



Universidad
de La Laguna

TESIS DOCTORAL

**CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE
TÉCNICAS SELF ORGANIZING & SELF
OPTIMIZING NETWORKS PARA REDES DE
COMUNICACIONES MÓVILES LTE**

Autor: David Ortega Sicilia

Director: Antonio Sedeño Noda (ULL)

Codirector: Francisco Cabrera Almeida (ULPGC)

Octubre 2015

Dr. Don Antonio Sedeño Noda, con DNI 45439024V,
profesor del Departamento de Matemáticas, Estadística e
Investigación Operativa de la Universidad de La Laguna,

Dr. Don Francisco Cabrera Almeida, con DNI 43757457A,
profesor del Departamento de Señales y Comunicaciones
de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria,

CERTIFICAN:

Que la presente memoria titulada: “**Contribución al estudio de técnicas Self Organizing & Self Optimizing Networks para redes de comunicaciones móviles LTE**”, ha sido realizada bajo nuestra dirección por **D. David Ortega Sicilia**, y que constituye su Tesis para optar al grado de Doctor por la Universidad de La Laguna.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente y a los efectos que haya lugar, firmamos el presente en La Laguna a veintiocho de Septiembre de 2015.



Fdo: Antonio Sedeño Noda



Fdo: Francisco Cabrera Almeida

“Hay que ser apasionado en la búsqueda de resultados,
pero no en la interpretación de los mismos”

Margarita Salas

“Los telecos conocemos muy bien el ruido. La historia de las telecomunicaciones ilustra la permanente y despiadada contienda que mantenemos con él: enseña, también, las tácticas adoptadas en la conquista del tiempo y de los espacios para proteger la información (hasta aprendimos a enmascararla para que el ruido interprete que es de los suyos sin maltratarla)”

Javier Domínguez

Agradecimientos

En esta página quiero dar las gracias a todas aquellas personas que han contribuido de alguna manera en esta Tesis, bien de forma directa en el propio trabajo de investigación, ensayos y experimentos, o de forma indirecta con su apoyo en un aspecto más bien espiritual. La mayoría de ellas las nombraré a continuación siguiendo un orden cualquiera, pero en tres grupos diferenciados. Aún así, es probable que me olvide de alguien.

En el grupo académico, doy las gracias a mi director Antonio Sedeño, codirector Francisco Cabrera y tutor del programa de doctorado Alejandro Ayala, por su apoyo, esfuerzo y horas de trabajo dedicadas para que esta Tesis haya sido una realidad. Por parte de la UPM, a Rafael Herradón Díez y José María Hernando Rábanos porque tutelaron mi Plan de Carrera de Formación de Experto en Técnicas Automáticas de Optimización de redes UMTS, que fue el motivo principal por el que decidí continuar mi investigación en este campo. Por la UPC, agradezco a Mario García Lozano la información y los trabajos que me envió relacionados con la optimización de rede móviles UMTS y LTE. Y también a Patricia Cordero de la ULPGC por su trabajo con la clasificación de colindancias.

Por parte de Telefónica, en primer lugar doy las gracias a David Molina López porque me pidió que entrara a formar parte del grupo Telefónica para diseñar la red de telefonía móvil en la provincia de Santa Cruz de Tenerife. A Cayetano Lluch Mesquida por confiar en mi y seleccionarme para participar en los Planes de Carrera con la UPM mencionados en el párrafo anterior, y a Santiago Torres por acompañarme en ese trabajo. También agradezco a Jordi Fera, Toni Henríquez, Rafael López y Felipe Santana su apoyo y esfuerzo en lograr la autorización para que, una vez concluido el trabajo con la UPM, siguiera avanzando en mi trabajo de investigación que tuviera como objetivo obtener alguna mejora en el servicio de telefonía móvil en redes con elevada interferencia y complejidad. En este sentido, agradezco el apoyo de Willy, Alfred y Pedro Viña por ayudarme a realizar medidas, y a Javier Beltrán y Fabiola Torres por su colaboración en las pruebas realizadas en la red. Y como no, a ese gran equipo de personas y grandes profesionales de Ingeniería Radio de Telefónica Móviles: Daniel Paúl, Miguel Ángel Díaz Guerra, Luis Llopis, José Manuel Álvarez Díez, Marco Antonio Jimeno Batuecas, Luis Fernando Ruiz de la Cruz, etc. Por parte de Telefónica I+D, a Beatriz Solana e Ignacio Berberana por la ayuda prestada en técnicas automáticas de optimización (SON).

En la parte espiritual, le doy las gracias a mi madre, a mi mujer Paula (me siento afortunado por haberla conocido) y a mis dos hijas María y Marta porque son lo más importante de mi vida. A John Michael Murray por su ayuda en la traducción al inglés de textos y artículos. No me puedo olvidar tampoco de mi profesora de yoga Liliana Quilaleo, quien me ha enseñado a ver la vida de otra manera (*yo quiero, yo puedo*). Y también: a mi primo Marcos López, de la Vega Lagunera, por compartir unas clases, *allá en la calabacera*. Por último, quiero agradecer al compositor Tchaikovsky, cuya obra maestra El Lago de Los Cisnes me ha acompañado durante mis largas horas de elaboración de este documento.

Resumen

En este trabajo se presentan estudios teóricos sobre las características de las estructuras celulares empleadas en las redes de comunicaciones móviles, donde se realiza un énfasis especial en la interferencia y el sobrealcance como principal elemento limitador de cobertura, capacidad y velocidad de datos. También se detallan las tendencias actuales de los diferentes métodos de optimización y se muestra una serie de casos prácticos llevados a cabo en la red UMTS de Telefónica, de la que se obtienen resultados extrapolables al sistema LTE. Como solución a las limitaciones de una red real frente a los diseños teóricos, se propone en esta Tesis un algoritmo ANR (Automatic Neighbour Relation) para la generación de listas de colindancias que optimizan los trasposos entre células, logrando un aumento del número de llamadas cursadas a la vez que se reducen las llamadas caídas o interrumpidas en el enlace radio.

Los modelos de propagación muestran las diferencias en las pérdidas en espacio libre respecto de entornos urbanos complejos, así como los efectos que produce la movilidad de los terminales en la caracterización del canal móvil. Esta particularidad tiene especial relevancia en los escenarios heterogéneos con usuarios donde la comunicación se realiza mediante propagación casi libre, frente a otros donde la señal les llega muy atenuada y distorsionada tras múltiples reflexiones.

La búsqueda de una solución óptima que ofrezca buena cobertura, calidad y capacidad al menor coste, resulta en este caso una tarea muy compleja, por lo que es necesario el estudio de las diferentes líneas de investigación que hay en esta materia. Además, la llegada del LTE lleva consigo un abaratamiento y simplificación de la estructura de red, que incluye la automatización de las tareas de optimización. Consensuado en diferentes foros y proyectos internacionales, se describe en esta tesis los *casos de uso* más habituales así como los algoritmos y métodos de varios autores.

Para evaluar las características de los escenarios de pruebas se realizaron medidas, análisis y simulaciones, empleando métodos innovadores con el objeto de obtener una caracterización del sistema ante situaciones de elevada interferencia. En una primera fase se aplicaron modificaciones en la configuración de células aisladas, con el objeto de comprobar la dependencia mutua que existe entre todas las células. Con este procedimiento se demostró que en escenarios densos, no es posible optimizar el rendimiento de una célula o estación base sin producir efectos en las células de su entorno.

Con las conclusiones de las pruebas anteriores se diseñó un novedoso algoritmo ANR que propone diferentes listas de colindancias en función de unas condiciones de partida. Las medidas de potencia e interferencia obtenidas por los terminales mediante un traceo mostraban valores muy dispersos y en ocasiones contrarios. Esto dificulta la selección de la mejor célula colindante a la que realizar un trasposo cuando los abonados se desplazan. El algoritmo es capaz de combinar la mejor opción para una zona de la red muy amplia con elevada interferencia, lo que supone una mejora considerable respecto de los métodos habituales de definición de colindancias.

El algoritmo diseñado se aplicó en la red UMTS de Telefónica que se encuentra en el Valle de la Orotava, e incluye las poblaciones del Puerto de la Cruz, La Orotava y Los Realejos. Por la orografía del valle y la dispersión de la población, los niveles de interferencia y sobrealcance son mayores que en un escenario urbano habitual, por lo

que las prestaciones de la red son menores. Con el método propuesto se obtuvo un aumento del total de llamadas cursadas con éxito, y se redujo el número de llamadas caídas o interrumpidas.

Summary

In this work we present theoretical studies on the characteristics of the cellular structures employed in the mobile communications networks, where there is a special emphasis on the interference and over reach like main limiting element of coverage, capacity and data rate. It also details the current trends of the different methods of optimization and shown a series of case studies carried out in the UMTS network of Telefónica, the results can be extrapolated to the LTE system. As a solution to the constraints of a real network compared to the theoretical designs, it is proposed in this thesis an ANR algorithm (Automatic Neighbour Relation) for the generation of neighbour lists which optimize the transfer between cells, achieving an increase in the number of completed calls and reduce the dropped calls or interrupted in the link radio

Propagation models show the differences in free space loss with respect to complex urban environments, as well as the effects that produces the mobility of terminals in the characterization of the mobile channel. This feature is especially relevant in the heterogeneous scenarios with users where the communication is done through almost free spread, against others where the signal reaches them very attenuated and distorted after multiple reflections.

The search for an optimal solution that offers good coverage, quality and capacity at the lowest cost, it is in this case a very complex task, so it is necessary to study the different lines of research in this area. In addition, the arrival of the LTE brings with it a cheaper and simplification of network structure, which includes the automation of the tasks of optimization. Consensus in different international forums and projector, described in this thesis the use cases and the most common algorithms and methods from several authors.

To evaluate the characteristics of the test scenarios, measurements analysis and simulations were realized using innovative methods in order to obtain a characterization of the system in situations of high interference. In a first phase were implemented changes to the configuration of isolated cells, with the purpose of checking the mutual dependence that exists between all cells. With this procedure it was demonstrated that in dense scenarios, it is not possible to optimize the performance of a cell or base station without produce effects on the environment cells.

With the conclusions of the previous tests there was designed a novel ANR algorithm that proposes different neighbor lists according to a set of constrains. Power measurements and interference obtained by a call traced tool, showed values very scattered and sometimes opposite. This makes difficult the selection of the best adjacent cell to complete a handover when the subscribers move. The algorithm is capable of combining the best option for a very wide area of the network with high interference, which represents a considerable improvement over the usual methods of neighbor list definition.

Designed algorithm applied in the UMTS network of Telefónica, which is located in the Valle de la Orotava, and includes the towns of Puerto de la Cruz, La Orotava and Los Realejos. By the topography of the valley and the dispersion of the population, levels of interference and overreach are greater than in a normal urban scenario, so the net performance are lower. With the proposed method was obtained an increase in the total number of successfully calls, and reduced the number of dropped or interrupted calls.

Antecedentes de la Tesis

Durante la primera década del siglo XXI se llevaron a cabo en Telefónica Móviles unos Planes de Formación para Expertos, promovidos por el entonces Director D. Cayetano Lluch Mesquida, en los que varios empleados desarrollaron trabajos de investigación con el departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones de la Universidad Politécnica de Madrid, a cargo del catedrático D. José María Hernando Rábanos, en el que también colaboraron los profesores D. Rafael Herradón Díez y D. Florentino Jiménez Muñoz, obteniendo como resultado un grupo de expertos en materias específicas de Comunicaciones Móviles para las tecnologías GSM y UMTS, ofreciendo así un gran servicio de consultoría de ámbito interno en Telefónica Móviles. En estos planes de formación se investigó, entre otras materias, sobre la cobertura marítima, cobertura en túneles, cobertura en trenes de alta velocidad, subsistemas radio, aseguramiento del QoS, y técnicas automáticas de optimización del que fue uno de sus partícipes el autor de esta Tesis. De toda la experiencia acumulada se publicaron artículos que se presentaron en diversos congresos nacionales e internacionales.

Como es habitual en todos los trabajos de investigación, quedaron líneas abiertas que junto con la aparición de nuevas tecnologías como el LTE, motivaron el interés por continuar estudiando nuevas tendencias en las técnicas automáticas de optimización. El archipiélago canario ofrece un escenario muy particular para la propagación de la señal de radio y dificulta la formación de estructuras celulares regulares. La búsqueda de soluciones óptimas extrapolables a otros territorios generó gran interés por parte de su autor para desarrollar la tesis que aquí se presenta.

Glosario

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
ANR	Automatic Neighbor Relation
AS	Active Set
ASE	Air interface Speech Equivalent
BH	Busy Hour
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CAPEX	Capital Expenditure
CCIR	Comité Consultivo Internacional de Radiodifusión
CDMA	Code Division Multiple Access
CIR	Carrier to Interference Ratio
CPICH	Common Pilot Channel
CQI	Channel Quality Indicator
DCS	Digital Cellular Service
DL	Down Link
DN	Detected Network
Ec/No	Energy Chip / Noise
EPC	Evolved Packet Core
EUL	Enhanced Up Link
FDD	Frequency Division Duplexing
FSF	Frequency Selective Fading
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
GTD	Geometric Theory of Diffraction
HO	Handover
HSDPA	High Speed Data Packet Access
HSPA	High Speed Access
IA	Interference Alignment
ICI	Inter Cell Interference
ICIC	Inter Cell Interference Coordinator
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISI	Inter Symbol Interference
KPI	Key Performance Indicator
LB	Load Balancing
LOS	Light Of Sight
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MSC	Mobile Switching Central
NLOS	No Light Of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiple
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPEX	Operational Expenditure
OSS	Operation and Supervision System

OVSF	Orthogonal Variable Spreading Factor
PRB	Physical Resource Block
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAB	Radio Access Bearer
RBGA	Ruido Blanco Gaussiano Aditivo
RNC	Radio Network Controller
RRC	Radio Resource Controller
RRM	Radio Resource Management
RSCP	Received Signal Code Power
SGSN	Serving GPRS Support Node
SHO	Soft Handover
SINR	Signal to Noise Ratio
SIR	Signal to Interference Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
TDD	Time Division Duplexing
TMA	Tower Mounting Amplifier
TSF	Time Selective Fadding
TTT	Time To Trigger
UE	User Equipment
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UL	Up Link
UMTS	Universal Mobile Terrestrial System
UTD	Uniform Theory of Diffraction
UTRA	UMTS Terrestrial Radio Access
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

