el trabajo de oficina con terminales de despliegue visual, se define la usabilidad como la medida en la que un producto puede ser usado por determinados usuarios, para conseguir objetivos específicos con efectividad, eficiencia y satisfacción en un contexto de uso específico [5]. Por lo tanto, en relación con las herramientas de diagramación, la usabilidad, como la medida en la cual un producto puede ser usado, ayuda a evaluar y orientar el diseño de un programa, de tal manera que sea efectiva, eficiente y satisfactoria. En la misma norma, efectividad se define como la exactitud y completitud con que los usuarios alcanzan metas específicas. Mientras que eficiencia se refiere a los recursos utilizados para lograr el nivel específico de exactitud y completitud de la meta. Finalmente, la satisfacción es la libertad de incomodidades y las actitudes positivas hacia el uso del producto, que presenta el usuario. Otra definición más específica considera que la usabilidad también puede hacer referencia a las funcionalidades de un producto que lo hacen más fácil de usar [5].

La accesibilidad es un conjunto de características funcionales, con las cuales las personas que poseen algún tipo de discapacidad pueden utilizar un producto, en este caso el software [6]. En ese sentido, un software de diagramación UML accesible, debería poseer interfaces perceptibles, operables y comprensibles para el usuario. En cuanto a los términos deficiencia o discapacidad, existen una amplia variedad:

- Limitaciones y discapacidades visuales
- limitaciones y discapacidades auditivas
- limitaciones y discapacidades físicas
- limitaciones y discapacidades cognitivas
- limitaciones y discapacidades neurológicas
- limitaciones y discapacidades de habla.

Además, en el campo de la accesibilidad se puede definir una serie de objetivos básicos:

- Satisfacer las necesidades de personas con limitaciones.
- Encontrar el equilibrio entre los diferentes usuarios y la particularidad de sus limitaciones.
- Utilizar un lenguaje claro para expresar las funciones propias del aplicativo.

Sintetizando lo anterior, la usabilidad permite medir el grado en que un usuario puede alcanzar un objetivo, mientras que la accesibilidad es el conjunto de características para que cualquier usuario pueda alcanzar el objetivo mediante software (Figura 1).



Figura 1. Usabilidad y accesibilidad [5, 6]

2.3 Diseño centrado en el usuario

El diseño centrado en el usuario (DCU), es un proceso que hace hincapié en la usabilidad y la accesibilidad, además de en características, entornos, tareas y flujo de trabajo, siguiendo una serie de métodos y técnicas orientadas a analizar, diseñar y evaluar hardware, software e interfaces web de uso extendido. En el proceso DCU se incorporan el diseño y la evaluación desde la fase inicial de cada proyecto de desarrollo [6]. Otra definición [7] explica que DCU es un proceso cíclico en el que las decisiones de diseño están dirigidas por el usuario y los objetivos que pretende satisfacer el producto, en cuyo proceso, la usabilidad del diseño se evalúa de forma iterativa y mejorada incrementalmente.

De otro lado, la norma ISO 13407 de 1999, define los procesos de diseño para sistemas interactivos centrados en el operador humano, como una aproximación al desarrollo de sistemas interactivos que está orientado, concretamente, a hacer sistemas usables [8]. Adicionalmente, hace énfasis en el aspecto multidisciplinar del diseño centrado en el usuario. De acuerdo con la norma, el proceso de diseño centrado en el usuario se divide en cuatro fases: Entender y especificar el contexto de uso, especificar requisitos, producir soluciones de diseño y evaluación (Figura 2).



Figura 2. Proceso del Diseño Centrado en el Usuario DCU [7]

1. Entender y especificar el contexto de uso: En esta fase se identifica a las personas que usarán el producto, para qué lo usarán y en qué condiciones será utilizado.
2. Especificar requisitos: Identificar los objetivos del usuario y del proveedor del producto, que deberá satisfacer el diseño.
3. Producir soluciones de diseño: Esta fase se puede subdividir en diferentes etapas secuenciales, que muestran diferentes estados de desarrollo de la solución, y que van desde las primeras soluciones conceptuales hasta la solución final de diseño.

4. Evaluación: Es la fase más importante del proceso, porque en ella se validan las soluciones de diseño, se identifica si el sistema satisface los requisitos especificados, o si se detectan problemas de usabilidad. Normalmente se trabaja por medio de *test* o pruebas con usuarios.

En términos generales, identificar las necesidades del usuario no es una tarea fácil y, en muchas ocasiones, ellos mismos no son conscientes de sus propias necesidades. Por lo tanto, la tarea de emplear las estrategias más adecuadas para identificar las necesidades del usuario y descubrir las formas óptimas de satisfacer estas necesidades, recae sobre el diseñador del software.

El término *necesidad* tienen diferentes aseveraciones desde la perspectiva de diversos autores. Por ejemplo, Keinonen [9] plantea que la definición resulta un poco incierta y confusa, y afirma que al término se le suele definir de tres maneras diferentes: deseos, necesidades instrumentales y necesidades fundamentales. En este sentido, el diseño de un software, que atienda las necesidades de los usuarios finales y que tenga en cuenta la diversidad de los mismos, tiene como resultado la ejecución de un trabajo orientado a minimizar las confusiones que se puedan presentar en el uso.

Sin embargo, Cañas y Waerns [10] plantean que la relación entre las necesidades y el producto es aún más compleja. Hay ocasiones en las que el diseño no cumple la función de resolver las necesidades identificadas y, más aún, genera e impulsa nuevas necesidades [10]. El desarrollador define unos objetivos específicos para el producto software, con el fin de dotarlo de características específicas que, finalmente, se verán reflejadas en la facilidad de uso por el usuario, de acuerdo con sus necesidades particulares, en este caso la limitación visual. No obstante, se requiere que el software, a pesar de estar dotado de características adicionales, no viole el criterio de simplicidad, porque lejos de hacerlo más flexible y de fácil uso, puede terminar como un producto complicado y difícil de usar.

Norman [11] plantea que, en ocasiones, los productos software poseen un alto grado de complejidad, debido a que los diseñadores caen en el error de preguntarles a los usuarios sobre lo que quieren y, posteriormente, tratar de darles lo que piden. Es por ello que el trabajo preliminar para el levantamiento de requisitos en el desarrollo de software, se debe centrar en lo que el usuario hace, cómo lo hace y en qué momentos no son eficaces, o bien, evidencian algún tipo de dificultad para alcanzar un objetivo específico.

Por su parte, Karapanos, Hassenzahl y Martens [12] indican que los diseños se deben orientar hacia aquellas necesidades y propósitos más cotidianos; en este sentido, cobran valor factores como las diferencias individuales de los usuarios, el tipo y las características del producto, la situación o actividad que se vaya a desarrollar o, incluso, el tiempo que va a dedicar el usuario a interactuar con el producto. Esto con el fin de modificar la importancia de aquellas cualidades o características propias del diseño, que van a generar experiencias de uso satisfactorias; de esta forma se establece una relación Diseñador-Usuario, como la que se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Relación Diseñador-Usuario [7]

Aunque los principios y técnicas básicas son comunes, existen variaciones de los procesos de diseño centrado en el usuario que obedecen a las particularidades de las especificaciones de la actividad y de la limitación, en este caso, para el software de diagramación UML y el caso concreto de la limitación visual, que incluye:

- Usuarios con pérdida total de la visión, como el grado máximo de pérdida
- Usuarios con un grado de limitación severa de la visión
- Usuarios con limitación deficiente de la visión.

2.4 Tiflotecnología

La tiflotecnología es el conjunto de teorías, técnicas y recursos que permiten el aprovechamiento práctico de conocimientos y sistemas tecnológicos, para aplicarlos al uso de personas con limitación visual o con baja visión, con el objetivo de promover su acceso a la educación, entrenamiento, empleo y demás actividades de la vida diaria, buscando una completa autonomía personal en su integración social, laboral y educativa [13, 14]. Por lo tanto, una tecnología de apoyo. Debido a la limitación visual propiamente dicha, estas personas, sin una adaptación adecuada, no podrían hacer uso de las nuevas tecnologías. Por eso es que la tiflotecnología se ha convertido en una herramienta indispensable para personas con discapacidad, porque les permite acceder a las nuevas tecnologías, ya sea mediante equipos específicos o adaptaciones, de acuerdo con las necesidades u objetivos de cada una [15]. En este caso, el software de modelamiento UML, junto con las demás herramientas que permiten adaptación accesible, se pueden considerar tiflotecnología.

2.5 Lectores de pantalla

Los lectores de pantalla son programas de computador que combinan dos elementos: un lector de pantalla que se encarga de recibir los comandos ingresados por el usuario, de reconocer y leer los diferentes sitios y elementos del sistema operativo que se van situando en el área de trabajo; y una síntesis de voz, que verbaliza los nombres de estos sitios para que el usuario, con discapacidad visual, se ubique dentro del sistema y tenga acceso a cualquiera de los elementos que se muestran en la pantalla. Actualmente, los lectores de pantalla se consideran como uno de los productos que ofrecen mayor accesibilidad, y gracias a ellos los usuarios con limitación visual pueden hoy usar el computador de forma autónoma [16].