Índice

Capítulo I Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Hipótesis propuesta.....	3
1.3 Objetivo de la tesis.....	3
1.4 Solución propuesta.....	3
1.5 Líneas de trabajo seguidas	7
Bibliografía	10
Capítulo II Estado del Arte	11
2.1 Antecedentes	12
2.2 Proyectos recientes de investigación.....	13
2.2.1 SOCRATES (<i>Self-Optimisation and self-ConfiguRATion in wirelEss networks</i>)	13
2.2.2 SEMAFOUR.....	15
2.2.3 NGMN (<i>Next Generation Mobile Networks</i>).....	16
2.2.4 3GPP	17
Bibliografía	18
Capítulo III Modelos de Propagación	19
3.1 Introducción: Conceptos de propagación por canales móviles.....	19
3.2 Evolución de los modelos de propagación.....	22
3.3 Caracterización del canal radio en banda estrecha	23
3.4 Caracterización del canal radio en banda ancha	25
3.5 Modelos deterministas	27
3.5.1 Difracción de un obstáculo	28
3.5.2 Difracción de dos Obstáculos	30
3.5.3 Difracción en Múltiples Obstáculos.....	32
3.6 Modelos empíricos.....	33
3.6.1 Modelo Lee	35
3.6.2 Modelo Okumura-Hata	36
3.6.3 Modelo Anderson 2D.....	38
3.6.4 Modelo de Walfish-Ikegami (COST-231).....	40
3.6.5 Modelo de propagación Xia-Bertoni simplificado	41
3.7 Teoría Geométrica de la Difracción.....	42
3.8 Modelos de propagación marítima.....	44
3.9 Recomendaciones UIT.....	44

3.10 Efectos producidos por obstáculos cercanos a la antena	45
3.10.1 Principio de Huyghens: zonas de Fresnel	46
3.10.2 Deformación del diagrama de radiación de las antenas	48
3.10.3 Downtilt mecánico y downtilt eléctrico	48
3.11 Comparativa de los modelos de propagación	50
Bibliografía	53
Capítulo IV Acceso Radio UMTS y LTE	57
4.1 Acceso Radio UMTS (WCDMA).....	57
4.1.1 Interferencias en los sistemas WCDMA	61
4.1.2 Arquitectura del sistema UMTS	64
4.2 Acceso Radio LTE (OFDM)	65
4.2.1 Interferencias en los sistemas OFDM.....	68
4.2.2 Arquitectura del sistema LTE.....	69
4.3 Figuras de mérito e índices de calidad.....	69
4.3.1 Figuras de mérito habituales.....	70
4.4 Información del funcionamiento de la red.....	72
Bibliografía	75
Capítulo V Problema de Optimización Cobertura-Calidad-Capacidad-Coste.....	77
5.1 La interferencia como aspecto limitador.....	78
5.2 Funcionalidades y mecanismos convencionales de redes celulares	81
5.3 Optimización Multiobjetivo.....	82
5.4 Métodos heurísticos de optimización.....	84
5.4.1 Optimización de áreas de RNC.....	85
5.5 Modelos de movilidad de tráfico	86
5.6 Marco regulatorio para el despliegue de redes móviles.....	86
Bibliografía	88
Capítulo VI Técnicas SON: Self Organizing & Self Optimizing Networks	89
6.1 Introducción a las técnicas SON	90
6.2 Casos de Uso definidos en SOCRATES	93
6.2.1 Automatic Neighbor Relation (ANR)	94
6.2.2 Handover Parameter Optimisation.....	96
6.2.3 Load Balancing	97
6.2.4 Inter Cell Interference Coordination (ICIC).....	100
6.2.5 Cell Outage Management.....	101

6.3 Casos de Uso definidos en SEMAFOUR.....	102
6.3.1 Usuarios con alta movilidad.....	103
6.3.2 Selección de red LTE/WiFi.....	103
6.3.3 Sistema de reconfiguración activa de antenas.....	103
6.4 Soluciones propuestas.....	104
6.4.1 Etapa previa de planificación.....	104
6.4.2 Desarrollo de técnicas SON.....	105
6.4.3 Otras técnicas de reducción de interferencias.....	107
Bibliografía.....	110
Capítulo VII Diseño de un algoritmo ANR para optimizar escenarios con interferencia	117
7.1 Evaluación de escenarios con elevada interferencia.....	117
7.1.1 Emplazamientos dominantes.....	118
7.1.2 Usuarios en situación dominante.....	125
7.2 Análisis y aplicación de métodos convencionales de optimización.....	135
7.2.1 Optimización de células basada en la minimiz. de la ventana <i>Detected Network</i>	135
7.2.2 Optimización de la capacidad de un clúster de células mediante la inclinación de antenas.....	141
7.2.3 Optimización de la capacidad de un clúster de células mediante la variación de la potencia del canal piloto CPICH.....	148
7.3 Diseño y evaluación de un algoritmo ANR de optimización automática.....	165
7.3.1 Análisis del escenario de pruebas.....	165
7.3.2 Métodos convencionales de definición de colindancias.....	169
7.3.3 Traceo de célula.....	172
7.3.4 Selección de colindancias por criterios.....	173
7.3.5 Diseño de un algoritmo ANR de selección de colindancias.....	177
7.3.6 Análisis de los resultados.....	179
7.3.7 Comparación con los métodos convencionales.....	183
Bibliografía.....	186
Capítulo VIII Conclusiones.....	187
8.1 Conclusiones.....	187
8.2 Líneas de investigación abiertas.....	188

Anexo I Marco regulatorio para el despliegue de redes móviles	191
Regulación autonómica de Canarias	192
Regulación insular de Canarias.....	193
De forma general, los Cabildos disponen de la siguiente normativa:	193
Regulación municipal de Canarias.....	193
Ley 9/2014, de 9 de mayo, de Telecomunicaciones	193
Anexo II Código en C del algoritmo ANR	195

Capítulo I

Introducción

La aparición continua de nuevos servicios que consumen grandes anchos de banda, unida a la creciente demanda de acceso a Internet por parte de los usuarios en cualquier lugar en el que se encuentren, está aumentando considerablemente la complejidad de las redes de telefonía móvil.

Los mecanismos actuales permiten gestionar los limitados recursos radioeléctricos en redes heterogéneas GSM/UMTS/LTE. Mediante el establecimiento de una estructura jerárquica celular, y unas funcionalidades de gestión multicapa, se puede distribuir el tráfico de voz y datos para ofrecer el mejor servicio a los clientes.

Por otro lado, la movilidad de los usuarios y su distribución geográfica es muy variable dentro de un mismo territorio, por lo que las redes deben también adaptarse a este escenario. Los entornos rurales pueden ser fácilmente servidos con pocas estaciones base macrocelulares o algunas microcélulas para peticiones muy concretas de algunos clientes. Pero en los entornos urbanos se requiere un diseño de red con muchos más elementos, en el que coexistirán células de diferentes tipos (macro, micro, pico, etc.) según la demanda de servicio, concentración de clientes y su movilidad. Incluso ha sido necesario diseñar un nuevo concepto llamado femtocélula, que consiste en una pequeña estación base para uso residencial conectada a la red del operador móvil mediante el ADSL del cliente.

Además, estas redes han ido evolucionando tecnológicamente, encontrándonos en este momento en España con sistemas GSM 900, DCS 1800, UMTS 2100, UMTS 900 y LTE 1800 (a corto plazo LTE 800), que están en servicio simultáneamente, con un alto grado de relación y trasposos entre ellos.

Para ofrecer continuidad del servicio entre todas las redes, y con el objeto de obtener la máxima rentabilidad aprovechando las inversiones realizadas en la infraestructura actual (GSM, UMTS R99, HSPA), la definición de la norma LTE contempla el mecanismo de “*interworking*”, que consiste en un conjunto de funciones para permitir la interacción entre todas las redes que ofrecen el servicio de telefonía móvil. Este aumento de la complejidad requerirá nuevas inversiones con el objeto de gestionar de forma adecuada las labores de optimización, operación y mantenimiento de

las redes, y en consecuencia, poder adaptarse a un mercado tan cambiante en el que constantemente están apareciendo nuevos servicios, terminales y modelos de negocio.

La inversión que sería necesaria acometer para gestionar una red tan compleja, produciría un desacople entre los ingresos por tarificación del tráfico de voz según el modelo utilizado hace unos años, y los ingresos por el tráfico de datos cada vez mayor en los que predomina la contratación de tarifas planas. Precisamente, este nuevo escenario ha tenido mucha influencia en el desarrollo y definición de la norma LTE, en la que se pretende conjugar la evolución tecnológica con el nuevo modelo de uso masivo de conexiones de datos, a un coste adaptado a los ingresos esperados. En este sentido, aparece el concepto *SON*, que significa *Self Organizing Networks*, y tiene como objetivo la automatización de arduas tareas en la configuración, puesta en servicio, y optimización de parámetros de red, así como la de responder adecuadamente a eventualidades, consiguiendo con todo ello una reducción en los costes de operación y una mejora sustancial de la calidad de la red.

El *3GPP (3rd Generation Partnership Project)* reconoce la importancia del desarrollo de técnicas *SON* para LTE y, como consecuencia, ha contribuido a su estandarización en las diferentes *releases* (fases en la evolución) de esta tecnología. Concretamente establece una serie de condiciones para el funcionamiento básico de estas técnicas, ofreciendo un interesante grado de libertad al desarrollo de los algoritmos que conforman los mecanismos de organización y optimización autónoma. Esta filosofía de trabajo ofrece un suculento material para los investigadores, bien de los propios fabricantes de equipos, para los desarrolladores de software de optimización, las propias operadoras o para científicos del mundo académico universitario. [1]

1.1 Planteamiento del problema

Las redes de telefonía móvil deben cumplir tres criterios básicos: Calidad-Cobertura-Capacidad, todo ello a un Coste que permita la explotación eficiente por parte de la operadora. La Calidad se puede expresar como la facultad que tiene la red para mantener una llamada o sesión de datos, la cual debe ser terminada a voluntad por los usuarios. Cuando la red no es capaz de cumplir esta condición es porque se ha producido una llamada interrumpida o caída (del inglés *dropped call*), cuyas causas son muy variadas.

La movilidad de los usuarios es una de las principales características del servicio de telefonía móvil, por lo que uno de los métodos para garantizar la Calidad consiste en un correcto diseño de relación de colindancias entre células cercanas, de tal manera que el terminal pueda disponer siempre de una célula a la que asociarse mientras se desplaza, dando así continuidad al servicio.

En determinados escenarios con un despliegue regular de estaciones base, la señal emitida por cada célula se mantiene con unos valores de confinamiento aceptables de tal manera que se puede predecir el camino trazado por los usuarios y definir, sin grandes esfuerzos, la mejor relación de colindancias. Sin embargo, la realidad en muchas ocasiones es bien distinta, pues las condiciones orográficas del terreno, la distribución de los usuarios, el cumplimiento del marco legal de cada territorio, y la disponibilidad de infraestructuras que no fueron pensadas para redes móviles pero que se aprovecharon

para la ubicación de estaciones base por el ahorro de costes que supone, no permiten que el despliegue celular sea homogéneo. En estos casos se obtiene un escenario impredecible con células cuya emisión se propaga de forma poco controlada generando sobrealcances e incrementando el nivel de interferencias, en los que resulta muy difícil definir una relación de colindancias que asegure unos valores mínimos de Calidad.

La asignación de recursos y la decisión de ordenar trasposos (también llamados *handovers*) de células a los abonados, se basan en las medidas de potencia e interferencia que obtienen los terminales. En los escenarios comentados, los valores de las medidas son muy dispersos y en ocasiones contrarios. Esto dificulta la selección de la mejor célula colindante a la que realizar un traspaso cuando los abonados se desplazan, por lo que la probabilidad de que se produzca una llamada caída es considerable.

1.2 Hipótesis propuesta

La configuración de las listas de colindancias condiciona la efectividad de los *handovers* y el mantenimiento de las llamadas cuando los terminales cambian de célula. Mediante la selección de las mejores células se podrán definir listas de colindancias que minimicen las llamadas interrumpidas.

El diseño de un algoritmo de optimización que sea capaz de automatizar el procesamiento de las medidas de potencia, interferencia y distancia, y elija las mejores células en base a unas condiciones iniciales, permitirá mejorar la calidad y en general el rendimiento de la red en escenarios con elevada interferencia y sobrealcance.

1.3 Objetivo de la tesis

El objetivo de esta tesis se compone de tres partes fundamentales:

- ofrecer una contribución al estudio y desarrollo de diversos métodos de optimización automática para redes *3GPP* (LTE y UMTS) en escenarios complejos, irregulares y con elevado sobrealcance e interferencia,
- realizar una caracterización de diferentes escenarios y de los métodos convencionales de optimización,
- diseñar un algoritmo que automatice la creación de listas de colindancias para mejorar los valores del conjunto Calidad-Capacidad-Cobertura.

1.4 Solución propuesta

Para mantener el enlace radio durante el desplazamiento de los abonados, y para evitar que se interrumpa la llamada, es necesario asignar correctamente las células nuevas hacia las que se mueve el terminal. En un escenario regular como el de la figura I.1 con poca interferencia, es fácil diseñar la relación de colindancias que debe poseer cada célula. Una representación gráfica de la ubicación de las estaciones base servirá, como configuración inicial, para decidir mediante regiones de Voronoi las células vecinas. Luego, mediante medidas y análisis de los indicadores de calidad se puede ir

ajustando de forma recursiva la calidad que se desee obtener en aquellas células que tengan peores rendimientos. Este método presenta el inconveniente de que los ajustes se realizan de forma aislada sin tener en cuenta la dependencia mutua entre todas las células de una zona. Como ejemplo, un exceso de handovers salientes puede aliviar el tráfico de la célula origen, pero también podría saturar las células destino si la carga de estas no ha sido tomada en cuenta.

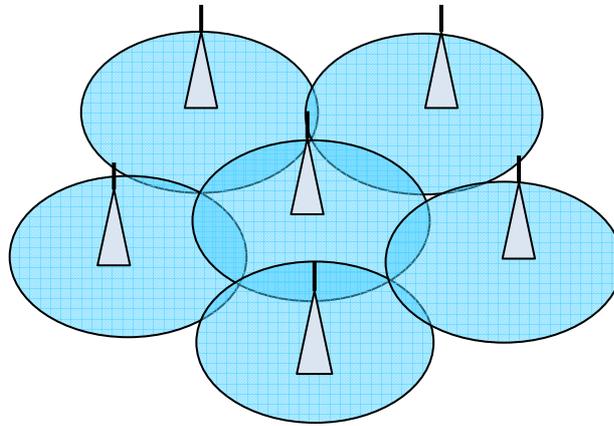
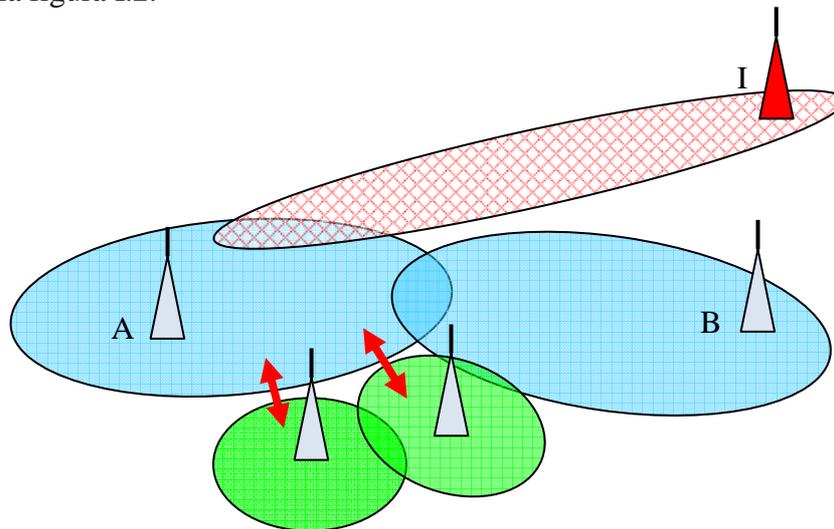


Figura I. 1 Escenario regular

En escenarios reales con elevada interferencia y sobrealcance esta tarea no es tan fácil. Las medidas de potencia e interferencia que toman los terminales para informar al OSS muestran valores muy dispersos y en ocasiones contrarios. Esto dificulta la selección de la mejor célula colindante a la que realizar un traspaso cuando los abonados se desplazan, puesto que no siempre la célula geográficamente más cercana será la mejor, es decir, la de mayor potencia y menor interferencia recibida, como se muestra en la figura I.2.