Los lectores de pantalla pueden interpretar y reconocer distintos elementos y objetos y, cuando responden a un estándar que los hace reconocibles dentro de cada sistema operativo, pueden interpretar elementos tales como menús, botones, casillas, ... Por lo tanto, si un programa como el software para la construcción de diagramas UML no posee características y estándares para reconocer los objetos de trabajo, no puede ser utilizado por usuarios con limitación visual. Entre los más utilizados se puede citar:

- NonVisual Desktop Acces, NVDA [17]: de código abierto y proporciona soporte para:
 - Navegar por la web.
 - Leer y escribir documentos con programas tales como Wordpad y Microsoft Word.
 - Enviar y recibir email con el Outlook Express.
 - Usar programas de líneas de comandos en DOS de Windows.
 - Producir hojas de cálculo básicas en Microsoft Excel.
 - Manejo general del computador a través de Mi PC / Explorador de Windows, Panel de Control y otras tareas genéricas de Windows.
 - Posibilidad de instalarlo y usarlo desde un dispositivo USB.

- Orca: es una ayuda técnica *open source*, flexible, extensible y potente para las personas con limitación visual, que utilizan el sistema operativo Linux. Mediante el uso de varias combinaciones de voz, lenguaje braille y magnificación, ayuda a proporcionar accesibilidad a las aplicaciones y cajas de herramientas que soporten AT-SPI (por ejemplo, el escritorio de GNOME) [18].
- Jaws: su finalidad es hacer que los computadores que funcionan con Microsoft Windows sean más accesibles para personas con alguna limitación relacionada con la visión. Para conseguir este propósito, el programa convierte el contenido de la pantalla en sonido, de manera que el usuario puede navegar por él sin necesidad de verlo [19]. Posee características como:
 - Compatibilidad con Windows 7, 8.1 y 10, incluyendo pantallas táctiles y gestos.
 - Apoyo a los contenidos MathML.
 - Función de OCR que proporciona acceso al texto de los documentos PDF, incluso aquellos con imágenes escaneadas que se reportan como documentos vacíos en algunos lectores de pantalla.

2.6 Software para diagramación y modelamiento en UML

Actualmente, hay varios de estos programas disponibles, en los que se incluyen las aplicaciones en entornos de escritorio y las aplicaciones en entornos web. Es necesario mencionar que no todo software disponible cumple con las características que lo hagan accesible, y que otros se ven limitados en cuanto a funcionalidades propias de la Ingeniería del Software. En este trabajo se toma como referencia dos programas de uso común en la y que han sido evaluados en *test* previos durante la fase de formulación de hipótesis:

- ArgoUML: una aplicación de diagramado de UML escrita en Java y publicada bajo Licencia BSD. Dado que está desarrollada en Java, está disponible en cualquier plataforma que soporte este ambiente de ejecución [20].
- Microsoft Visio: es una herramienta de dibujo vectorial para Microsoft Windows. Las herramientas que lo componen permiten realizar diagramas de oficinas, de bases de datos, de flujo de programas, UML y más, que inician al usuario en los lenguajes de programación [21].

3. Antecedentes de la investigación

La presente investigación aborda el conocimiento práctico de la Ingeniería del Software, adquirido desde la experiencia personal del autor, tomando como referente teórico publicaciones y textos propios del área, con el fin de dar respuesta al objeto de la misma.

En [22], los autores analizan diferentes herramientas tecnológicas, con el fin de determinar cuál de ellas ofrecía mayores beneficios técnicos para su incorporación en el ámbito de la enseñanza de las matemáticas y otras áreas exactas, dirigidas específicamente a estudiantes con discapacidad visual. En [23] se explora el uso y apropiación de las TIC en el ámbito de la educación superior, orientadas al apoyo de estudiantes con discapacidad visual. Se presenta un panorama en cuanto a la implementación de herramientas enfocadas en las áreas informáticas, exponen como conclusión la marcada ausencia de herramientas accesibles para la construcción de diagramas UML y de cómo las herramientas, si bien existen, no integran mecanismos para su uso eficaz por parte de usuarios con limitación visual.

En [24] describen los principales tipos de limitaciones físicas y su relación con el uso de las TIC. Los resultados son importantes en el contexto de la investigación, debido al enfoque informático que exponen los autores. En este trabajo se abordan y se analizan diferentes técnicas orientadas, esencialmente, a la tecnología accesible y desarrolladas para superar las dificultades que enfrentan las personas con limitaciones físicas.

En [25] se presenta un trabajo en el área de trazabilidad de requisitos orientados a UML. Proponen y presentan un meta-modelo de referencia para trazabilidad de requisitos, el cual se basa en UML e integra especificaciones textuales y elementos de modelado. Los autores consiguen una representación homogénea para todos los artefactos producidos durante el proceso de desarrollo de software. Es necesario resaltar que, en el área de las tiftotecnologías, las investigaciones y trabajos realizados son reducidos, debido a la poca cantidad de usuarios con limitación visual que tienen acceso a este tipo de programas. Esto limita la disponibilidad de información empírica para las investigaciones.

4. Metodología de la investigación

En este trabajo se emplea una metodología de investigación cualitativa con dos corrientes principales: una de orden explicativa y otra de orden descriptiva. La primera busca analizar dos programas de diagramado en UML para identificar las causas de los problemas de accesibilidad para personas con pérdida de la visión, además, busca determinar criterios mínimos de accesibilidad con base en los requisitos de rendimiento funcional, propuestos por United States Access Board sobre estándares para las TIC [26] (Tabla 1). En la Figura 4 se presenta el modelo de consecución de objetivos empleado.

Tabla 1. Criterios de rendimiento funcional [26]

1. Deberá facilitarse, al menos, un medio de operación y recuperación de la información, que no requiera que el usuario utilice la vista, o bien soporte para las tecnologías de apoyo utilizadas por las personas ciegas o con baja visión.
2. Deberá facilitarse, al menos, un medio de operación y recuperación de la información, que no requiera una agudeza visual superior a 20/70, en señal de audio y salida impresa ampliada de forma conjunta o por separado, o bien soporte para las tecnologías de apoyo utilizadas por las personas con baja visión.
3. Cuando la información acústica sea importante para la utilización de un producto, deberá facilitarse, al menos, un medio de operación y recuperación de la información con audio mejorado, o soporte para dispositivos de ayuda auditiva.

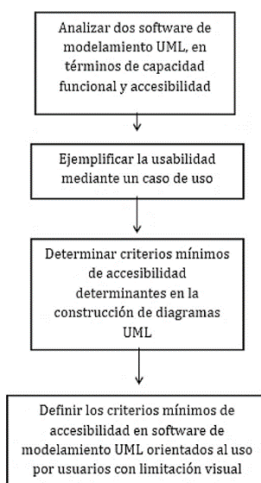


Figura 4. Modelo de consecución de objetivos

Por su parte, la corriente de orden descriptiva involucra la ejemplificación de usabilidad mediante un caso de uso, que permite, finalmente, definir los criterios mínimos de accesibilidad orientados al uso, por parte de usuarios con limitación visual, del software de modelamiento UML. Adicionalmente, en este trabajo se emplea historias de vida como método de investigación. Los datos utilizados provienen de la observación de la cotidianidad y del análisis de las explicaciones y reconstrucciones sobre las situaciones a las que el usuario, con limitación visual, se ve enfrentado en su vida cotidiana. En este sentido, las historias de vida y las experiencias construidas en las interacciones del sujeto con el objeto de uno de los autores, se incorpora al trabajo de investigación. Esto hace parte de una perspectiva fenomenológica que visualiza la conducta humana, lo que las personas dicen y hacen como el producto de la definición de su mundo [27].

5. Resultados

5.1 Microsoft Visio

Con respecto a los criterios de rendimiento funcional (Tabla 1) se hallaron los siguientes resultados: 1) *Medio de operación y recuperación de la información que no requiera que el usuario utilice la vista*. Visio es un programa que no permite la manipulación de sus objetos de diseño a través del teclado, lo que obliga a hacer uso del *mouse* para modelar y relacionar objetos y conseguir diagramas específicos. Esto se debe a la necesidad de arrastrar y soltar objetos en el espacio de diseño y a las características de los objetos disponibles para realizar dichos diagramas, los cuales no pueden ser identificados por los lectores de pantalla.

2) *Medio de operación y recuperación de la información que no requiera una agudeza visual superior a 20/70*, y 3) *Medio de operación y recuperación de la información con audio mejorado*. Evaluando estrictamente la accesibilidad, el software es poco operable, sin embargo, Windows ofrece varias herramientas y configuraciones que pueden facilitar el uso del equipo y hacerlo más cómodo. Si se necesita otras características de accesibilidad, es posible agregar productos de tecnología de ayuda adicionales [28]. En este sentido, el usuario con limitación visual puede realizar trabajos de diagramación, pero con ciertas restricciones en la medida que debe contar con un asistente que verifique el correcto despliegue visual de los componentes del diagrama, lo que da como resultado un trabajo tedioso y poco eficiente.

5.2 ArgoUML

No ofrece herramientas para la accesibilidad, por lo tanto, requiere la implementación de software adicional, tal como el lector de pantalla, que permite ubicar los elementos propios del área de trabajo en el software. Sin embargo, la principal dificultad es la verificación visual del código diagramado. 1) *Medio de operación y recuperación de la información que no requiera que el usuario utilice la vista*. Evaluando estrictamente la accesibilidad, el software ArgoUML es poco operable y escasamente se puede realizar algún tipo de diagramación, inclusive usando herramientas adicionales.