A-B: buen solape entre células distantes
A-I: sobrealcance e interferencia de I
↔ : falta de solape entre células

Figura I. 2 Escenario irregular con interferencia y sobrealcance

Tampoco existe relación directa entre la cercanía y el número de veces que se produce un traspaso entre cada par de células. Por lo tanto, el método habitual utilizado en un escenario ideal para definir listas de colindancias no es adecuado, por lo que es necesario diseñar un algoritmo que sea capaz de combinar la mejor opción en zonas amplias de la red con elevada interferencia.

La funcionalidad ANR (Automatic Neighbor Relation) que será descrita en el apartado 6.2.1, ha sido planteada en el 3GPP por varios fabricantes (Ericsson, Huawei, etc.) y utiliza el Global-CID y el Physical-CID para identificar las células. Concretamente, Ericsson ha diseñado un algoritmo y una herramienta de visualización de su funcionamiento en la red, cuyos resultados se muestran en [2]. Ofrece una presentación geo-espacial de las células y una serie de utilidades gráficas e interactivas para comprender mejor dónde hay problemas de conflictos de PCI y falta de colindancias.

El método propuesto por [3] para obtener una lista de relaciones de colindancias consiste en una primera fase en detectar conflictos de PCI entre cada par de células medidas por el terminal y enviarlos a la OSS para su resolución mediante una replanificación de los mismos. Una vez resuelto, las dos células son definidas como colindantes.

En [4] se realiza una evaluación del ANR que utiliza la operadora TeliaSonera (con tecnología Ericsson) en una red real de Suecia, donde se puede observar que las listas de colindancias se van configurando automáticamente, añadiendo nuevas células a la lista si se precisa un handover, o borrándolas de las mismas en caso de que esta no se produzca.

En el método descrito en [5] se evalúa el ANR en escenarios con estructura celular regular y en escenarios irregulares con sobrealcance, siendo válido para ambos casos. Se basa en medidas tomadas por los terminales y propone un método para reducir la carga de señalización que supone el envío y procesado de dichas medidas. Las técnicas convencionales disparan el proceso de handover cuando la señal colindante supera un umbral (denominado A3), pero se puede establecer otro nivel por encima (denominado A4) con el objeto de darle tiempo al sistema para definir la mejor célula colindante sin tener que llegar al umbral A3 donde la decisión debe ser tomada rápidamente. Con esta propuesta se crean listas de colindancias válidas donde cada par de células establece su interfaz X2 (que será descrito en el apartado 4.2.2) y listas negras de colindancias que nunca se realizarán cuya finalidad es reducir tiempo y carga de procesado de medidas.

En las simulaciones realizadas del método comentado se ha comprobado que con umbrales de handover de -90 dBm los fallos son mayores que para umbrales menos restrictivos de -100 dBm. Estos valores pueden ser buenos para escenarios urbanos densos regulares (la simulación se realiza en Frankfurt), pero no para escenarios con sobrealcance, pues con tantas colindancias posibles se llenaría rápidamente la listas. También se ha comprobado que a las dos primeras horas, el ANR propuesto obtiene una configuración estable de colindancias. También se observa que cuantos más terminales haya en servicio que proporcionen medidas, menos tiempo de muestreo y procesado se requiere.

En el trabajo descrito en [6] se parte de una configuración previa y manual en la que se utilizan regiones de Voronoi. Propone el escaneo de células (no de medidas de los terminales) para obtener el valor de SINR y determinar así la mejor lista de colindancias. Este método tiene la ventaja, según su autor, de que se obtiene mayor conocimiento del alcance y solape de las células pues la técnica convencional de utilizar las medidas de los móviles se ve afectada por las pérdidas de propagación y mayores interferencias en los bordes de célula en los entornos urbanos. Sin embargo, es una técnica que debe ser simulada pues no se conoce ningún método para escanear células en el caso real, dado que la célula solo tiene capacidad para medir las señales de los terminales en el uplink, pero no en downlink.

Solución propuesta

Las técnicas convencionales empleadas en la funcionalidad ANR están destinadas a la creación de listas de colindancias a partir de la medida de potencia recibida, pero no tienen en cuenta la interferencia y las distancias a las que se encuentran las células. La solución que se propone es un algoritmo que permita, como novedad frente a los métodos convencionales, el procesamiento del conjunto de medidas de potencia e interferencia de todas las células que el móvil es capaz de recibir, para posteriormente realizar una selección de la mejor combinación entre ellas junto con los valores de distancia y número de veces que se reciben las medidas.

Para desarrollar la hipótesis planteada es necesario obtener primero información real del problema que se pretende resolver. Para ello se realizará una evaluación de los escenarios con elevada interferencia con el objeto de conocer la dimensión que tienen los sobrealcances y cómo afecta a los enlaces radio. Luego se realizarán una serie de ensayos en células aisladas para comprobar su efecto. Por las características de propagación, orografía, dispersión de la población y presencia del mar, se ha elegido la isla de Tenerife (Islas Canarias) como escenario para realizar las pruebas en la red de Telefónica. Estas experiencias demuestran la necesidad de diseñar el algoritmo ANR que se presenta. De las pruebas realizadas se determinó el Valle de la Orotava (en la isla de Tenerife, figura I.3) como el más apropiado para demostrar la hipótesis planteada. Este valle incluye las poblaciones del Puerto de la Cruz, La Orotava y Los Realejos. Por su orografía y la dispersión de la población, los niveles de interferencia y sobrealcance son mayores que en un escenario urbano habitual, por lo que las prestaciones de la red son menores.



Figura I. 3 Ubicación del escenario

1.5 Líneas de trabajo seguidas

Para el desarrollo de esta tesis se siguen dos líneas de trabajo: primero se realiza un estudio teórico sobre los diferentes conceptos que son necesarios para entender el problema planteado, y posteriormente una parte práctica en la que se realiza un análisis de escenarios irregulares con el objeto de conocer la repercusión real de los sobrealcances y la interferencia que estos producen. En la figura I.4 se muestra un esquema de los pasos que se han seguido y la estructura de capítulos.

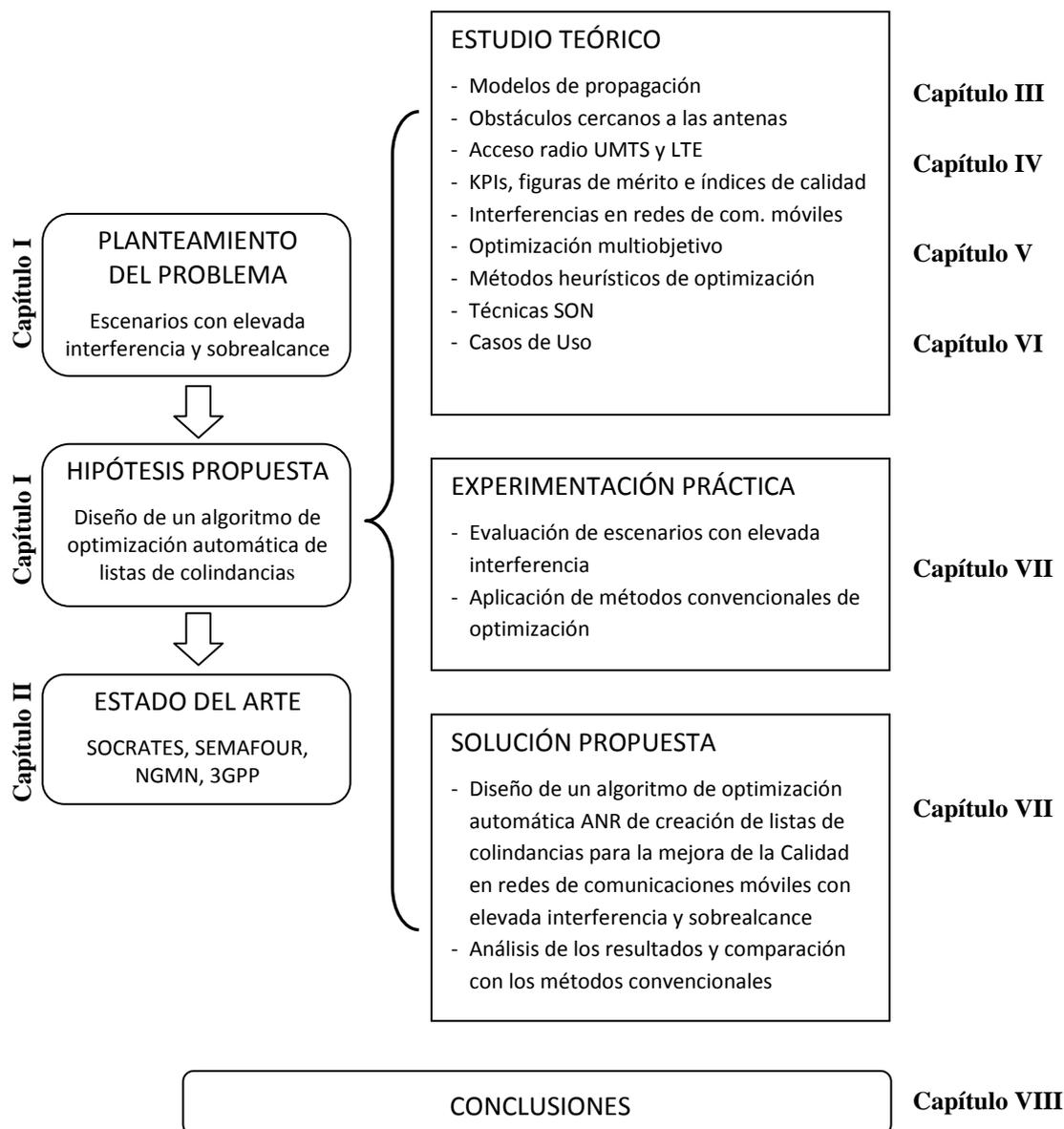


Figura I. 4 Líneas de trabajo y estructura del documento

Para caracterizar los escenarios y sus prestaciones es necesario realizar un estudio de los diferentes modelos de propagación que existen en redes de comunicaciones móviles, así como de los elementos cercanos a los sistemas radiantes que puedan perturbar la formación de la estructura celular. La facultad de las técnicas de acceso radio para separar las comunicaciones entre los terminales con la estación base también se ven afectadas por los escenarios irregulares, por lo que será necesario estudiar los métodos que ofrecen para minimizar los efectos que produce el solapamiento entre células y la interferencia mutua entre terminales.

Para evaluar el funcionamiento de la red se dispone de diversas figuras de mérito de ámbito general y de índices específicos llamados *KPIs* (*Key Performance Indicator*). El intenso tráfico de voz, datos, señalización, parámetros de control, etc. en las fases de establecimiento, movilidad y terminación de los enlaces radio, genera una cantidad enorme de *KPIs* que deberán ser analizados para dar validez a la hipótesis planteada.

La interferencia se presenta como el principal elemento limitador de la capacidad que tiene la red por lo que será necesario caracterizar su efecto en la tasa binaria y en la relación señal a ruido del enlace radio. Así mismo, se estudiará también los mecanismos y funcionalidades existentes para minimizar la potencia de emisión de las células y los terminales, pues constituyen en sí el elemento generador de interferencia.

Debido a la dependencia no lineal entre los diferentes parámetros y *KPIs* se requiere el empleo de técnicas de optimización multiobjetivo y de métodos heurísticos para la resolución de problemas que serán revisados en este trabajo. Además, la coexistencias de tres tecnologías actuales de acceso radio (GSM, UMTS, LTE y WiFi) y de la jerarquía de capas de células (macro, micro, pico, femto), dificulta enormemente el procesado manual de parámetros y colindancias, por lo que es necesario estudiar las técnicas *SON* actuales.

La parte práctica consiste en el estudio de escenarios reales con células o terminales en posición muy dominante. Se evalúan diferentes métodos manuales de optimización y se analizan los resultados. Por último, se presenta un algoritmo de optimización automática de listas de colindancias que mejora dichos métodos logrando un aumento en la calidad de la red.

Este documento de tesis tiene la siguiente estructura. En el Capítulo II se detalla el estado del arte en técnicas automáticas de optimización, en el que se explican las principales líneas de trabajo y grupos de investigación actuales.

En el Capítulo III se realiza una descripción de los principales modelos de propagación y estimación de cobertura en entornos urbanos, rurales y marinos, así como algunos efectos que perturban la emisión y que están localizados a corta distancia de los sistemas radiantes. Con ello se podrá comprender la dificultad de realizar un despliegue homogéneo con estructura celular.

Las prestaciones que ofrece un sistema de comunicaciones móviles no dependen únicamente de las condiciones de propagación. Las técnicas de acceso radio también tienen su influencia, por lo que en el Capítulo IV se describe las condiciones necesarias para alcanzar un nivel de relación Portadora a Ruido en los sistemas UMTS y LTE, con el objeto de mantener unos niveles mínimos de servicio. En este apartado también se

explican los métodos de extracción y análisis de medidas, y se establecen los principales indicadores de calidad, o KPI (*Key Performance Indicators*).

Con los conceptos anteriores, se muestra en el Capítulo V los problemas principales a solventar en el despliegue de las redes en el que la interferencia se presenta como elemento limitador, se hace un repaso de las distintas funcionalidades de los subsistemas para el control de recursos radio y se muestran los métodos heurísticos de optimización. También se hace un repaso al actual marco regulatorio como factor que condiciona el despliegue de red.

En el Capítulo VI se detalla las técnicas Self Organizing Networks, su utilidad y los casos de uso más importantes.

Los ensayos en la red se muestran en el Capítulo VII, donde se realiza una evaluación de escenarios con elevada interferencia en dos casos típicos: estaciones base a gran altura sobre la población y usuarios a gran altura sobre las estaciones base. De este estudio se extraen interesantes conclusiones que mostrarán claramente los casos de sobrealcance que se puedan dar, presentando así un novedoso método de caracterización de escenarios. También se muestra el resultado de modificar aisladamente células que tienen poco rendimiento, y su efecto en las células colindantes.

Por último se presenta un algoritmo novedoso que procesa la información de las células contenidas en una zona mucho más amplia, genera listas de colindancias en función de unas restricciones de partida, y optimiza la calidad y la capacidad de la red.

El algoritmo es del tipo ANR (Automatic Neighbour Relation) y supone una mejora respecto de los métodos habituales de definición de colindancias que no utilizan el conjunto de datos de toda la red para optimizar su rendimiento. Este algoritmo en cambio, tiene en cuenta todas las combinaciones de potencia e interferencia recibida por los terminales de todas las células del entorno. Como resultado se obtiene una mejora en las llamadas cursadas con éxito y se disminuyen las llamadas interrumpidas por pérdida del enlace radio.

Las conclusiones y las líneas abiertas de investigación se muestran en el Capítulo VIII.

Bibliografía

- [1] David Ortega Sicilia, "Nuevas tendencias en Comunicaciones Móviles: Técnicas Self Organizing & Optimizing Networks en LTE," *BIT - Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación*, no. 190, pp. 70-72, septiembre 2012.
- [2] Ho Van Quan et al., "Visualization of Self-Organizing Networks Operated by the ANR Algorithm," *IEEE*, no. 978-1-4244-4568-4/09, pp. 1-8, 2009 [55].
- [3] Mehdi Amirijoo et al., "Neighbor Cell Relation List and Measured Cell Identity Management in LTE," *IEEE*, no. 978-1-4244-2066-7/08, pp. 152-159, 2008 [2].
- [4] Anders Dahlén et al., "Evaluations of LTE Automatic Neighbor Relations," *IEEE*, no. 978-1-4244-8331-0/11, 2011 [41].
- [5] Christian M. Mueller, Hajo Bakker, and Lutz Ewe, "Evaluation of the Automatic Neighbor Relation Function in a Dense Urban Scenario," *IEEE*, no. 978-1-4244-8331-0/11, 2011 [39].
- [6] Dooyoung Kim, Bongjhin Shin, Daehyoung Hong, and Jaechan Lim, "Self-Configuration of Neighbor Cell List Utilizing E-UTRAN NodeB Scanning in LTE Systems," *IEEE*, no. 978-1-4244-5176-0/10, 2010 [10].

Capítulo II

Estado del Arte

Las técnicas de optimización automática SON (del inglés *Self Organizing Networks*), se compone de tres etapas: Self Configuration, Self Optimizing y Self Healing Networks. Básicamente tiene como objetivo la automatización de diversas tareas en la configuración, puesta en servicio, y optimización de parámetros de red, así como la de responder adecuadamente a eventualidades, consiguiendo con todo ello una reducción en los costes de operación y una mejora sustancial de la calidad de la red. En los siguientes párrafos se describe en detalle cada una de estas técnicas:

- a) **Self Configuration:** es el proceso de incorporación automática de un nuevo nodo a la red, en el que se incluye la configuración de la red de transporte con la central, el envío del tipo de hardware instalado y la carga de una lista genérica de parámetros. Todo esto se realiza en una fase pre-operacional, antes de que el nodo esté activo y tiene como objetivo lograr un despliegue más rápido y eficiente, así como con un menor coste asociado.
- b) **Self Optimization:** una vez que el nodo está en servicio con una configuración mínima, en este proceso comienza la recolección y análisis de las medidas que va recibiendo de los nodos colindantes y de los terminales que empiezan a engancharse y cursar tráfico en el nuevo elemento, así como de los KPIs (Key Performance Indicator) de la red que está en servicio, y que son almacenados por el sistema de Operación y Supervisión de red (OSS). Este proceso ya es continuo durante toda la vida útil de la estación base, con el objeto de adaptarse constantemente a la evolución natural de la red. Tiene como finalidad la optimización de parámetros de handover, offsets, lista de células vecinas, balance de carga, etc.
- c) **Self Healing:** consiste en la detección y prevención de fallos en el hardware, en el software o fallos externos como falta de suministro eléctrico o conectividad de la red, y tiene como objetivo reducir la indisponibilidad de las células que dan servicio. Esta fase se llama *Cell Outage Compensation*.

Los principales proyectos de investigación en técnicas SON y sus autores, han llegado a un consenso para clasificar los tipos más importantes de funcionalidades que

son objeto de automatización, y se denominan *casos de uso*. En el Capítulo VI se entrará en detalle en cada uno de estos conceptos. A continuación se presenta los trabajos y líneas de investigación más importantes.

2.1 Antecedentes

Desde el desarrollo de las primeras redes móviles se han venido constituyendo diversos foros, consorcios y proyectos de trabajo sobre técnicas automáticas de planificación y optimización. A continuación se presenta un resumen de los más destacados.

MOMENTUM

Models and Simulations for Network Planning and Control of UMTS

Este proyecto fue creado debido a la falta de herramientas adecuadas para la simulación en tiempo real de las redes UMTS a gran escala, y la necesidad de disponer de modelos para entender el comportamiento de los usuarios, el manejo de recursos radio y modelos de propagación. Se desarrollaron algoritmos heurísticos sofisticados para reducir los tiempos de cálculo y los métodos de optimización matemática. [1]

CELTIC-PLUS: GANDALF

Celtic-Plus es una iniciativa europea de investigación impulsada por la industria para definir y ejecutar, a través de financiación de proyectos públicos y privados comunes de investigación en el área de las telecomunicaciones, los nuevos medios de comunicación, el futuro de Internet y las aplicaciones y servicios centrados en un nuevo paradigma de "*Smart Connected World*"

Entre tantos de sus proyectos está GANDALF, que tiene por objetivo la monitorización de redes a gran escala, reglas avanzadas de RRM y evaluación del QoS, con el fin de lograr la automatización de las tareas de gestión de red en un entorno multi-sistema (GSM, GPRS, UMTS y WLAN). [2]

MONOTAS

Mobile Network Optimisation Through Advanced Simulation

Es un proyecto de colaboración fundado como parte del Department of Trade and Industry's Technology Programme del Reino Unido, en el marco del *Pervasive Computing*.

Tiene como objetivo el estudio de la capacidad de una red para adaptar de manera automática parámetros tales como niveles de potencia del piloto, handover, balance de carga, etc. Esta investigación conducirá en última instancia a redes autónomas de auto-optimización que sean capaces de reaccionar rápidamente a los cambios impredecibles en el tráfico de red. [3]

NOMOR*Nobel Mobile Radio*

Nomor Research es una empresa líder en la investigación y desarrollo de los sistemas de comunicación emergentes, que ofrece productos y servicios de consultoría. Entre otros trabajos destacan la simulación de recursos de radio (RRM) y las técnicas SON. [4] [5]

4G Americas*Nobel Mobile Radio*

4G Americas proporciona un ecosistema para los operadores móviles y proveedores en América. Está comprometida a trabajar con las agencias gubernamentales, entes reguladores, organismos de estándares técnicos y otras organizaciones inalámbricas globales en todo el continente, para promover el uso de tecnologías del 3GPP, incluida la asignación de espectro y las políticas reguladoras. [6] [7]

2.2 Proyectos recientes de investigación

En este apartado se describen los proyectos más recientes en Técnicas SON.

2.2.1 SOCRATES (*Self-Optimisation and self-ConfiguRATion in wirelEss networks*)

- **Coordinador del proyecto:** Prof. Dr. Hans van den Berg, TNO, Netherlands
- **Participantes:** TNO Information and Communication Technology (NL), Atesio (D), Ericsson AB (S), IBBT (B), Technische Universität Braunschweig (D), Vodafone (UK), Nokia Siemens Networks (D, PL)
- **Duración:** enero 2008 – diciembre 2010
- **Objetivos:** El objetivo general de SÓCRATES es el desarrollo de métodos de auto-organización con el fin de optimizar la capacidad de la red, la cobertura y la calidad del servicio, logrando una mejora significativa del OPEX y del CAPEX. Aunque las soluciones desarrolladas pueden ser ampliamente aplicables a varias tecnologías (por ejemplo, para redes WiMax), el proyecto se concentra principalmente en la interfaz de radio LTE de 3GPP (E-UTRAN) [8] [9].

Entrando en detalle, los objetivos son los siguientes:

- El desarrollo de nuevos conceptos, métodos y algoritmos para automatizar la optimización, configuración y mantenimiento de las redes de acceso inalámbrico, adaptando los diversos parámetros (gestión de los recursos) a variaciones lentas o abruptas de las condiciones del sistema, como el tráfico, la movilidad y la propagación radio. Ejemplos concretos de los parámetros de radio que se abordan son: configuración del sistema radiante, listas de células vecinas, parámetros de handover y parámetros de control y admisión.

- La especificación del método de medida de los datos, la exactitud estadística y los protocolos necesarios para ello.
- La validación y la demostración de los conceptos desarrollados y técnicas SON mediante ensayos simulados. En particular, se realizarán simulaciones con el fin de ilustrar y evaluar las mejoras en capacidad, cobertura y calidad, así como la reducción del OPEX y CAPEX.
- Evaluar el impacto operacional de la aplicación de los métodos y conceptos desarrollados con respecto a la arquitectura de la red, los terminales y los procesos de planificación y gestión de la capacidad de la red móvil.
- Influir en las actividades de normalización del 3GPP y NGMN.

La estructura del proyecto SOCRATES se compone de los siguientes paquetes de trabajo:

- **WP1: Gestión de proyectos.** Este paquete de trabajo se encarga de la gestión global de los aspectos operativos y financieros del proyecto y facilita la cooperación externa e interna. Está liderada por TNO.
- **WP2: Casos de Uso y ámbito de las técnicas SON.** Requisitos no técnicos de los diferentes componentes de las técnicas SON (optimización, configuración y mantenimiento automáticos), de los que se derivará una lista de casos de uso. Además, se definirán los escenarios en los que se aplicarán estos métodos, y se desarrollan los criterios de evaluación, contribuyendo así al desarrollo de técnicas para los grupos WP3 y WP4. Está liderado por Vodafone.
- **WP3: Optimización automática.** Desarrollo de nuevos conceptos, métodos y algoritmos para la optimización de las redes inalámbricas, adaptados a cambios graduales en la red de radio. Se aplicarán herramientas de simulación para evaluar su funcionamiento, utilizando los criterios y metodologías desarrolladas en WP2, y para ayudar a entender el rendimiento de los algoritmos empleados. Además, se especificarán las medidas necesarias, los interfaces y sus protocolos. Está liderado por Ericsson.
- **WP4: Self Configuration y Self Healing.** Desarrollo y validación de modelos y algoritmos para la autoconfiguración de nodos nuevos que entran en servicio en la red, así como para las técnicas de resolución automática de detección y subsanación de averías. Está liderado por Nokia Siemens Networks
- **WP5: Integración, demostración y difusión.** Tiene por objetivo la integración de las técnicas, la demostración de los beneficios que se obtienen de su aplicación, así como a la difusión de los métodos, incluyendo las contribuciones a la normalización (3GPP) y a los foros industriales (NGMN). Está liderado por IBBT.

2.2.2 SEMAFOUR

- **Coordinador del proyecto:** Dr. Colin Willcock, Nokia Siemens Networks - Germany
- **Participantes:** TNO (NL), Atesio (D), Ericsson AB (S), iMinds-IBBT (B), Technische Universität Braunschweig (D), Telefonica I+D (SP), Nokia Siemens Networks (D, PL), Orange (FR)
- **Duración:** septiembre 2012 – agosto 2015
- **Objetivos:** El objetivo general del proyecto SEMAFOUR es diseñar y desarrollar un sistema unificado de auto-organización, que permita a los operadores gestionar sus redes móviles que poseen características heterogéneas y multicapa [10].

Entrando en detalle, los objetivos son los siguientes:

- Desarrollar nuevos conceptos, métodos y algoritmos para las técnicas SON. Estas funciones están orientadas a entornos compuestos por múltiples tecnologías (LTE, HSPA, WLAN), y por múltiples capas (macro, micro, pico, femto), condicionadas por diferentes objetivos de calidad, capacidad y cobertura.
- Desarrollar conceptos, métodos y algoritmos para una gestión integrada de la red. Esto incluye una transformación de la política de supervisión de la red hacia unos objetivos generales de rendimiento, eficiencia y flexibilidad sin tener en cuenta las diversas tecnologías y capas que la componen.
- Diseñar y desarrollar una adecuada arquitectura que incorpore las técnicas SON, teniendo en cuenta la heterogeneidad de la red y su gran número de células.
- Desarrollar un demostrador que evalúe, a través de simulaciones de escenarios realistas, los conceptos, métodos y algoritmos desarrollados dentro del proyecto, y se puedan comprobar los beneficios que se obtienen.
- Influir en la estandarización del 3GPP y del IEEE 802, así como en las actividades del NGMN relacionadas con las técnicas SON para redes heterogéneas. SEMAFOUR contribuirá en la elaboración del *Release 12* del 3GPP.

La estructura del proyecto SEMAFOUR se compone de los siguientes paquetes de trabajo:

- **WP1: Gestión del proyecto.** Este paquete se encarga de la gestión financiera y operacional del proyecto, así como de la organización de la cooperación interna y externa. Está liderado por Nokia Siemens Network.
- **WP2: Requisitos, casos de uso metodología.** En este paquete se definen los casos de uso para los que se desarrollarán las soluciones técnicas, junto con los requisitos del sistema. También se describen los escenarios de referencia,

los modelos y las metodologías que se utilizarán en la simulación. Está liderado por France Telecom.

- **WP3: Demostrador.** En esta parte se define la manera de evaluar las soluciones propuestas para resolver las técnicas SON que se desarrollen para sistemas heterogéneos y multicapa. Lo lidera TNO.
- **WP4: Técnicas SON para redes futuras.** En este trabajo se evalúa, mediante simulaciones, las funciones multicapa para redes LTE y la gestión de redes heterogéneas. También se investiga sobre técnicas SON en las futuras redes. Está liderado por Ericsson.
- **WP5: Gestión integrada de técnicas SON.** En este paquete se desarrollan los métodos y algoritmos que utilizan las técnicas SON, así como la supervisión y transformación de la red. Está liderado por Nokia Siemens Network.
- **WP6: Difusión y explotación.** Esta parte se encarga de la difusión y explotación de las técnicas desarrolladas, interviniendo en la estandarización de redes móviles. Liderado por iMinds (IBTT).

2.2.3 NGMN (*Next Generation Mobile Networks*)

- **Coordinador del proyecto:** Jae-Woan Byun, SK Telecom
- **Participantes principales:** SK Telecom, Telefónica, Telstra, Telecom Italia, Turkcell, Telus, Tele2, Deutsche Telekom, China Mobile, Vodafone, Orange Labs Networks, NTT Docomo, E-Plus Group, AT&T, Bell Canada, BT, SingTel, VimpelCom, Yota Networks. En esta alianza también participan varios patrocinadores, centros de investigación y otros organismos [11]
- **Duración:** septiembre 2006 – continua activo
- **Objetivos:** El objetivo general de la Alianza NGMN es compartir y difundir la experiencia obtenida en el funcionamiento de las redes de comunicaciones, proporcionando una plataforma integrada, que permita llevar de manera asequible los servicios móviles de banda ancha al usuario final, con un enfoque particular en LTE y LTE-Advanced. El Programa de Trabajo NGMN cubre aspectos clave para abordar el desarrollo de las futuras generaciones de sistemas móviles de banda ancha. [12] [13] [14].

Entrando en detalle, los objetivos son los siguientes:

- Ampliar y desarrollar los conocimientos obtenidos en banda ancha móvil, con un enfoque particular en LTE y LTE-Advanced, su implementación y desarrollo de mejoras.
- Determinar las funcionalidades a desarrollar y los objetivos a alcanzar, así como los requisitos fundamentales en escenarios reales donde operan las redes.