2) *Medio de operación y recuperación de la información que no requiera una agudeza visual superior a 20/70*, y 3) *Medio de operación y recuperación de la información con audio mejorado*. No se encontraron evidencias en la ejecución de pruebas que permitieran recuperar información sin agudeza visual superior a 20/70, porque el área de trabajo es totalmente visual y carece de mecanismos de lectura o etiquetas que brinden una noción acerca del tipo de diseño y su apariencia, tampoco con audio mejorado.

5.3 Identificación de mejores prácticas de diseño en interfaces gráficas

A diferencia de lo que se cree actualmente, equipar una aplicación con características de accesibilidad no es complicado, ni requiere alto costo adicional o mayor tiempo en el desarrollo de la misma. Normalmente, los entornos de desarrollo facilitan la utilización de propiedades de accesibilidad, que se pueden añadir en las propiedades de los objetos, tales como descripciones alternativas y etiquetas, entre otras. Es importante tener en cuenta una buena estructuración de los objetos dentro de los formularios, porque una buena organización les facilita, a lectores de pantalla, identificarlos y verbalizarlos correctamente. También, etiquetar los objetos adecuadamente con nombres concretos que relacionen el objeto con la función que cumple dentro del formulario. Esto es importante porque les ayuda a los usuarios a orientarse mejor dentro de la aplicación con lectores de pantalla.

5.4 Identificar herramientas informáticas adecuadas que permitan construir elementos de diagramación accesibles

Existen múltiples opciones a la hora de desarrollar un programa informático y se cuenta con un universo de lenguajes de programación y sus variaciones, cada uno con sus fortalezas, debilidades o con una orientación específica en algún sector de la informática. Muchos cuentan con librerías y opciones que les proveen a los desarrolladores mecanismos para añadir características de accesibilidad en sus proyectos.

No obstante, algunos lenguajes tienen mejores librerías y un soporte mucho más sólido para equipar las aplicaciones con características de accesibilidad. Entre ellos se encuentran: C#, C++, Visual Basic, Python y HTML 5, que se incluyen en esta investigación con base en la metodología propuesta, que incorpora historias de vida y las experiencias construidas en las interacciones del sujeto (usuario con limitación visual) con el objeto (lenguaje de programación), en sus actividades como estudiante. Todas estas opciones tienen capas de accesibilidad bien definidas, lo que permite darles a los objetos, dentro de las interfaces, accesibilidad para interactuar con lectores de pantalla.

5.5 Casos de uso

Los casos de uso corresponden a la técnica para especificar el comportamiento de un sistema, o bien especificar el modo de interacción con el mismo. Una definición extendida sugiere que un caso de uso es una secuencia de interacciones entre un sistema y alguien o algo que usa alguno de sus servicios [29]. A continuación, se construye un ejemplo de caso de uso (Tabla 3), orientado a la relación entre dos objetos en un diagrama UML.

Tabla 3. Ejemplo práctico de un Caso de uso

Código	Nombre	Actor	Descripción
001	Relación entre dos objetos	Usuario	Para una representación entre dos objetos en UML se debe definir una palabra única, que identifique al tipo de objeto que se quiere representar. En este caso se utiliza un diagrama de clases representando una asociación entre dos clases. Dónde la clase A está asociada con la clase B utilizando una línea para indicar dicha asociación. Adicionalmente, se utiliza una flecha rellena para indicar la dirección de la asociación entre ellas, en este caso de A hasta B. El código se escribiría: <i>A Línea Recta Flecha Rellena B</i>
002	Multiplicidad	Usuario	Las notaciones utilizadas para señalar la multiplicidad se colocan cerca del final de una asociación. Estos símbolos determinan cuántos objetos de cada tipo intervienen en la asociación.

			Por ejemplo, dos empresas pueden tener uno o más empleados. En este caso se definen las clases como empresas y los empleados como instancias de las clases. El código se escribiría: <i>Empresa1 Línea Recta Empresa2. Empleados 1..*</i>
003	Generación de diagrama	Sistema	Luego de escribir el diagrama utilizando la notación en texto plano, como se evidencia en las formas anteriores, el código es analizado por un componente del software que, posteriormente, generara su diagramación en el código UML, mostrando el diagrama visualmente, como lo haría cualquier herramienta de modelado de software.

6. Metodología propuesta

Luego de evidenciar las dificultades que encuentran las personas con discapacidad visual al utilizar herramientas de diagramación, se propone una solución metodológica que puede contribuir a la reducción de las mismas. La alternativa es una conceptualización compuesta de cuatro criterios fundamentales, orientados al software de diseño de diagramas UML, tal como se describe en la Tabla 2. Estos criterios deben cumplir con ciertas características para ser considerados como accesibles en términos de uso para un usuario con limitación visual: botones etiquetados correctamente, imágenes acompañadas de textos descriptivos y, en general, controles diseñados haciendo uso de las propiedades proporcionadas por las librerías gráficas con las que se construyen las interfaces, disponibles en la mayoría de ellas. Estos aspectos son relevantes para permitir que los lectores de pantalla interactúen con las mismas.

Tabla 2. Metodología alternativa para la construcción de diagramas de software de forma accesible: criterios de accesibilidad

1. Definir palabras que se relacionen con cada elemento a utilizar dentro de la diagramación. Cada tipo de línea, las figuras geométricas y sus variaciones e incluso su caracterización entre colores, debe contar con un identificador específico que se distinga del resto de los elementos.
2. Determinar con claridad los tipos de relaciones entre los elementos y caracterizarlos, para luego nombrarlos de la misma forma que los elementos anteriormente mencionados.
3. Crear una capa entre la estructura textual y la notación UML, para facilitar su representación, como lo hacen actualmente las herramientas de diagramación disponibles en este lenguaje de modelado.
4. Construir formularios gráficos con características de accesibilidad, que permitan usar la notación determinada anteriormente para nombrar elementos y sus relaciones, lo que facilitará el uso de la herramienta sin necesidad de aprender muchas palabras y definiciones. Esto se puede lograr haciendo uso de casillas de verificación, cuadros combinados, botones de opción, etc. También debe estar disponible un archivo de texto plano con la notación generada por el programa durante la construcción del diagrama, en las expresiones anteriormente definidas, para referenciar los componentes del diagrama. Esto con el fin de que pueda ser evaluada por el diseñador para hacer verificaciones y correcciones, si es el caso.

5. Conclusiones

Para que los usuarios con limitación visual puedan aprovechar al máximo las herramientas de diseño de diagramas UML, es indispensable que tengan un manejo adecuado del teclado, además, que adquieran la destreza en escucha de voz (lector de pantalla) y manejo de los comandos y entornos del computador específicamente diseñados para el tipo de software.

El presente trabajo de investigación contribuye al estado del arte acerca de la construcción de diagramas UML para el diseño de software, orientados al uso de forma accesible. Para esto hace una aproximación a la definición de una metodología alternativa

para la construcción de dichos diagramas, mediante la consecución de los objetivos propuestos en la fase de formulación del proyecto.

Las personas en condición de limitación visual, que se dedican al diseño de software, el desarrollo o, en general, a temas que tienen un alto contenido gráfico o cierta complejidad, utilizan herramientas tan específicas que no cuentan con el suficiente grado de accesibilidad. Esta problemática se evidencia ampliamente, generando dificultades para el buen desempeño de quienes hacen uso de lectores de pantalla. En este sentido, el presente trabajo contribuye a tratar de solucionar un problema generalizado y a la vez reducir la brecha de accesibilidad a las TIC y acceso a la información.

Históricamente, la evolución de los productos software se basada en procesos de construcción que, pocas veces, tiene en cuenta al usuario final en su desarrollo. En los últimos años se ha cambiado este paradigma, en parte gracias a los enfoques multidisciplinares que, entre otras, se caracterizan por hacer del usuario final el objeto central del diseño, lo que se traduce en un diseño eficiente y a la medida de las necesidades del mismo.

Toda esta confluencia de corrientes multidisciplinares permite, además, que hoy se encuentren metodologías que permiten diseñar productos interactivos, a la medida y orientados a la diversidad de usuarios que se pueden encontrar. Sin embargo, todavía existen limitaciones frente a la garantía de experiencias de uso satisfactorias, por lo que la exigencia de comprender el contexto de cada usuario es la forma fundamental e indispensable para el desarrollo de software accesible y, en este caso, en el campo de la informática y orientado a usuarios con limitación visual.

Finalmente, se hace énfasis en que un software, para ser considerado como accesible en términos de uso para un usuario con limitación visual, deberá contar con:

- Botones etiquetados correctamente
- Imágenes acompañadas de textos descriptivos
- Controles diseñados haciendo uso de las propiedades que proporcionan las librerías gráficas con las que se construyen las interfaces y disponibles en la mayoría de ellas. Estos aspectos son relevantes para permitir que los lectores de pantalla interactúen con las mismas.