- Orientar a los fabricantes de equipos y a los organismos de normalización para obtener unos costes efectivos de evolución de la red.
- Fomentar las recomendaciones que se obtengan del NGMN entre las organizaciones y la industria.
- Proporcionar un foro de intercambio de información de experiencias y aprendizaje para la industria.
- Atender las necesidades de espectro y apoyar el establecimiento de un régimen de Derechos de Propiedad Industrial.

2.2.4 3GPP

- **Coordinador del proyecto:** Luis Jorge Romero, ETSI.
- **Participantes principales:** ARIB - the Association of Radio Industries and Businesses (Japan), ATIS - the Alliance for Telecommunications Industry Solutions (USA), CCSA - China Communications Standards Association, ETSI - the European Telecommunications Standards Institute, TTA - Telecommunications Technology Association (Korea), TTC - Telecommunication Technology Committee (Japan).
- **Duración:** 1999 – 2015 (continuará activo)
- **Objetivos:** El proyecto define las especificaciones de los sistemas de comunicaciones, y abarca las tecnologías de red de telefonía celular, incluyendo acceso radio, la red de transporte básico y las capacidades de los servicios, incluidos los códecs, seguridad y la calidad de servicio. Las especificaciones también determinan la manera de comunicarse con los accesos no radio, así como del *interworking* con redes wifi [15].

La primera norma se editó en el *Release 99*, llamado así por ser entregado en 1999. Posteriormente se publicó el *Release 4* hasta llegar al *Release 12* en 2014. La primera referencia de las técnicas SON aparecieron en las versiones 8 y 9. Las normas proporcionan inteligencia de red, automatización y funciones de gestión con el fin de automatizar la configuración y la optimización de redes inalámbricas para adaptarse a distintas condiciones del canal radio. La normalización continúa con la versión 10 con mejoras adicionales en cada uno de los ámbitos antes mencionados y nuevas áreas de la tecnología de acceso radio (I-RATA), mejoras en la gestión de la interferencia intercelular (e-ICIC), optimización de la cobertura y la capacidad (GCC), eficiencia energética y la reducción de los gastos de operación de red.

Bibliografía

- [1] Andreas Eisenblätter et al., "Final Report on Automatic Planning and Optimisation," *MOMENTUM*, no. IST-2000-28088, pp. 68-89, Apr 2003.
- [2] www.celtic-initiative.org.
- [3] www.macltd.com/monotas.
- [4] www.nomor.de.
- [5] Sujuan Feng and Eiko Seidel, "Self-Organizing Networks (SON) in 3GPP Long Term Evolution," *NOMOR*, p. 15, May 2008.
- [6] www.4gamericas.org.
- [7] 3G Americas, "The Benefits of SON in LTE," *3G Americas*, p. 26, Dec 2009.
- [8] www.fp7-socrates.eu.
- [9] Thomas Kürner et al., "Final Report on Self-Organisation and its Implications in Wireless," *INFSO-ICT-216284 SOCRATES*, no. D5.9, p. 135, Jan 2010.
- [10] <http://www.fp7-semafour.eu/>.
- [11] www.ngmn.org.
- [12] Frank Lehser, "NGMN Informative List of SON Use Cases," *NGMN*, no. 1.23, p. 50, Apr 2007.
- [13] Frank Lehser, "NGMN Recommendation on SON and O&M Requirements," *NGMN*, no. 1.23, p. 53, Dec 2008.
- [14] Frank Lehser, "NGMN Use Cases related to Self Organising Network, Overall Description," *NGMN*, no. 2.02, p. 18, December 2008.
- [15] www.3gpp.org.

Capítulo III

Modelos de Propagación

Uno de los fundamentos principales de las redes de telefonía móvil consiste en la construcción de una estructura celular que permita reutilizar los diferentes recursos radio y garantizar así el acceso de los usuarios a la red.

Puesto que la comunicación se realiza mediante un interfaz radio no guiado, intervienen varios factores en la formación de células y sus dimensiones, según las necesidades de capacidad y cobertura en cada escenario. Entre estos factores se encuentran la potencia de emisión, el diagrama de radiación de las antenas, su orientación e inclinación, permitiendo todos ellos cierto grado de control. Sin embargo, el medio por el que se propaga la señal, tiene un efecto considerable en el alcance final de los recursos radio que la estación base proporciona a los terminales móviles. Por este motivo es necesario caracterizar el canal móvil, tanto de banda estrecha como de banda ancha, con el objeto de conocer las pérdidas de propagación entre el transmisor y los múltiples puntos situados en la zona de cobertura. Esta predicción resulta fundamental para delimitar las regiones entre el transmisor y los diferentes receptores, así como para el estudio de interferencias entre usuarios y estaciones base que reutilicen los mismos recursos.

En este apartado se explican los diferentes modelos de propagación, y otros aspectos que tienen relación con la formación de las células, todos ellos necesarios para conocer el comportamiento de escenarios de elevada interferencia y sobrealcance tratados en esta tesis.

3.1 Introducción: Conceptos de propagación por canales móviles

La fase de despliegue de una red celular, bien sea sobre emplazamientos nuevos o sobre infraestructuras ya implantadas en tecnologías anteriores, requiere de una estimación previa del área de cobertura sobre la que se ofrecerán los diferentes recursos. En este sentido destacan los siguientes aspectos que describen la propagación por canales móviles:

- Cobertura zonal: es necesario disponer de una predicción inicial de las pérdidas de propagación entre la estación base y el área a la que dan servicio. En términos coloquiales se suele utilizar la expresión “*mancha*” a la zona cubierta que se muestra en los mapas coloreados de simulación de coberturas.
- Multiplicidad de trayectos: en el canal móvil existen muchos elementos de reflexión, tanto urbanos, como rurales o del propio terreno, que influyen en la recepción de múltiples rayos, lo que mejora sustancialmente la cobertura, pero a su vez produce desvanecimientos y distorsión.
- Variabilidad temporal del canal radio: debida al desplazamiento del terminal móvil en un entorno, lo que significa una variación con la distancia y con el tiempo de la multiplicidad de los trayectos, y en consecuencia, del nivel de potencia y de interferencia recibida. Este efecto tiene como consecuencias directas la reducción de la tasa binaria y la producción de distorsión.
- Caracterización del canal en banda estrecha: consiste en determinar la pérdida básica de propagación entre el transmisor y los terminales de usuario. Se trata de un modelo simple, válido para una estimación inicial en la fase de despliegue de red o incluso para cobertura de interiores.
- Caracterización del canal en banda ancha: para comunicaciones móviles de banda ancha es necesario analizar y modelar los efectos que se producen por la propagación multitrayecto, que se añaden a las pérdidas básicas de propagación en banda estrecha. Estos efectos tienen mayor repercusión cuando aumenta el número de elementos de un escenario donde se pueda reflejar la señal emitida, como sucede en entornos urbanos. Como consecuencia se produce una distorsión de la señal recibida, debido a la Interferencia Intersimbólica (ISI) y a los Desvanecimientos Selectivos en Frecuencia (FSF).
- Desarrollo de modelos de simulación: en la fase inicial de diseño de red y despliegue es necesario disponer de herramientas de simulación que ofrezcan una estimación del servicio que será ofrecido. Esta herramienta deberá ofrecer no solo predicciones de pérdida básica, sino también de las interferencias que se generen por la presencia de usuarios, debido a la dependencia mutua entre todas las células. En una fase posterior, para una red madura, los modelos de simulación aportan además, grandes beneficios en la optimización multobjetivo calidad-cobertura-capacidad.

En la Figura III.1 se muestra la estructura de este capítulo, cuyos conceptos están ampliamente desarrollados en [1] [2] [3] [4]. También es preciso destacar que las comunicaciones móviles bajo estudio en este trabajo de tesis están en la banda de frecuencia que va desde los 900 MHz, hasta los 2.600 MHz.

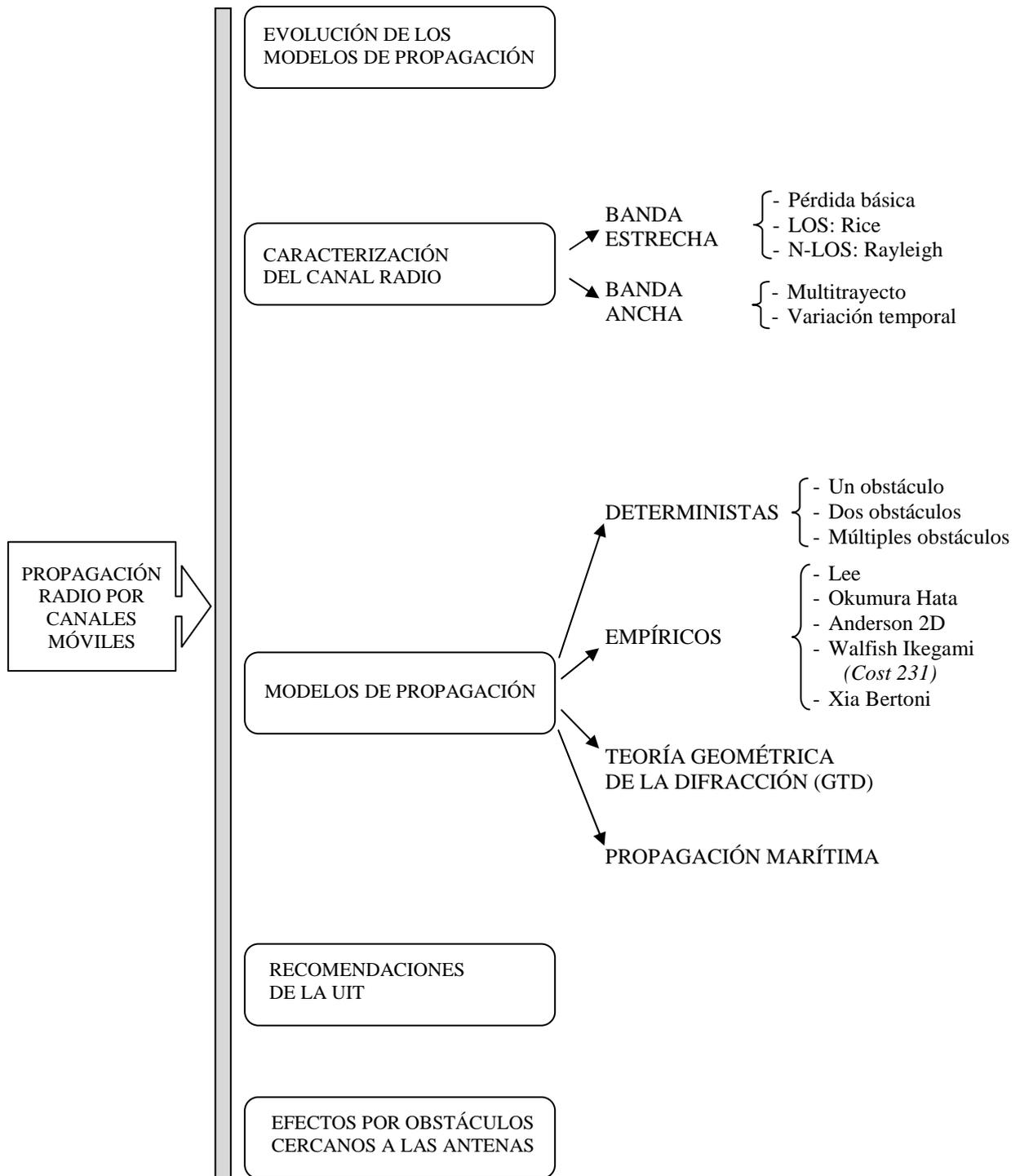


Figura III. 1 Estructura del capítulo

3.2 Evolución de los modelos de propagación

Los primeros métodos para sistemas de radiodifusión y móviles consistían en curvas de propagación propuestas por el CCIR. Para medios urbanos apenas existían modelos salvo los que estaban basados en las medidas realizadas en diferentes ciudades de Estados Unidos y Japón.

De todas ellas cabe destacar las llevadas a cabo en Japón por Okumura, a partir de las cuales se prepararon unas curvas de propagación y un método bastante bueno para predecir la zona de cobertura, que permitía incluir diferentes parámetros tales como la ondulación del terreno y la presencia de obstáculos aislados, así como correcciones para escenarios urbanos.

Posteriormente, gracias a la disponibilidad de ordenadores, se pudo informatizar el proceso de estimación de cobertura mediante la caracterización del terreno y el cálculo de alturas efectivas. Cabe destacar el método propuesto por Hata basado en curvas de propagación de Okumura y aplicable en una amplia gama de frecuencias y alturas de estaciones base y móviles.

En la fase inicial de despliegue de una red de comunicaciones móviles, este método, llamado Okumura-Hata, resulta muy útil para obtener una idea inicial de la zona de servicio que ofrecerá la instalación de una nueva estación base. En función de la cuadrícula de terreno de la que disponga el simulador, los resultados del nivel de cobertura en exteriores serán aceptables, aunque no ofrece información en interiores ni de los niveles de interferencias que se puedan obtener como consecuencia del uso que hagan los terminales de los recursos disponibles.

A partir de aquí surgen nuevos modelos que son mejoras del de Hata en los que se tiene en cuenta el efecto de edificios próximos y la anchura de la calle donde se encuentra el móvil. Todos ellos necesitan disponer del perfil existente entre la estación base y el móvil. Para ello, se han producido grandes avances en la digitalización de mapas topográficos para conseguir bases de datos de terreno [5].

Las predicciones de cobertura en interiores también han sido fruto de un gran trabajo por parte de varios investigadores, entre los que se encuentran [6] [7] [8] [9] [10]. Con los modelos de propagación propuestos es posible estimar el servicio ofrecido en interiores de edificios, túneles, líneas de metro, garajes, centros comerciales, aeropuertos, oficinas, y ascensores entre otros. Destaca por su singularidad algunas peticiones de clientes para dar cobertura a galerías de agua y minas. No obstante, los modelos de propagación en interiores no son objeto de estudio de esta tesis.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT, en su recomendación UIT-R P.1057-1, considera que la propagación de las ondas radioeléctricas está asociada principalmente con un medio aleatorio, lo que hace necesario analizar los fenómenos de propagación con métodos estadísticos. Además, en la mayoría de los casos, es posible describir satisfactoriamente las variaciones de los parámetros de propagación en el tiempo y en el espacio sobre la base de distribuciones estadísticas conocidas. Por consiguiente, es importante conocer las propiedades fundamentales de las distribuciones de probabilidad más comúnmente utilizadas en las estadísticas de los estudios de propagación. Por tal motivo, dicha recomendación indica que para la planificación de

los servicios de radiocomunicaciones y para la predicción de los parámetros de calidad de funcionamiento de los sistemas, se utilice la información estadística pertinente al modelo de propagación.

3.3 Caracterización del canal radio en banda estrecha

La pérdida básica de propagación para canales en banda estrecha se evalúa de la siguiente manera [1]:

$$L_b = L_{bf} + L_{ex} + L_{ent}$$

donde

- L_{bf} : pérdida básica entre el transmisor y el receptor, en condiciones de espacio libre.
- L_{ex} : pérdida en exceso debida a los efectos del terreno entre el transmisor y el receptor, producida por obstáculos tales como colinas, masas de árboles, etc. La influencia del terreno produce una atenuación variable, y se denomina *desvanecimiento lento o por sombra (shadow fading)*.
- L_{ent} : pérdida debida a los efectos del entorno inmediato al receptor en un círculo de radio igual a 100λ aproximadamente, donde se producen interacciones de las ondas con las estructuras próximas al receptor. Aparece sobre todo en medios urbanos a causa de la baja altura de la antena del terminal móvil sobre el suelo (1,5 a 3m), y se debe a la presencia de obstáculos próximos al móvil, tanto naturales como artificiales: árboles, suelo, postes, fachadas de edificios, etc. Esta situación es la que da origen a la propagación multitrayecto, produciendo el fenómeno denominado *desvanecimiento rápido (fast fading)*.

En la Figura III.2 se presenta gráficamente la pérdida básica de propagación de la señal que recibe un terminal mientras se aleja de la estación base que le está dando servicio.

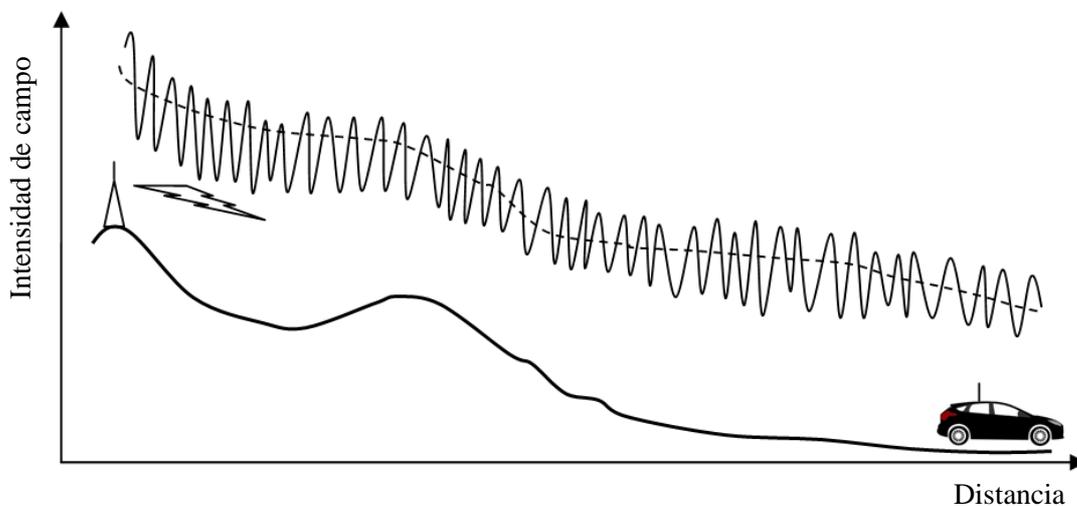


Figura III. 2 Pérdida básica de propagación

En los escenarios de propagación en comunicaciones móviles se consideran dos casos típicos [2]:

- a) cuando el terminal recibe la señal directa emitida por el transmisor, con una potencia superior a los ecos producidos por el multitrayecto, se denomina *condiciones LOS* (Light Of Sight). La señal recibida se puede modelar con una distribución tipo Raice y se muestra en la Figura III.3.
- b) cuando no existe la señal directa, y solo se recibe los diferentes ecos, se denomina *condiciones N-LOS* (No Line Of Sight). Este caso se modela con una distribución tipo Rayleigh como se muestra en la Figura III.4.

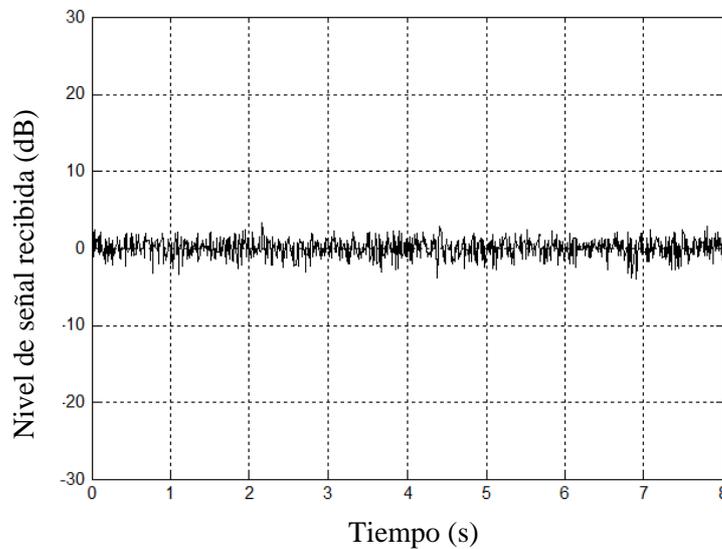


Figura III. 3 Distribución Rice de la señal recibida

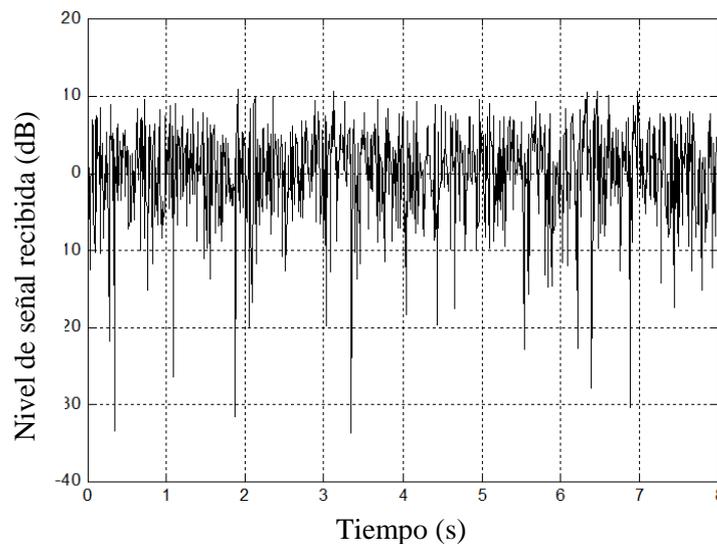


Figura III. 4 Distribución Railegh de la señal recibida

3.4 Caracterización del canal radio en banda ancha

La propagación multitrayecto es el mecanismo básico para la llegada de la energía radioeléctrica a terminales situados en entornos rodeados de obstáculos. Principalmente en escenarios urbanos donde predominan los canales N-LOS, este efecto permite obtener cobertura a nivel de calle incluso con edificios altos en el entorno, así como en puntos recónditos, como puede ser interiores de edificios, locales, centros comerciales, garajes, aeropuertos, ascensores o túneles [11] [12] [13].

Como consecuencia del multitrayecto, para una señal transmitida dada, llegan al receptor numerosas componentes o ecos a través de diferentes caminos con distintas interacciones con los obstáculos interpuestos. Por lo tanto, tales componentes acceden al receptor en tiempos diferentes y con amplitudes y fases aleatorias. La suma de estas componentes se manifiesta como una onda cuya amplitud presenta amplias y rápidas variaciones de nivel a lo largo del recorrido del móvil. Este efecto se llama *dispersión temporal (time spreading)*.

Sean t_i y t_0 los tiempos de propagación del eco i -ésimo y del eco que llega en primer lugar. A la diferencia $t_i - t_0$ se le denomina *exceso de retardo (delay excess)* del eco i -ésimo. A partir del conjunto de valores $\{t_i - t_0\}$ del exceso de retardo se obtiene una característica calificativa de los canales multitrayecto llamada *dispersión del retardo (delay spread)* cuyo valor depende del entorno de propagación (rural, urbano, etc.). Una diferencia de recorridos de 300 m corresponde a un exceso de retardo de 1 μ s. Como en los medios urbanos, el multitrayecto se genera en estructuras relativamente próximas al móvil, es normal encontrar dispersiones de retardo de 0,5 a 1,5 μ s. En medios rurales los valores aumentan debidos a ecos producidos por reflexiones en obstáculos alejados (montañas). Se llama *desvanecimiento a gran escala* cuando el multitrayecto es producido por la presencia de montañas y edificios. En cambio, si el desvanecimiento es producido por cambios pequeños en la posición, se denomina *desvanecimiento a pequeña escala*.

La dispersión temporal produce, en el dominio del tiempo, *interferencia entre símbolos (ISI)* (Figura III.5) y en el dominio de la frecuencia, para sistemas de banda ancha, *desvanecimiento selectivo en frecuencia (FSF)*. Como consecuencia, la señal recibida experimenta una distorsión. Dicho de otro modo, un canal tiene FSF cuando la *dispersión del retardo* es mayor que el periodo del símbolo, y ocurre cuando las componentes multitrayecto de un símbolo se extienden más allá del tiempo de duración de los símbolos.

La caracterización del FSF de un canal se realiza mediante un parámetro denominado *anchura de banda de coherencia del canal*, B_c , que mide el grado de correlación entre dos componentes espectrales de la señal transmitida separadas B_c . Si la anchura de banda de la señal es B_T , cuando $B_T \ll B_c$, las componentes espectrales de la señal están muy correladas y se desvanecen a la vez. Se dice entonces que el *desvanecimiento es plano*. En otras palabras, cuando la *dispersión del retardo* es menor que el periodo del símbolo, no existe ISI y el *desvanecimiento es plano*. Pero si $B_T \gg B_c$ habrá componentes que se desvanecen cuando otras no lo hacen y entonces el *desvanecimiento es selectivo*.

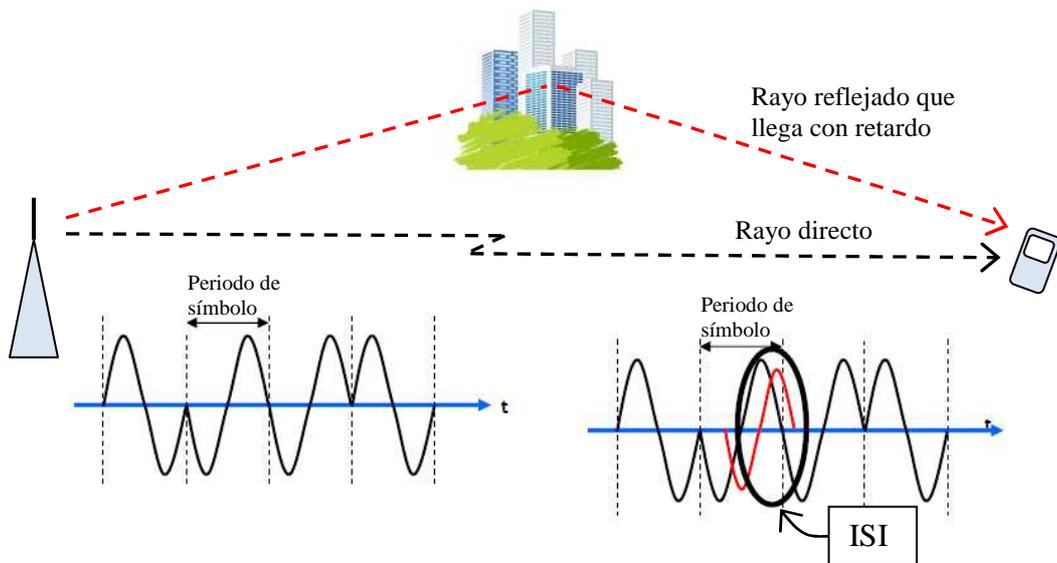


Figura III. 5 Interferencia Inter Simbólica

En cuanto a la movilidad de los terminales, destacan otros efectos. Al desplazarse un vehículo a través del patrón de ondas estacionarias generado por la propagación multitrayecto, la amplitud de la tensión recibida varía en función del tiempo con un ritmo que depende de la velocidad, de forma que el patrón espacial se transforma en otro temporal. Si la respuesta al impulso del canal varía más rápido que la señal transmitida, se llama *desvanecimiento rápido* (*fast fading*). En caso contrario, se denomina *desvanecimiento lento* (*slow fading*).

Como consecuencia se producen dos efectos íntimamente ligados entre sí. Por una parte, el desvanecimiento espacial se transforma en *desvanecimiento selectivo en tiempo* (TSF) y por otra, las variaciones temporales de la amplitud recibida se traducen en una dispersión de frecuencia, denominada *desplazamiento Doppler* que es función de la velocidad y dirección del movimiento del vehículo y de la frecuencia, y tiene valores máximos iguales a $\pm v/\lambda$. El desplazamiento Doppler produce variaciones de las frecuencias espectrales de la señal y en consecuencia, distorsión. Cada componente de multitrayecto experimenta un desplazamiento Doppler f_{di} . A partir del conjunto de los desplazamientos se obtiene un parámetro calificador de la movilidad llamado *dispersión Doppler*.

Para caracterizar el TSF se establece un parámetro llamado *tiempo de coherencia* del canal, T_C , tal que dos elementos de señal separados entre sí un tiempo inferior a T_C están correlados y “ven” el mismo canal. Si su separación temporal es mayor que T_C tendrán diferente correlación y les afectará el TSF.

En resumen, la caracterización en banda ancha de canales multitrayectos se realiza mediante cuatro parámetros básicos, cuyos efectos se muestran en las Figuras II.6 y II.7:

- a) para describir la dispersión temporal: Dispersión de retardo y anchura de banda de coherencia B_C .
- b) para describir la dispersión de frecuencia: Dispersión Doppler y tiempo de coherencia T_C .