6. Trabajo futuro

El presente proyecto busca trazar un referente, que sirva como guía para posteriores investigaciones en el área. Tiene como propósito beneficiar a usuarios de aplicativos de diseño software que posean una limitación visual y que, a su vez, requieran la utilización de lectores de pantalla para el desarrollo de su trabajo. Como trabajo futuro se propone la indagación profunda en la identificación de mecanismos orientados a dar mayor independencia a usuarios con limitaciones visuales en la realización de diagramas UML, teniendo como punto de partida los hallazgos de la presente investigación.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Fundación laboratorio de desarrollo de tecnologías de apoyo a personas con limitación visual (FunTIC-Lab), a la Dirección de investigaciones de la Universidad Autónoma Latinoamericana, a la Facultad de Ingenierías y al grupo de investigación INGECO de la misma universidad, por sus contribuciones para la elaboración de este trabajo.

Referencias

- [1] ISO (2005). [ISO/IEC 19501:2005](#). Information technology -- Open Distributed Processing -- Unified Modeling Language (UML) Version 1.4.2.
- [2] INCI. [Limitación visual](#). Instituto Nacional Para Ciegos. Online [Sep 2015].
- [3] OMS (2001). [Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud](#). Organización Mundial de la Salud. España: IMSERSO.
- [4] OMS (2014). [Ceguera y discapacidad visual](#). Organización Mundial de la Salud. Online [Sep 2015].
- [5] ISO (1998). [ISO 9241-11](#). Ergonomic Requirements for Office Work with Visual Display Terminals, Part 11: Guidance on Usability.
- [6] Henry, S. (2008). [Simplemente pregunta: Integración de la accesibilidad en el diseño](#). Online [Dic 2015].
- [7] Montero, Y. & Ortega, S. (2009). [Informe APEI sobre Usabilidad](#). Gijón: Asociación Profesional de Especialistas en Información.
- [8] ISO (1999). [ISO 13407:1999](#). Human-centred design processes for interactive systems.
- [9] Keinonen, T. (2008). [User-Centered Design and fundamental need](#). In Proceedings of the 5th Nordic conference on Human-computer interaction: building bridges (pp. 211-219). Lund, Sweden.
- [10] Cañas, J. & Waerns, Y. (2001). [Ergonomía cognitiva. Aspectos psicológicos de la Interacción de las personas con la Tecnología de la Información](#). Madrid: Médica Panamericana.
- [11] Norman, D. (2000). [El ordenador invisible](#). Barcelona: Paidós.
- [12] Karapanos, E. et al. (2009). [User experience over time: An initial framework](#). In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing (pp. 729-738). Florence, Italy.
- [13] Santos, R. (2015). [Promoção da motivação e da autonomia com recurso às tecnologias de informação e comunicação em alunos normovisuais e em alunos com deficiência visual \(MS\)](#). Tesis de Maestría. Universidade do Minho, Portugal.
- [14] Palomino, M. (2013). [Tiflotecnología e inclusión educativa: Evaluación de sus posibilidades didácticas para el alumnado con discapacidad visual](#). Revista Electrónica de Investigación y docencia (REID) 9, pp. 8-22.
- [15] Fernández, J. (2012). [Accesibilidad en Linux: Tiflotecnología](#). Linux Magazine 7, pp. 82-86.
- [16] INCI. [Lectores de Pantalla](#). Instituto Nacional Para Ciegos. Online [Sep 2015].
- [17] FBU. [NVDA: Nuevo lector de pantalla para Windows](#). Fundación Braille. Online [Oct 2015].
- [18] FBU. [Orca: el lector de pantalla libre](#). Fundación Braille. Online [Oct 2015].
- [19] Freedom Scientific. [Blindness Solutions: JAWS®](#). Online [Oct 2015].
- [20] Tigris.org. [Argo UML](#). Open Source Software Engineering Tools. Online [Oct 2015].
- [21] Microsoft. [Características principales de Visio](#). Online [Oct 2015].
- [22] Aristizabal, A., Ortiz, L. & Ochoa, J. (2013). [Las TIC como herramientas en la enseñanza de ciencias exactas para personas con discapacidad visual](#). En Memorias del Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería (pp. 142-145). Cartagena, Colombia.
- [23] Aristizabal, A. & Ortiz, L. (2015). [Uso y apropiación de las TICs en el ámbito de la educación superior orientadas al apoyo de estudiantes con discapacidad visual](#). En Memorias XVIII Congreso Internacional EDUTECH (pp. 1-8). Riobamba, Ecuador.
- [24] Guenaga, M., Barbier, A. & Eguiluz, A. (2007). [La accesibilidad y las tecnologías en la información y la comunicación](#). TRANS Revista de traductología 11, pp. 155-169.
- [25] Letelier, P. & Anaya, V. (2000). [Integrando Especificaciones Textuales y Elementos de modelado UML en un Marco de Trabajo para Trazabilidad de Requisitos](#). En V Jornadas de Ingeniería del Software y las Bases de Datos. Valladolid, España.
- [26] ATBCB (2000). [Electronic and Information Technology Accessibility Standards](#). U.S. Federal Register. Architectural and Transportation Barriers Compliance Board. Federal Register 65(246), pp. 1-30.
- [27] Chárriez, M. (2012). [Historias de vida: Una metodología de investigación cualitativa](#). Revista Griot 5(1), pp. 50-67.
- [28] Microsoft. [Características de accesibilidad ofrece Windows](#). Online [Oct 2015].
- [29] Ceria, S. (2001). [Casos de Uso – Un Método Práctico para Explorar Requerimientos](#). Universidad de Buenos Aires. Online [Sep 2015].

40. Características de los programadores disléxicos

José Fuertes C.¹**Luis González A.²****Loïc Martínez N.³**^{1,3}Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España²Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Medellín, Colombia**1. Introducción**

Tras la aprobación de la convención de la ONU sobre los derechos de las personas con discapacidad [1], la mayoría de países del mundo han establecido leyes de inclusión y en diversos escenarios se observan esfuerzos por ofrecer alternativas para mejorar su calidad de vida. A pesar esto, en muchos casos estos grupos poblacionales solamente han tenido una adecuada ayuda durante la niñez, olvidándose las afecciones que pueden presentar en su etapa adulta, o en el desarrollo específico de su profesión, como es el caso de las personas con dislexia. Esta es la diversidad funcional con mayor número de pacientes por año y no ha sido muy estudiada en personas que programan computadores. Según la Asociación Internacional de la Dislexia [2], esta diversidad funcional es:

Dificultad del aprendizaje que tiene origen neurológico. Se caracteriza por dificultades en un correcto o fluido reconocimiento de palabras y por un deletreo y habilidades decodificadoras pobres. Estas dificultades típicamente resultan de un déficit en el componente fonológico del lenguaje, el cual no está acorde con el nivel de desarrollo de otras habilidades cognitivas y la provisión de una instrucción escolar efectiva. Algunas consecuencias secundarias pueden incluir problemas en la comprensión lectora y una experiencia en lectura reducida que puede impedir el crecimiento del vocabulario y el aprendizaje de otros conocimientos [2].

Los efectos de la dislexia en las personas que desarrollan software se pueden convertir en barreras para el correcto desempeño de su vida profesional, porque, según Dixon [4], un programador con dislexia cuando desarrolla en una interfaz tradicional, se enfrenta a diversos problemas:

- Dificultad para recordar detalles del código.
- No tiene un buen manejo en el ordenamiento del código.
- Dificultad en la correcta definición de variables.
- Lentitud en la codificación del programa y corrección de errores.

En otros estudios, realizados por este autor, se afirma que estas personas, cuando trabajan con herramientas de programación con ayudas visuales o gráficas, son más hábiles en el desarrollo y seguimiento de programas de cómputo que los no-disléxicos [4].

Partiendo de esto, surge la idea de un proyecto de investigación como Disertación Doctoral, con el objetivo de diseñar un modelo para la transformación bidireccional entre códigos de lenguajes de programación visual y textual, que facilite el desarrollo de software bajo una sola interfaz, que interactúe entre estos entornos de programación. De esta se les facilita a las personas con diversas preferencias relacionadas con el entorno, seleccionar una ventana en su ambiente de desarrollo preferido (visual o textual) y que, independientemente de esta selección, puedan ver en su entorno lo que realiza otras. El desarrollo de este proyecto ayudará a los programadores con dislexia (PCD) en el proceso de interacción para desarrollar software en equipo, mitigando las diferencias de desempeño en el trabajo interactivo de programadores con y sin dislexia.

En el presente trabajo se presentan los antecedentes más importantes en relación con la dislexia, el resumen de un estudio exploratorio que determina las características de los

disléxicos adultos y los resultados de un experimento de recolección y análisis de información, realizado entre programadores de diferentes países y que sirvió para determinar el perfil de los programadores con dislexia, como el primer insumo para el desarrollo del proyecto.

2. Antecedentes

2.1 Prevalencia de la dislexia

A pesar del carácter universal de la dislexia, sus estimaciones de prevalencia son variables y, en su mayoría, atribuidas a la diversidad ortográfica de cada idioma. Everatt et al. [5] afirman que entre el 5% y el 10% de la población adulta mundial tienen dislexia, y Lyon et al. [6] que entre el 15% y el 20% de la población de los Estados Unidos tienen una dificultad de aprendizaje basada en el lenguaje y que, de ellas, el 80% corresponde a dislexia, mientras que Katusic et al. [7] opinan que las tasas varían desde el 5,3% hasta el 11,8%. En España son pocos los estudios con una estadística fiable al respecto, aunque específicamente en Murcia se reporta un 11,8% [8] y en las Islas Canarias un 8,6% [9]. En Latinoamérica, concretamente en Colombia, no se tienen cifras exactas, sin embargo, en Barranquilla se reporta 3.32% en la población infantil [10] y en Bogotá 3,63% [11]. Mientras que en Medellín no se reportan datos recientes, pero, según resultados de estudios realizados en el desarrollo de esta investigación, se encontró que el 20,28% creen tener dislexia o han sido diagnosticados con ella.