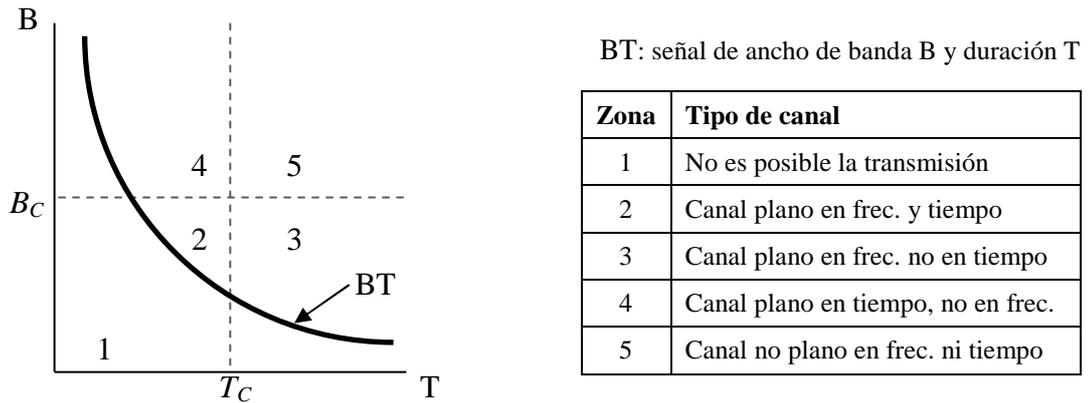


Figura III. 6 Efectos del canal

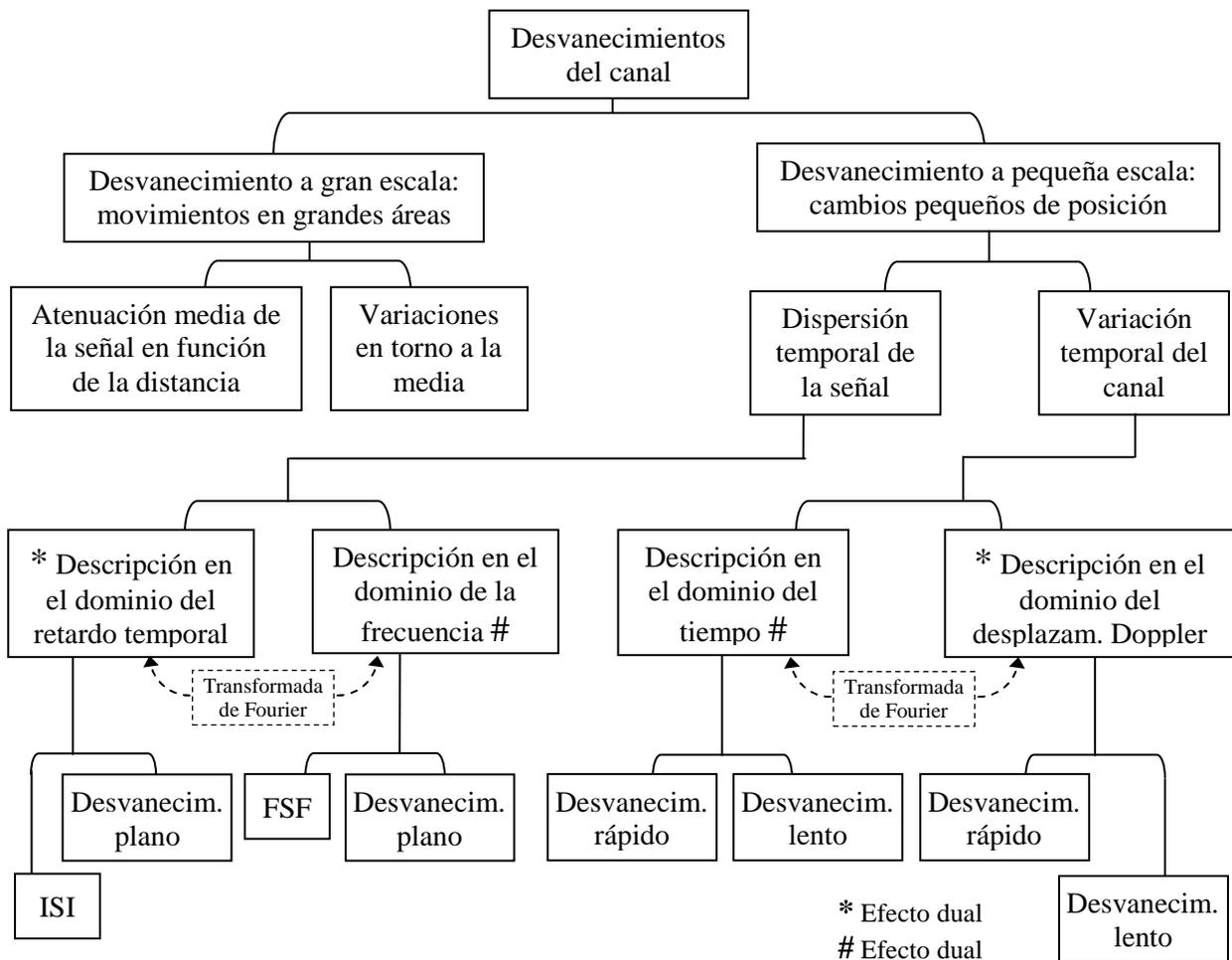


Figura III. 7 Caracterización del canal en banda ancha

3.5 Modelos deterministas

Los métodos deterministas proporcionan una predicción de valor mediano de la pérdida básica de propagación. Adicionalmente, hay que añadir el efecto del

desvanecimiento lento, que se modela por una distribución log-normal, con desviación típica que es función del entorno seleccionado. Por consiguiente, la atenuación (en dB) no rebasada en el $U\%$ de las ubicaciones, vale:

$$L(U) = L_b - K(U)\sigma_L$$

donde

L_b : es el valor mediano de pérdida básica de propagación,

$K(U)$: la función inversa acumulativa gaussiana,

σ_L : la desviación típica.

Estos modelos se consideran suficientemente representativos para llevar a cabo una predicción de valor mediano de la pérdida básica de propagación. Generalmente, los modelos de predicción de atenuación constan de dos partes:

- a) por un lado se consideran los obstáculos significativos del terreno, y se evalúan las pérdidas por difracción,
- b) en segundo término, se aplican expresiones de predicción de pérdidas para zona concretas a través de modelos específicos.

Para el cálculo de pérdidas de propagación se dispone de varios modelos en función del número y características del obstáculo. En una primera aproximación, se idealiza la forma de los obstáculos asimilando éstos a aristas estrechas de espesor despreciable o a aristas gruesas y redondeadas. Además, dado que para múltiples obstáculos, los métodos rigurosos de cálculo de pérdidas resultan muy complejos, se suele recurrir a métodos empíricos que combinan de cierta forma las pérdidas de cada obstáculo por separado.

3.5.1 Difracción de un obstáculo

El parámetro básico para las expresiones de atenuación por difracción es el despejamiento normalizado. Para cada punto del perfil, el despejamiento se calcula con la siguiente expresión:

$$v = 0,00258h \sqrt{\frac{fd}{d_1 d_2}}$$

donde

$h(m)$: despejamiento en ese punto ($h > 0$ si existe obstrucción por el obstáculo),

$f(MHz)$: frecuencia,

$d(km)$: distancia del vano,

$d_1(km)$: distancia del obstáculo al transmisor,

$d_2(km)$: distancia del obstáculo al receptor.

A efectos prácticos, se puede sustituir los cálculos de distancia por las diferencias de las proyecciones horizontales, sin cometer errores apreciables, según la expresión:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \approx x_2 - x_1$$

El cálculo de atenuación por difracción en un obstáculo ofrece tres modelos en función de su morfología, como se muestra en la Figura III.8.

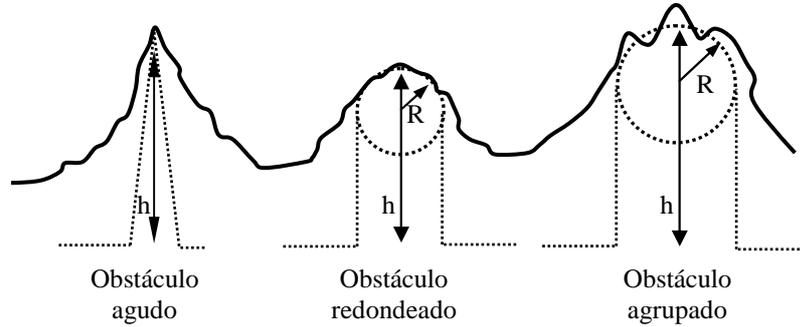


Figura III. 8 Modelo de obstáculos

Obstáculo agudo

En este caso, las pérdidas por difracción sólo dependen del despejamiento normalizado y se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$L_D(v) = 6,9 + 20 \log(\sqrt{(v-0,1)^2 + 1} + v - 0,1)(dB); \text{ para } -0,7 \leq v \leq \infty$$

Obstáculo agrupado

El modelo anterior resulta útil para obstáculos aislados. Para obstáculos muy próximos entre sí es necesario agruparlos en uno solo, si se cumple:

$$x_2 - x_1 = 0,5km$$

$$\frac{x_1(d - x_2)}{x_2(d - x_1)} \geq 0,91$$

En este caso, la pérdida se evalúa como la que corresponde a un obstáculo agudo más una atenuación adicional debida a la curvatura del obstáculo equivalente:

$$A = L_D(v) + T(m,n)(dB)$$

donde la función $T(m,n)$ se calcula de la siguiente manera:

$$T(m,n) = km^b$$

$$k = 8,2 + 12n$$

$$b = 0,73 + 0,27(1 - e^{-1,43n})$$

$$m = R \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \left/ \left(\frac{\pi R}{\lambda} \right)^{1/3} \right.$$

$$n = h \left(\frac{\pi R}{\lambda} \right)^{2/3} \left/ R \right.$$

Obstáculo redondeado

Aunque se puede emplear el método anterior, existe otra aproximación equivalente, según la cuál la atenuación se desglosa en tres términos. Un primer término representa la pérdida en el obstáculo considerando agudo, y los dos restantes consideran las pérdidas adicionales debidas al equivalente redondeado.

$$A = A(v, \rho) = A(v, 0) + A(0, \rho) + U(v\rho)(dB)$$

siendo

$$\rho = \sqrt[6]{\frac{\lambda R^2}{\pi} \sqrt{\frac{d}{d_1 d_2}}}$$

Los tres términos de pérdidas se obtienen a partir de las siguientes expresiones:

$$A(v, 0) = \begin{cases} 6,02 + 9v + 1,65v^2; & \text{para } -0,8 \leq v \leq 0 \\ 6,02 + 9,1v + 1,27v^2; & \text{para } -0 \leq v \leq 2,4 \\ 12,953 + 20 \log v; & \text{para } v > 2,4 \end{cases}$$

$$A(0, \rho) = 6,02 + 5,556\rho + 3,148\rho^2 + 0,256\rho^3$$

$$U(v\rho) = \begin{cases} 11,45(v\rho) + 2,19(v\rho)^2 - 0,206(v\rho)^3 - 6,02; & \text{para } v\rho \leq 3 \\ 13,47(v\rho) + 1,058(v\rho)^2 - 0,048(v\rho)^3 - 6,02; & \text{para } 3 < v\rho \leq 5 \\ 20(v\rho) - 1,82; & \text{para } v\rho > 5 \end{cases}$$

con la validez de las fórmulas condicionada al cumplimiento de las siguientes relaciones:

$$\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{d_1 d_2} \gg 1 ; \sqrt[3]{\left(\frac{\pi R}{\lambda}\right)^2 \frac{d_1 d_2}{R^2}} > 0,1$$

En el caso de que no se cumpla alguna de estas desigualdades, se calcula la pérdida en el obstáculo redondeado considerando únicamente el primer término (obstáculo agudo).

3.5.2 Difracción de dos Obstáculos

Cuando se evalúan las pérdidas por difracción en dos obstáculos, se plantean tres casos posibles en función de la geometría del vano.

Método Wilkerson

Se emplea este método cuando existe visibilidad directa entre el transmisor y el receptor, pero ambos obstáculos presentan despejamiento insuficiente, como se muestra en la Figura III.9. Las pérdidas se calculan como la suma de las pérdidas individuales de cada obstáculo, considerados como obstáculos aislados.

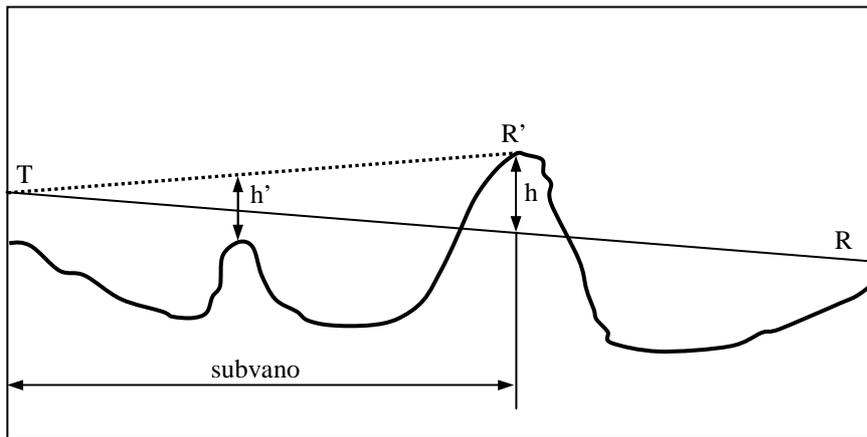


Figura III. 9 Geometría del Método Wilkerson para dos obstáculos

Método Epstein-Peterson

Se aplica este método cuando los dos obstáculos obstruyen la línea de visión directa, según se muestra en la Figura III.10. Las pérdidas totales se calculan como las pérdidas individuales en cada obstáculo considerado como obstáculo aislado en el subvano definido por el otro obstáculo. Se añade además un término corrector que es función de las posiciones relativas de los obstáculos.

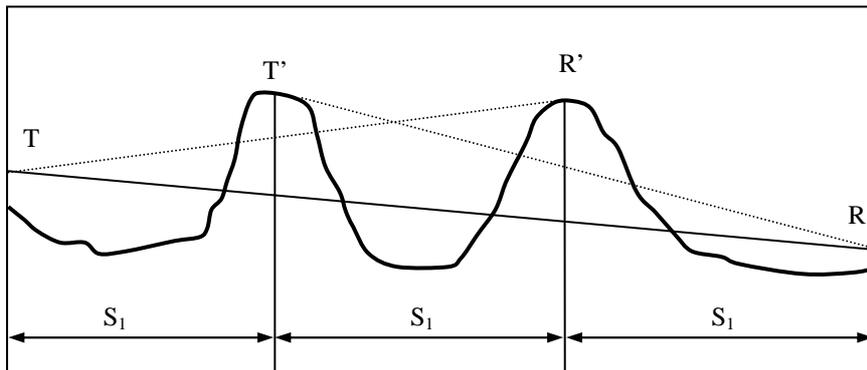


Figura III. 10 Geometría del Método Epstein-Peterson para dos obstáculos

En el caso de que exista visión directa en alguno de los subvanos considerados, no se aplica este método, sino el de Wilkerson de la Figura III.11.

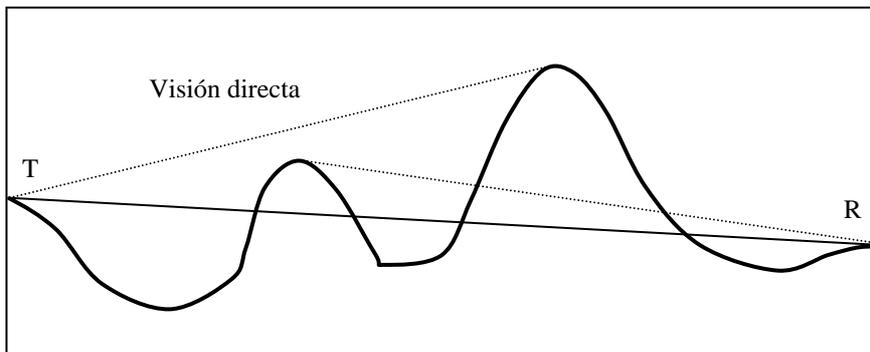


Figura III. 11 Subvano con visión directa

3.5.3 Difracción en Múltiples Obstáculos

Método Epstein-Peterson generalizado

Constituye una extensión del método para dos obstáculos. Para el cálculo de la atenuación se determina la línea que une el receptor y el transmisor con vértices en cada uno de los obstáculos, tal y como se muestra en la Figura III.12. Las pérdidas se calculan a partir de la suma de las pérdidas de cada obstáculo en el subvano en el que el obstáculo anterior y posterior se consideran extremos de éste, y las pérdidas debidas a obstáculos que en ese mismo subvano queden por debajo de la línea que une los extremos de ese subvano, considerando únicamente el obstáculo cuyo valor de despejamiento sea menos negativo. Es necesario añadir un factor de corrección que es función de la distancia entre obstáculos.