2.2 Dislexia en adultos

Durante años, la dislexia en las personas adultas ha sido un trastorno del aprendizaje oculto, porque, según estudios realizados en España [12], solamente el 0,95% de los que manifestaron tener dislexia han sido diagnosticados por un profesional, lo que permite inferir desconocimiento sobre esta alteración, falta de un manejo adecuado o de una intervención oportuna, convirtiéndola en una diversidad funcional supuestamente poco relevante para los centros de formación de adultos, pero que tiene gran afectación en el desarrollo personal de los implicados.

2.3 Ayudas informáticas para personas con dislexia

En el Reino Unido se ofrece el más importante apoyo legislativo para las personas con dislexia, debido a que el porcentaje más elevado de estudiantes con diversidad funcional, es el de los que padecen de este trastorno. Pero tanto en Inglaterra como en el resto del mundo, el sistema educativo no está preparado para atender las necesidades específicas de este grupo poblacional, razón por la cual se ha buscado apoyo en diversas herramientas informáticas que buscan por mejorar las condiciones y calidad de vida de los pacientes. El problema con estas herramientas va más allá de la accesibilidad y el diseño Web y, aunque se afirma que pueden beneficiar a personas con otras diversidades, proporcionando la experiencia de los diferentes estilos de aprendizaje, al mismo tiempo pueden ayudar a crear barreras severas en los estudiantes con dislexia. En gran parte esto se debe a que la dislexia afecta las personas de maneras diferentes y en raras ocasiones se encuentran dos pacientes con los mismos síntomas. La mayoría de los estudiantes con dislexia tienen diferentes experiencias de aprendizaje y diversas necesidades, no obstante, la dislexia va asociada a un coeficiente intelectual normal o por encima de la media referencia [13].

Según Kalyvioti y Mikropoulos [14], las principales ayudas informáticas relacionadas con la dislexia se enfocan en tres áreas, que tienen como objetivo la evaluación, la intervención y la sensibilización de la dislexia. Específicamente, en relación con la

intervención, estas ayudas se centran en mejorar las habilidades viso-espaciales, habilidades de problemas no-verbales y la capacidad de memoria y rendimiento, no obstante, la mayoría de estas herramientas están enfocadas en optimizar los procesos de escritura y lectura. Algunas de las herramientas más comunes son:

- Theme Font & Size changer. Extensión que les permite a los usuarios con dislexia personalizar la fuente y el tamaño del texto de la interfaz de usuario de Firefox.
- Penfriend XL. Predice la siguiente palabra que los disléxicos quieren escribir.
- Color Explorer. Les permite a los usuarios adaptar el color de fondo y la combinación de fuentes en todos los documentos.
- ScreenRuler Suite. Permite dividir la pantalla para destacar o subrayar, cambiar color de fondo y contraste. Dispone de una regla de superposición para apoyar las tareas de lectura.

Otras ayudas son las aplicaciones de lectura que utilizan las tecnologías de conversión de texto a voz, por ejemplo, ReadingPenTS y DiTres. Un avance importante de ayuda para las personas con dislexia, relacionado con la informática, tiene que ver con las diversas directrices de accesibilidad que se han establecido en relación con el uso de la Web y materiales de *e-learning*. Existen tres principales proveedores de estándares relacionados con la accesibilidad Web:

- IMS Global Learning Consortium. Ha establecido normas para las necesidades y preferencias específicas de los estudiantes, ofreciéndoles una experiencia educativa inclusiva. La accesibilidad del grupo de trabajo IMS se centra en la adaptación o personalización de los recursos, interfaces y contenidos para satisfacer las necesidades individuales de los estudiantes. Mediante aplicaciones informáticas han elaborado directrices para el aprendizaje accesible [15].
- La Iniciativa de Accesibilidad Web (WAI). Tienen como misión guiar la Web hacia su máximo potencial para ser accesible, permitiéndoles a las personas con diversidad funcional tener una participación de igualdad en la Web [16].
- Section 508 Amendment to the Rehabilitation Act of 1973. Es una legislación de Estados Unidos que en realidad se trata de una enmienda a la ley Workforce Rehabilitation Act de 1973. La Section 508 exige que toda la tecnología electrónica y de la información que sea desarrollada o adquirida por las Agencias Federales, sea accesible a las personas con diversidad funcional [17].

2.4 La dislexia en los desarrolladores de software

Son pocos los estudios que se conocen relacionados con las incidencias de la dislexia en la capacidad de desarrollar software o aprender a programar. Powell et al [18] relacionan las características de la dislexia con las habilidades que se requieren para ser un buen programador de computadores y concluyeron que, a pesar que las manifestaciones de dislexia en cada individuo son diferentes, se puede generalizar que los programadores de computadores requieren una gran cantidad de habilidades lógicas y organizativas, combinadas con una expresión precisa de sintaxis. También afirman que dentro de las principales características que se han definido para un programador, sobresale la capacidad de comunicación y se ha identificado que cuando padecen de dislexia poseen problemas para desarrollarla.

En ese estudio se hizo uso del modelo de diseño de software planteado por Shigley y Mitchell [19], que establece los pasos para el diseño y resolución de un problema: reconocimiento de necesidades, definición del problema, síntesis, análisis,

implementación y evaluación. Se concluyó que en la programación se requieren habilidades que pueden ser fuertes en los programadores disléxicos. Esto puede ser cierto, porque analizando el desarrollo de software como un conjunto, se establece que las diversas actividades interactúan como si fuera una actividad holística y las personas con dislexia tienden a pensar de manera holística [20]. Sin embargo, se hace referencia a las diversas necesidades requeridas y que pueden ser contrarias a las presentadas comúnmente en las personas con dislexia, entre ellas la necesidad de dividir el problema en partes o componentes, visualizarlos de forma sistemática y el manejo de una secuencia lógica. De acuerdo con Hammond y Hercules [20], estos aspectos son procesos que difícilmente se encuentran en las personas con dislexia. En este estudio se resaltan las principales necesidades en ciertas etapas del desarrollo de software:

- Tareas relacionadas con la generación y corrección de código. Se afirma que los programadores con dislexia se ven más afectados por los rasgos negativos de su diversidad, por ejemplo, el manejo de nombres de variables, la falta de ortografía y de diversas reglas de sintaxis son perjudiciales para la programación, porque imponen una carga considerable en la memoria a corto plazo y que se establece como una deficiencia común en las personas con dislexia.
- Fase de implementación. Los investigadores establecen que no se puede dejar de lado la correcta estructura del programa, lo cual apunta a requerir habilidades de organización que pueden poner a un programador con dislexia en desventaja con sus compañeros.
- Fase de evaluación del producto. Se concluye que la principal necesidad está relacionada con las habilidades de organización y planificación.

3. Características de los adultos con dislexia

En los adultos con dislexia es casi imposible hacer generalizaciones al establecer sus características, pero Ingram [21] realizó un primer acercamiento a partir de los diferentes problemas que caracterizan a los niños con dislexia, los cuales se dividen en seis áreas:

- Problemas de lectura
- Problemas de escritura
- Problemas de conversación
- Problemas de memoria
- Problemas organizativos
- Problemas con las matemáticas

Después de estudiar cada problema de la clasificación y sus respectivos síntomas, Ingram definió tres categorías, en las que establece las principales dificultades que pueden manifestar las personas con dislexia. En la Figura 1 se puede observar la relación entre problemas y dificultades.



Figura 1. Relación Dificultad/Problema de la Dislexia [22]

En torno a esta relación, Haber [23] realizó un estudio en el que determina ciertas características de las personas adultas con dislexia las cuales se resumen en manifestación de diversos síntomas emocionales, conductuales y físicos:

1. Síntomas emocionales. Ansiedad, depresión, baja autoestima, angustia, tristeza, rabia, indefensión, irritabilidad, cambios frecuentes de humor, falta de concentración, dispersión y desconfianza.
2. Síntomas conductuales. Conductas de evasión para asistir al estudio o trabajo, conductas para llamar la atención, amenaza de suicidio, hiperactividad causada por la ansiedad, hipo actividad o no tener ganas de nada, agresividad, retraimiento, auto-aislamiento y compulsiones, tics o manías.
3. Síntomas físicos. Debilitación del sistema inmunológico, problemas gastrointestinales, taquicardias, sudoración, tensión muscular, insomnio, dificultad para levantarse por las mañanas, dolores de cabeza, migrañas, visión desordenada y fatiga, dificultad para tragar, problemas respiratorios, asma y alergias.

También existen características positivas que, orientadas adecuadamente, se convierten en habilidades diferenciadoras para el desarrollo de su vida profesional:

- Piensan usando todos los sentidos
- Usan imágenes para llegar a solucionar problemas de una forma más rápida
- Sienten mucha curiosidad por las cosas
- Son muy conscientes de su entorno
- Son creativos, intuitivos y poseen gran imaginación
- Utilizan procesos diferentes para acceder a la información

3.1 Características y necesidades de los programadores con dislexia

Con el objetivo de ayudar a determinar el perfil de los PCD y teniendo como insumo las dificultades y características de los adultos con dislexia, se construyó una encuesta como instrumento de recolección de información [24] y se aplicó a programadores de y estudiantes de programación, elegidos mediante un doble muestreo a conveniencia y de bola de nieve discrecional. Se tuvo en cuenta diversas variables divididas en grupos:

1. Variables Sociodemográficas. Se incluyeron género, edad y nacionalidad. Esta última específicamente porque el estudio fue realizado en su mayoría entre estudiantes y programadores de la Universidad Politécnica de Madrid (España) y el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid (Colombia).
2. Variables de comportamiento. En este grupo se incluyeron todos los síntomas definidos por Haber [23] para los adultos con dislexia, que fueron enunciados y clasificados como: emocionales, conductuales y físicas.
3. Variables de programación. Se indagó acerca del uso y preferencias de diferentes lenguajes de programación, tanto visuales como textuales, al igual que aspectos relacionados con comportamientos específicos a la hora de programar.
4. Variables específicas. Exclusivas para los PCD y relacionadas con las principales dificultades a la hora de programar.

4. Resultados

La muestra se conformó con 315 programadores, con una edad media de 24,6 años, edad mínima de 16 años y máxima de 59 años, de los cuales el 49,2% son españoles (n=155), el 45,4% colombianos (n=143), el resto pertenecía a otras nacionalidades

(n=17). La muestra contenía un 19% de mujeres y un 81% de hombres. Es de resaltar que, del total de encuestados, el 12,4% creen tener dislexia (n=39), conservándose casi la misma proporción de hombres y mujeres. En la Figura 2 se muestra la distribución por género de los programadores con dislexia. Como se observa, los 39 programadores con dislexia son de nacionalidad colombiana y española, razón por la cual el análisis de resultados se realizó únicamente con los datos de estos dos países.

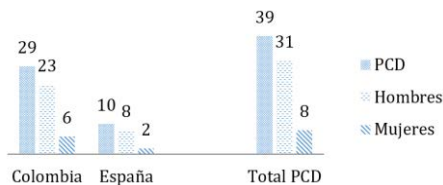


Figura 2. Distribución por género programadores con dislexia

4.1 Resultados para España

- Variables sociodemográficas. Se establece que el 6,45% de los programadores encuestados (n=10), han sido diagnosticados como disléxicos por un profesional o creen tener dislexia. Se presenta una edad media de 22 años con una mínima de 20 y una máxima de 44. Del total de los programadores españoles con dislexia, el 20% eran mujeres y el 80% hombres, conservándose casi la misma proporción hallada para el total de la encuesta.
- Variables de comportamiento. En una escala Likert puntuada de 1 a 5 (1 como totalmente en desacuerdo y 5 como totalmente de acuerdo) con el fin de perfilar los programadores con dislexia, se analizaron 34 variables entre emocionales, conductuales y físicas. Se agruparon los valores 1 y 2 de los datos obtenidos para establecer el nivel de desacuerdo y los valores 4 y 5 para establecer el nivel de acuerdo. En el análisis, un dato se considera relevante cuando el porcentaje de uno de los valores agrupados está por encima del 50%. Los porcentajes más relevantes, relacionados con las variables emocionales, se presentan en la Tabla 1, con las variables conductuales en la Tabla 2 y con las variables físicas en la Tabla 3.

Tabla 1. Porcentajes más relevantes variables emocionales (España)

Variable	PCD n = 10		PSD n = 145	
	1-2	4-5	1-2	4-5
Cuando programo, me considero ansioso(a)	20,0%	70,0%	37,9%	29,6%
Cuando programo sufro de baja concentración	80,0%	10,0%	68,3%	17,2%
Cuando estudio me disperso fácilmente	40,0%	60,0%	29,7%	50,3%
Presento con frecuencia cambios de humor	50,0%	40,0%	61,3%	22,1%
Sufro con frecuencia de depresión	90,0%	0,0%	78,7%	7,6%
Con frecuencia me siento triste	50,0%	10,0%	71,7%	12,4%
Con frecuencia sufro de episodios de irritabilidad	40,0%	40,0%	61,4%	19,3%
Ante ciertas circunstancias me considero indefenso(a)	40,0%	20,0%	55,2%	21,4%
Poseo baja autoestima	60,0%	20,0%	60,7%	17,3%

Tabla 2. Porcentajes más relevantes variables conductuales (España)

Variable	PCD n = 10		PSD n = 145	
	1-2	4-5	1-2	4-5
En mi etapa de colegio con frecuencia recurría a diferentes excusas para no asistir a clases	80,0%	20,0%	86,2%	5,5%
Utilizo con frecuencia excusas para no asistir al trabajo o universidad	80,0%	10,0%	83,5%	5,5%
Con frecuencia utilizo conductas para llamar la atención	70,0%	30,0%	85,5%	4,2%

Me considero una persona agresiva	80,0%	20,0%	83,5%	4,2%
Me considero una persona retraída	90,0%	10,0%	67,6%	17,2%
Me considero compulsivo	50,0%	40,0%	55,2%	19,3%
Me gusta estar aislado de los demás	60,0%	10,0%	62,1%	20,7%
Me considero una persona hiperactiva	40,0%	50,0%	64,8%	14,5%
Me considero ansioso(a)	40,0%	60,0%	57,2%	23,4%

Tabla 3. Porcentajes más relevantes variables físicas (España)

Variable	PCD n = 10		PSD n = 145	
	1-2	4-5	1-2	4-5
Con frecuencia padezco de insomnio	80,0%	10,0%	68,3%	19,3%
Tengo dificultad para levantarme por las mañanas	40,0%	50,0%	29,7%	55,2%
Sufro de continuos dolores de cabeza - migrañas	70,0%	10,0%	78,7%	12,4%
Padezco de visión desordenada (identifico figuras y/o letras al revés)	70,0%	30,0%	95,9%	1,4%
Con frecuencia me siento fatigado	40,0%	40,0%	66,2%	15,1%

- Variables de programación. Del total de encuestados en España, el 20,65% de los programadores (n=32) han programado alguna vez en un lenguaje visual. De ellos, el 9,38% (n=3) corresponde a PCD y el 90,62% (n=29) a PSD. Con estos 32 programadores se evaluaron diversas variables de la programación visual en contraste con la programación textual. Se utilizó una escala semántica diferencial de 1 a 7: 1 puntuación más alta para lenguaje visual, 3 puntuación más baja para lenguaje visual, 5 puntuación más baja para lenguaje textual y 7 puntuación más alta para lenguaje textual. Para perfilar los programadores con dislexia, se agruparon los valores 1, 2 y 3, para establecer el nivel de inclinación por la programación visual, y 5, 6 y 7 por la textual. La Tabla 4 muestra los valores más relevantes.

Tabla 4. Porcentajes más relevantes las variables de programación (España).

Variable	PCD n = 3		PSD n = 29	
	1-2-3	5-6-7	1-2-3	5-6-7
A la hora de programar prefiero un lenguaje de programación...	66,7%	33,3%	24,1%	58,5%
Considero que trabajo más a gusto en un lenguaje...	66,7%	33,3%	34,4%	51,7%
Programo más rápido en un lenguaje de programación...	66,7%	33,3%	48,2%	37,9%
Considero que cometo más errores al trabajar en un lenguaje de programación...	33,3%	66,7%	48,2%	37,9%
Me siento más seguro al trabajar en algunos lenguajes de programación...	33,3%	33,3%	31,0%	44,8%

- Variables específicas. Se halló que el 20% de los 10 PCD (n=2) han sido diagnosticados profesionalmente como disléxicos, pero ninguno ha recibido algún tratamiento o ayuda específica al respecto. El 40% de los que creen tener dislexia o que han sido diagnosticados por un profesional (n=4), consideran que la dislexia afecta negativamente su desempeño como programadores. En la Tabla 5 se observan las principales dificultades que manifestaron los programadores a la hora de desarrollar software, su frecuencia y el porcentaje con relación al total de los PCD.

Tabla 5. Dificultades de los PCD a la hora de programar (España)

Dificultad	Frecuencia	Porcentaje
Concentración	1	10,0%
Confusión de comandos	1	10,0%
Identificar el problema	2	20,0%
Diseño de solución	1	10,0%

Distracciones	1	10,0%
Entender el código escrito por otros	1	10,0%
Frustración	1	10,0%
Transposición de letras, problemas al leer o escribir	2	20,0%
Lógica	1	10,0%
Manejo de sintaxis específicas	1	10,0%
Manejo del Tiempo.	1	10,0%
Perdida de la línea de pensamiento	1	10,0%
Recordar el código recién escrito	1	10,0%
Seguir secuencia de un código "desordenado"	1	10,0%
Transmitir ideas	1	10,0%
Ubicación en una línea específica del texto	1	10,0%

4.2 Resultados para Colombia

- Variables sociodemográficas. Se estableció que el 20,28% de los programadores encuestados (n=29) han sido diagnosticados como disléxicos por un profesional o creen tener dislexia. En ellos se encontró una edad media de 25 años, una mínima de 20 y una máxima de 51. De total de los programadores con dislexia, el 21% eran mujeres y el 79% hombres, conservándose casi la misma proporción hallada para el total de la encuesta.
- Variables de comportamiento. Para el análisis de esta muestra se utilizó una escala Likert con las mismas características mencionadas anteriormente. Los porcentajes más relevantes relacionados con el subgrupo de las variables emocionales se presentan en la Tabla 6, para las conductuales en la Tabla 7 y para las variables físicas en la Tabla 8.

Tabla 6. Porcentajes más relevantes variables emocionales (Colombia)

Variable	PCD n = 29		PSD n = 155	
	1-2	4-5	1-2	4-5
Cuando programo, me considero ansioso(a)	10,3%	55,2%	33,3%	41,2%
Cuando programo, con frecuencia me siento angustiado(a)	41,4%	44,8%	52,6%	22,8%
Cuando programo me da rabia con frecuencia	48,3%	34,5%	57,0%	25,4%
Cuando programo sufro de baja concentración	41,4%	41,4%	63,2%	19,3%
Cuando estudio me disperso fácilmente	17,2%	65,5%	36,0%	37,7%
Presento con frecuencia cambios de humor	55,2%	31,0%	58,8%	21,9%
Sufro con frecuencia de depresión	69,0%	10,3%	74,6%	10,5%
Con frecuencia me siento triste	62,1%	13,8%	71,9%	10,5%
Con frecuencia sufro irritabilidad	51,7%	20,7%	64,9%	14,0%
Ante ciertas circunstancias me considero indefenso(a)	51,7%	17,2%	57,0%	17,5%
Poseo baja autoestima	62,1%	13,8%	80,7%	12,3%

Tabla 7. Porcentajes más relevantes variables conductuales (Colombia)

Variable	PCD n = 29		PSD n = 155	
	1-2	4-5	1-2	4-5
En mi etapa de colegio con frecuencia recurría a diferentes excusas para no asistir a clases	75,9%	13,8%	86,8%	6,1%
Utilizo con frecuencia excusas para no asistir al trabajo o universidad	86,2%	3,4%	93,0%	1,8%
Utilizo conductas para llamar la atención	89,7%	0,0%	86,8%	5,3%
Me considero una persona agresiva	89,7%	3,4%	77,2%	7,9%
Mi agresividad me afecta a la hora de programar *	100,0%	0,0%	77,8%	11,1%
Me considero una persona retraída	58,6%	24,1%	71,9%	14,0%
Ser retraído me afecta a la hora de programar *	42,9%	42,9%	62,5%	12,5%
Me considero compulsivo	55,2%	10,3%	75,4%	11,4%
El ser compulsivo me afecta a la hora de programar *	66,7%	0,0%	33,0%	25,0%

Me gusta estar aislado de los demás	41,4%	44,8%	54,4%	25,4%
El estar aislado de los demás me afecta a la hora de programar *	61,5%	38,5%	65,5%	27,6%
Me considero una persona hiperactiva	58,6%	20,7%	64,0%	19,3%
Mi hiperactividad me afecta a la hora de programar *	66,7%	33,3%	50,0%	40,9%

* relacionadas únicamente con las respuestas 4 y 5 de la pregunta.

Tabla 8. Porcentajes más relevantes variables físicas (Colombia)

Variable	PCD n = 29		PSD n = 155	
	1-2	4-5	1-2	4-5
Con frecuencia padezco de insomnio	41,4%	41,4%	58,8%	25,4%
Tengo dificultad para levantarme por las mañanas	41,4%	51,7%	38,6%	45,6%
Sufro de continuos dolores de cabeza - migrañas	69,0%	27,6%	70,2%	17,5%
Padezco de visión desordenada (identifico figuras y/o letras al revés)	51,7%	34,5%	87,7%	2,6%
Con frecuencia me siento fatigado	27,6%	48,3%	50,9%	26,3%

- Variables de programación. Se encontró que el 29,37% de los encuestados (n=42) han programado alguna vez en un lenguaje de programación visual. Entre ellos, el 19,05% (n=8) son PCD y el 80,95% (n=34) son PSD. Con estos 42 programadores se evaluaron diversas variables de la programación visual en contraste con la textual, utilizando el mismo método de interpretación de los datos que con la muestra española. Los porcentajes más relevantes se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Porcentajes más relevantes variables de programación (Colombia)

Variable	PCD n = 8		PSD n = 34	
	1-2-3	5-6-7	1-2-3	5-6-7
A la hora de programar prefiero un lenguaje ...	12,5%	75,0%	38,2%	59,9%
Considero que trabajo más a gusto en un lenguaje ...	12,5%	75,0%	44,1%	44,1%
Programo más rápido en un lenguaje ...	25,0%	50,0%	41,2%	47,1%
Considero que cometo más errores al trabajar en un lenguaje ...	37,5%	37,5%	41,2%	14,7%
Me siento más seguro al trabajar en algunos lenguajes ...	0,0%	62,5%	29,4%	41,2%

- Variables específicas. Se encontró que solamente el 3,4% de los 29 PCD (n=1) ha sido diagnosticado profesionalmente como disléxico, pero ninguno ha recibido tratamiento o ayuda específica al respecto, lo cual permite inferir el desconocimiento sobre esta alteración y la falta de un manejo adecuado. El 48,3% que creen tener dislexia o han sido diagnosticadas por un profesional (n=14), consideran que afecta negativamente su desempeño como programadores. La Tabla 10 detalla las principales dificultades que manifestaron tener estas personas a la hora de programar, su frecuencia y el porcentaje con relación al total de los PCD.

Tabla 10. Principales dificultades a la hora de desarrollar software (Colombia)

Dificultad	Frecuencia	Porcentaje
Ansiedad	1	3,4%
Cansancio	2	6,9%
Concentración	2	6,9%
Confusión de comandos	3	10,3%
Identificar el problema	1	3,4%
Diseño de solución	2	6,9%
Distracciones	3	10,3%
Falta de dedicación	1	3,4%
Frustración	1	3,4%
Ganas de hacer nada	1	3,4%
Transposición de letras, problemas al leer o escribir	3	10,3%

Lógica	1	3,4%
Manejo de sintaxis específicas	2	6,9%
Manejo del Tiempo	1	3,4%
Motivación	1	3,4%
Perdida de la línea de pensamiento	3	10,3%
Pereza	1	3,4%
Recordar el código recién escrito	3	10,3%

Al conjunto de las dos muestras se le aplicó una prueba de Chi cuadrado a la variable *¿Cree tener dislexia? sí o no*, asociado con todas las variables de comportamiento, encontrándose que se da una asociación estadísticamente significativa en las siguientes variables:

- Ansiedad al programar (p = 0,028)
- Estado de depresión (p = 0,023)
- Excusas para no asistir a clase (p = 0,027)
- Hipo actividad al programar (p = 0,003)
- Estado de fatiga frecuente (p = 0,005)
- Visión desordenada (p = 0,000)

Estadísticamente, esta asociación establece una relación que refleja las variables que influyen realmente en la presencia o no de dislexia en la población estudiada.

5. Análisis y discusión

En la muestra total, el 12,4% de los programadores afirma creer tener dislexia, lo que está por encima de las cifras de prevalencia mundiales, pero el 6,45% reportado en España es inferior a los porcentajes de prevalencia que fueron registrados para las áreas de Murcia e islas Canarias, mientras que el 20,28% reportado en Colombia es superior a los porcentajes de prevalencia registrados en las ciudades de Barranquilla y Bogotá.

Contrario a lo que plantea Shaywitz [25] acerca de que los adultos con dislexia se caracterizan por tener fuertes síntomas de baja autoestima, desconfianza y sentirse indefensos ante ciertas circunstancias de la vida, el resultado de estas variables, tanto en la muestra española como en la colombiana, no refleja datos significativos para que se puedan establecer como una característica de los PCD. Según lo anterior y después de observar los resultados arrojados por la prueba de Chi cuadrado, se ratifica que estas variables emocionales no ayudan a definir el perfil del PCD.

En los resultados relacionados con las variables de programación, específicamente la muestra colombiana, deja ver que la preferencia, rapidez en el uso y sentirse más a gusto con los lenguajes de programación textual, contradicen lo manifestado por Dixon [4], quien demostró que los PCD que trabajan herramientas de programación, con ayudas visuales o gráficas, son un 20% más hábiles en el desarrollo y seguimiento de programas de cómputo que los PSD. Sin embargo, se observa que los PCD cometen menos errores que los PSD al trabajar en un lenguaje de programación visual. En contraste con lo anterior, los datos obtenidos en la muestra española, con relación a las variables de preferencia, sentirse más a gusto y rapidez al programar, permiten suponer que el los PCD españoles son 33,4% más hábiles en el desarrollo y seguimiento de programas de cómputo bajo entorno visual, resultado que corrobora las hipótesis planteadas por Dixon.

La Figura 3 resume las dificultades más relevantes de los PCD distribuidos en los dos países, en la que se observa que, en los programadores colombianos, la confusión de comandos, la transposición de letras, la pérdida de la línea del pensamiento y recordar el

código recién escrito, son las dificultades que se presentan con mayor frecuencia (f=3). En relación con los programadores españoles, las dificultades con mayor frecuencia son la identificación del problema y la transposición de letras al leer o escribir (f=2). Esto corrobora las hipótesis de Dixon [4] y Powell et al. [17] relacionadas con las particularidades de los PCD.

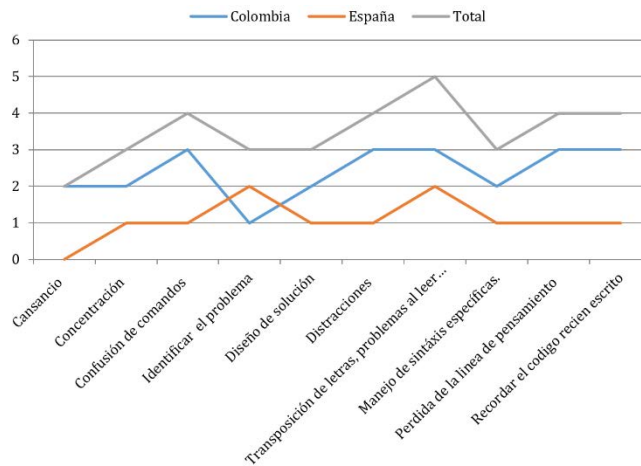


Figura 3. Principales dificultades de los programadores con dislexia

Luego de analizar las variables relevantes en los PCD y de las dificultades que estos manifiestan tener a la hora de programar, se establece que no todas las características emocionales, conductuales y físicas, propuestas por Shaywitz, son relevantes en la definición del perfil del PCD. Sin embargo, se pueden establecer algunas características que sobresalen en ellos y que ayudan a definir el perfil del programador de computadores con dislexia:

1. Variables emocionales

- Ansiosos al programar
- Dispersión con facilidad al programar
- Poseen buena concentración
- No sufren de episodio frecuentes de depresión

En este subgrupo los resultados de la encuesta, para las dos primeras variables, son acordes con las características de los adultos disléxicos, mientras que las variables concentración y presencia de episodios de depresión son totalmente opuestas a las definidas para ellos.

2. Variables conductuales

- Ansiedad general
- Distracción general
- No les gusta llamar la atención
- No son retraídos
- Buen grado de responsabilidad
- Personas relativamente calmadas, no son agresivos

Al igual que lo reflejado en las variables emocionales, los resultados arrojados para las dos primeras variables son acordes con las características de los adultos disléxicos, mientras que, llamar la atención, ser retraídos, responsabilidad y agresividad, son totalmente opuestas a las definidas.

3. *Variables físicas*

- Transposición de letras al leer o escribir
- Deficiencia en la memoria a corto plazo
- Tienen a no sufrir de insomnio

Los resultados de las variables transposición de letras y deficiencia en la memoria a corto plazo, continúan siendo unas características relevantes para la definición del perfil del PCD, acorde con lo definido para los adultos con dislexia, mientras que la variable insomnio es totalmente opuesta a las definidas.

4. *Variables de programación*

- Dificultad para la identificación del problema
- Confusión de comandos y manejo de sintaxis específicas

Estas variables son acordes con la literatura encontrada.

6. Conclusiones

La diferencia de porcentajes de prevalencia de la dislexia en Colombia, entre los datos hallados en el presente estudio y los reportados en los antecedentes, se atribuye a que estos últimos corresponden a una población infantil, lo que afianza la hipótesis de que la dislexia en los adultos es una diversidad olvidada.

En términos generales, los programadores con dislexia cometen menos errores al programar en un lenguaje de programación visual.

El porcentaje de 33.4% que establece mejor desempeño y mayores habilidades en el desarrollo y seguimiento de programas de cómputo bajo un entorno visual para los PCD españoles, corrobora las hipótesis de Dixon [4] y fundamentan la propuesta de realizar un modelo para la transformación de código bidireccional textual-visual, que les ayude a los programadores con dislexia.

7. Trabajos futuros

Teniendo en cuenta que los programadores colombianos con dislexia no tienen preferencia por la programación visual, aspecto que contradice lo planteado por Dixon [4], se hace necesario realizar un estudio más específico, para determinar qué factores son los que influyeron en la diferencia de los resultados y determinar si existe alguna particularidad que influya en ellos. Con el objetivo de mitigar las diferencias de desempeño en el trabajo interactivo de los programadores, se propone el diseño de un modelo que permita la transformación bidireccional de código visual y texto en un lenguaje de programación, para desarrollar software bajo una sola interfaz que interactúa entre estos dos, ayudando a los PCD a interactuar con sus compañeros de equipo.

Referencias

- [1] ONU (2014). [Convention on the Rights of Persons with Disabilities](#). Online [May 2016].
- [2] IDA (2002). [Definition of dyslexia](#). International Dyslexia Association. Online [May 2016].
- [3] Romañach, J. & Lobato, M. (2005). [Diversidad Funcional, nuevo término para la lucha por la dignidad en la diversidad del ser humano](#). Foro de visa independiente y divertad. Online [Apr 2016].
- [4] Dixon, M. (2007). [Comparative Study of Disabled vs. Non-disabled Evaluators in User-Testing: Dyslexia and First Year Students Learning Computer Programming](#). Lecture Notes in Computer Science 4554, pp. 647-656.

- [5] Everatt, J. et al. (2004). [Issues in the assessment of literacy-related difficulties across language backgrounds: A cross-linguistic comparison](#). *Journal of Research in Reading* 27(2), pp. 141-151.
- [6] Lyon, G., Shaywitz, S. & Shaywitz, B. (2003). [Defining Dyslexia, Comorbidity, Teachers' Knowledge of Language and Reading](#). *Annals of Dyslexia* 53(1), pp. 1-14.
- [7] Katusic, S. et al. (2001). [Incidence of reading disability in a population-based birth cohort, 1976-1982, Rochester, Minn.](#) *Mayo Clinic Proceedings* 76(11), pp. 1081-1092.
- [8] Carrillo, M. et al. (2011). [Evaluación de la dislexia en la escuela primaria: Prevalencia en español](#). *Escritos de Psicología* 4(2), pp. 35-44.
- [9] Jiménez, J. et al. (2009). [Prevalencia de las dificultades específicas de aprendizaje: La dislexia en español](#). *Anales de Psicología* 25(1), pp. 78-85.
- [10] De los Reyes, A. et al. (2008). [Estudio de prevalencia de dificultades de lectura en niños escolarizados de 7 años de Barranquilla \(Colombia\)](#). *Psicología desde el Caribe* 22, pp. 37-49.
- [11] Pardo, N. (2015). [Prevalencia del trastorno específico de la lectura en una muestra de instituciones educativas de la localidad 19 de Bogotá](#). Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia.
- [12] Fuertes, J., González, L. & Martínez, L. (2016). [Characterization of Programmers with Dyslexia](#). *Lecture Notes in Computer Science* 9759, pp. 339-342.
- [13] Alsobhi, A. & Abeyasinghe, G. (2013). [An evaluation of accessibility of e-learning for dyslexic students](#). In *International Conference on Current Trends in Information Technology*. Dubai, United Arab Emirates.
- [14] Kalyvoti, K. & Mikropoulos, T. (2014). [Virtual Environments and Dyslexia: A literature review](#). *Procedia Computer Science* 27, pp. 138-147.
- [15] IMS Global (2014). [IMS App Note: Enhancing Accessibility Through IMS Global Learning Standards](#). Online [May 2016].
- [16] W3C (2005). [Introduction to Web Accessibility Initiative](#). Online [Jun 2016].
- [17] Section 508 (1998). [Section 508 of the Rehabilitation Act](#). Online [Jun 2016].
- [18] Powell, N. et al. (2004). [Dyslexia and learning computer programming](#). *Innovation in Teaching and Learning in Information and Computer Sciences* 36(3), pp. 1-12.
- [19] Shigley, J. & Mitchell, L. (1993). [Mechanical Engineering Design](#). New York: McGraw-Hill.
- [20] Hammond, J. & Hercules, F. (2013). [Understanding dyslexia an introduction for dyslexic students in higher education](#). Jill Hammond and Ruth MacPherson: Glasgow.
- [21] Ingram, T. (1964). [The dyslexic child](#). *The Practitioner* 192, pp. 503-516.
- [22] Alsobhi, A., Khan, N. & Rahanu, H. (2014). [Toward Linking Dyslexia Types and Symptoms to the Available Assistive Technologies](#). In *14th International Conference Anonymous Advanced Learning Technologies*. Athens, Greece.
- [23] Haber, N. (2019). [La dislexia en la etapa adulta](#). *CINC B*, pp. 421-424.
- [24] González, L. (2016). [Encuesta Tesis Doctoral: Transformación bidireccional de código de software visual y texto, para mitigar los efectos de la dislexia en el desarrollo de software](#). UPM.
- [25] Shaywitz, S. (1996). [Dyslexia](#). *Scientific American* 275(5), pp. 98-104.



Desarrollo e Innovación en Ingeniería (Primera Edición)

Es un libro resultado de investigación y producto de divulgación de un grupo internacional de autores motivados por aportar al desarrollo de la Ingeniería. El contenido de los capítulos se distribuye a través de una serie de importantes disciplinas ingenieriles. El objetivo de esta edición es entregarle a la comunidad los más reciente avances de la investigación y el desarrollo en esta área del conocimiento.

Editorial
Instituto Antioqueño de Investigación