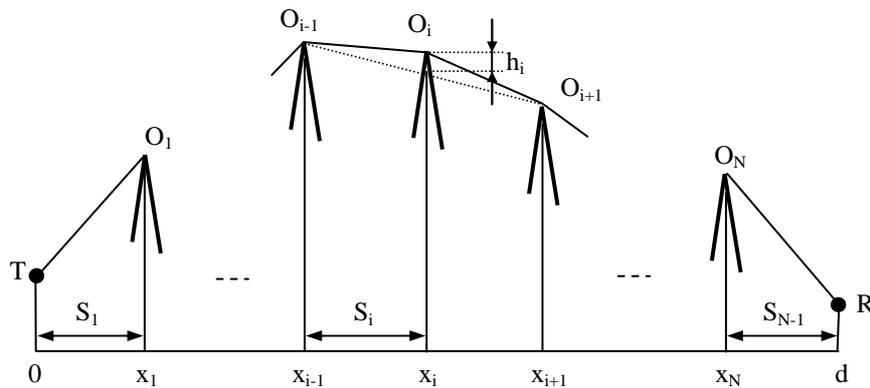


Figura III. 12 Geometría del Método Epstein-Peterson generalizado

Método Deygout

Para calcular las pérdidas de los múltiples obstáculos se emplea un algoritmo recurrente. Primero se determina el obstáculo principal, y se calcula las pérdidas a partir de éste, considerándolo como aislado. El cálculo se realiza en cada uno de los subvanos que define el obstáculo principal a izquierda y derecha. Se determinan los obstáculos principales de cada una de los subvanos y se repite el proceso de forma reiterada. En teoría, el proceso recurrente se ejecutaría hasta que no quedarán obstáculos en los subperfiles. En la práctica, es suficiente llevar a cabo una única iteración, de forma que se tiene en cuenta el perfil principal y los subperfiles a izquierda y derecha del obstáculo principal, según Figura III.13.

Las pérdidas totales vienen definidas por las pérdidas en el obstáculo principal, más las pérdidas en los subvanos, añadiendo un término corrector en función de las pérdidas en el obstáculo principal y de los obstáculos principales de cada uno de los dos subperfiles, cuando se calculan considerando cada obstáculo como aislado en todo el perfil.

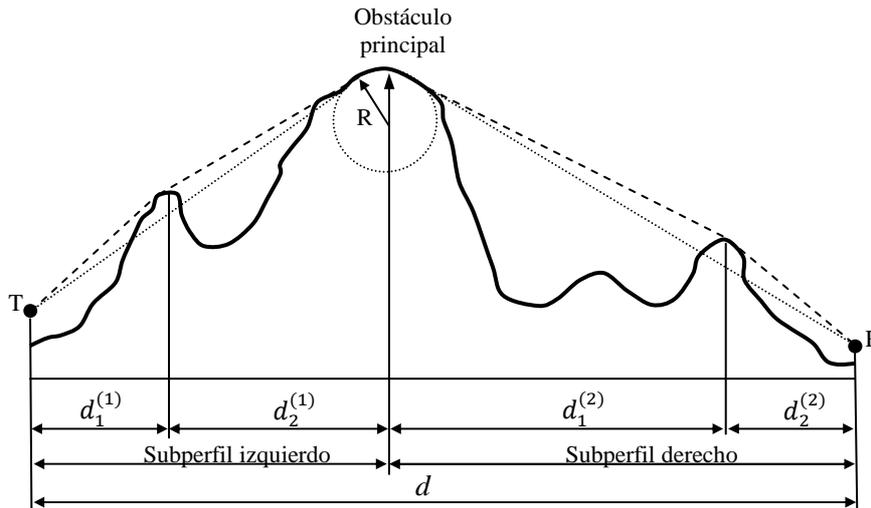


Figura III. 13 Geometría del Método Deygout

Para calcular las pérdidas en el obstáculo aislado se considera un obstáculo redondeado, caracterizado por los horizontes desde transmisor y receptor en el entorno del obstáculo.

3.6 Modelos empíricos

Los modelos más comunes utilizados en la planificación de los sistemas actuales de comunicaciones móviles (bandas 900MHz., 1800MHz. y 2000MHz.) son los siguientes:

- a) Lee
- b) Okumura Hata
- c) Anderson 2D
- d) Walfish Ikegami (Cost 231)
- e) Xia Bertoni

Los modelos no basados en trazado de rayos consideran que la pérdida básica de propagación está compuesta por tres términos fundamentales, relacionados con los fenómenos físicos implicados en la propagación en el caso de entornos urbanos:

- a) pérdidas de espacio libre (L_{fs}),
- b) pérdidas por difracción tejado-calle, que consideran las pérdidas por difracción en el último obstáculo desde el tejado hasta el nivel de la calle (L_{rts}),
- c) pérdidas por difracción multipantalla, correspondientes a las pérdidas por difracción en múltiples obstáculos interpuestos entre transmisor y receptor (L_{msd}).

Para cada perfil trazado entre la estación base y el móvil, se calculan una serie de parámetros que permiten modelarlo como un perfil con altura de edificios, separaciones entre ellos y anchura de las calles constantes, tal y como se muestra en la Figura III.14.

Los parámetros son los siguientes:

- h_{roof} : altura media de los edificios,
- $\Delta h_b = h_b - h_{roof}$: altura relativa de la estación base sobre el nivel medio de edificios,
- b : separación media de edificios,
- w : anchura media de las calles,
- $\Delta h_m = h_{roof} - h_m$: altura relativa de los edificios sobre el móvil.

Pese a que la geometría y la obtención de los parámetros geométricos son prácticamente similares en ambos modelos, existen diferencias considerables:

- d) en el modelo Walfish-Ikegami se hace distinción entre los puntos en los que hay LOS y en los que no hay, de forma que en el primer caso, se considera L_{fs} y en el segundo, los términos L_{fs} , L_{rts} y L_{msd} , aunque el valor de las pérdidas en espacio libre se calcula de forma diferente en ambos casos. En el modelo Xia-Bertoni simplificado no se considera esta distinción, sino que las propias expresiones tienen en cuenta la diferencia en ambos casos,
- e) las expresiones calculadas para los términos de difracción, L_{rts} y L_{msd} , son de carácter empírico para Walfish-Ikegami y se obtienen a partir de simplificaciones de expresiones teóricas en Xia-Bertoni simplificado,
- f) el modelo Xia-Bertoni emplea fórmulas diferentes para calcular los términos de pérdidas por difracción, L_{rts} y L_{msd} , según se encuentre la altura del transmisor sobre el nivel medio de los edificios (altura de transmisor por encima, próxima o por debajo).

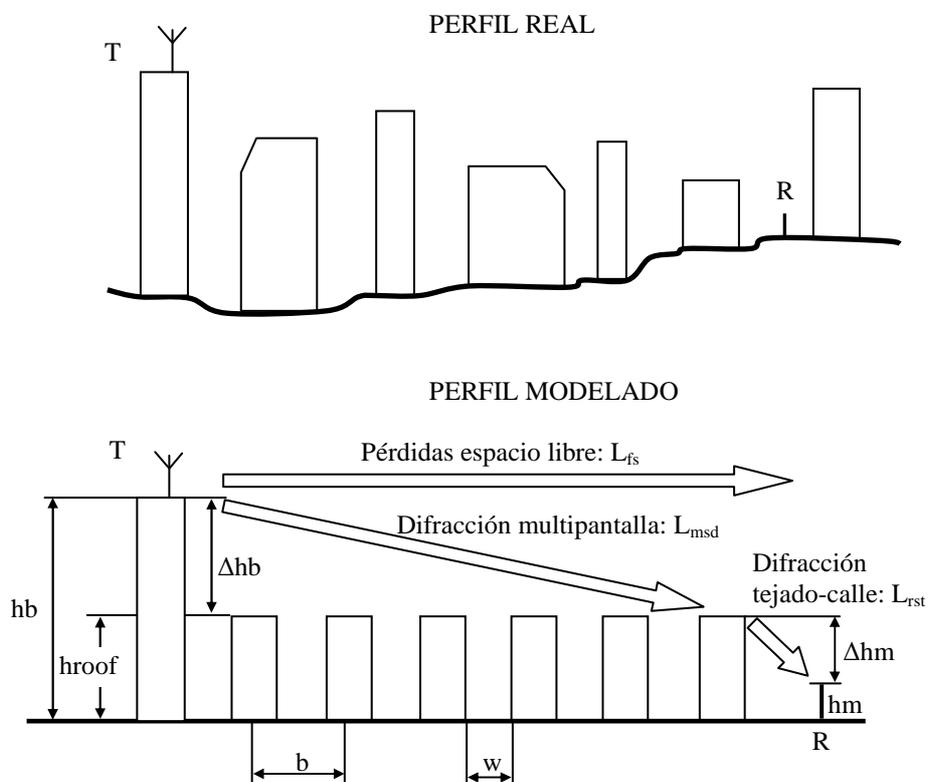


Figura III. 14 Geometría de referencia

3.6.1 Modelo Lee

Lee propone un modelo basado en la fórmula de tierra plana y en mediciones experimentales, que proporciona la potencia recibida en dBm para dos tipos de entornos: suburbano y urbano (basado en tres tipos de ciudades).

Para ello determina un factor de corrección α_0 que vale:

$$\alpha_0 = \left(\frac{h_t}{30,5}\right)^2 \left(\frac{h_r}{3}\right)^n \left(\frac{p_t}{10}\right) \left(\frac{g_{td}}{4}\right) \left(\frac{g_{rd}}{1}\right)$$

siendo:

- h_t : altura de la antena de transmisión
- h_r : altura de la antena de recepción
- p_t : potencia de transmisión
- g_{td} : ganancia de antena de transmisión
- g_{rd} : ganancia de antena de recepción
- f : frecuencia
- $n=2$ para $h_r > 10$ m
- $n=1$ para $h_r < 3$ m

Las expresiones que propone Lee según el escenario, son:

$$P_r(\text{dBm}) = -53,9 - 38,4 \log d(\text{km}) - n \log \left(\frac{f}{900}\right) + 10 \log \alpha_0$$

Zona suburbana

$$P_r(\text{dBm}) = -62,5 - 36,8 \log d(\text{km}) - n \log \left(\frac{f}{900}\right) + 10 \log \alpha_0$$

Zona urbana (Filadelfia)

$$P_r(\text{dBm}) = -55,2 - 43,1 \log d(\text{km}) - n \log \left(\frac{f}{900}\right) + 10 \log \alpha_0$$

Zona urbana (Newark)

$$P_r(\text{dBm}) = -77,8 - 30,5 \log d(\text{km}) - n \log \left(\frac{f}{900}\right) + 10 \log \alpha_0$$

Zona urbana (Tokyo)

En estas expresiones, el término n tiene los siguientes valores:

- $n=2$ para $f < 450$ MHz y zona suburbana
- $n=3$ para $f > 450$ MHz y zona urbana

3.6.2 Modelo Okumura-Hata

Considerando las modificaciones de aumento de rango de frecuencia, distancia y altura, la pérdida básica de propagación es la suma de las pérdidas propuestas por la fórmula ampliada de Okumura-Hata, L_{OH} , más las pérdidas por difracción, L_{dif} , las cuáles pueden estimarse según los métodos expuestos anteriormente:

$$L_b = L_{OH} + L_{dif}$$

Las correcciones por morfología, o bien están implícitas en los cálculos o se añaden al final en forma de constantes.

Las pérdidas de Okumura-Hata se obtienen a partir de las pérdidas de entorno urbano, a las que se añaden factores de corrección para entornos suburbanos y rurales, según la expresión:

$$L_{OH_urbano} (dB) = C_K + C_F \log f - C_{HT} \log h_b - a(h_m) + (C_{A_HT} - C_{B_HT} \log h_t) \log d^b$$

donde:

- f : frecuencia, en MHz.
- d : distancia, en km.
- h_b : altura efectiva de la antena de la estación base.
- C_K : término independiente de pérdidas, en dB.
- C_{HT} : coeficiente de dependencia logarítmica con la altura efectiva de la antena de la estación base.
- C_{A_HT} : término independiente de la recta que controla la dependencia con la distancia.
- C_{B_HT} : inverso de la pendiente de la recta anterior
- $a(h_m)$: función de corrección según la altura de la antena del móvil.
- b : factor adicional de modificación de la dependencia con la distancia.

El factor b incluye la modificación propuesta en UIT-R 529 para distancias superiores a 20km:

$$b = \begin{cases} 1; & \text{para } d \leq 20km \\ 1 + (0,14 + 1,87 \cdot 10^{-4} f + 1,07 \cdot 10^{-3} h_b) \left(\log \frac{d}{20} \right)^{0,8} & ; \text{ para } d > 20km \end{cases}$$

Para los coeficientes C_K , C_F y C_{HT} se tienen en cuenta cuatro rangos fundamentales, según los distintos valores de la frecuencia y la altura efectiva que se muestran en la Tabla III.1.

		Frecuencia	
		$f \leq 1500\text{MHz}$	$1500\text{MHz} \leq f \leq 2\text{GHz}$
Altura efectiva	$h_t \leq 220\text{m}$	RANGO 1 Formulación Original Okumura Hata $C_K=69,95\text{dB}$ $C_F=26,16$ $C_{HT}=13,82$	RANGO 2 Extensión COST 231 en frecuencia $C_K=43,30\text{dB}$ $C_F=33,9$ $C_{HT}=13,82$
	$h_t > 220\text{m}$	RANGO 3 Extensión con Método de altura efectiva $C_K=92,23\text{dB}$ $C_F=26,16$ $C_{HT}=23,5$	RANGO 4 Extensión compuesta (por continuidad) $C_K=67,63\text{dB}$ $C_F=33,9$ $C_{HT}=23,5$

Tabla III. 1 Coeficientes CK, CF y CHT para el modelo Okumura-Hata

Para $C_{A_{HT}}$ y $C_{B_{HT}}$ los valores por defecto son 44,9 y 6,55 respectivamente.

El término $a(h_m)$ es una corrección que depende de la altura de la antena del móvil. Para la altura estándar, $h_m=1,5\text{m}$, $a(h_m)=0$. Para otras alturas, depende del tipo de ciudad de la siguiente forma:

a) para ciudades pequeñas:

$$a(h_m) = (1,1 \log f - 0,7)h_m - (1,56 \log f - 0,8)$$

b) para ciudades grandes:

$$a(h_m) = \begin{cases} 8,29(\log 1,54h_m)^2 - 1,1; & \text{para } f \leq 300\text{MHz} \\ 3,2(\log 11,75h_m)^2 - 4,97; & \text{para } f > 300\text{MHz} \end{cases}$$

Las pérdidas totales, según el método Okumura Hata se calculan a partir de las pérdidas del modelo urbano, añadiendo correcciones para los entornos urbano, suburbano y rural:

$$L_{OH} = \begin{cases} L_{OH_URBANO} \\ L_{OH_URBANO} - 2(\log \frac{f}{28})^2 - 5,4 \\ L_{OH_URBANO} - 4,78(\log f)^2 + 18,33 \log f - 40,94 \end{cases}$$

La altura efectiva es un parámetro relacionado con la altura sobre el nivel medio del terreno o sobre el plano de reflexión de un rayo. Su cometido es modelar la contribución por interferencia constructiva o destructiva de un posible rayo reflejado en las proximidades del receptor, mediante la variación aparente de la altura de la antena.

Los dos métodos de cálculo de alturas efectivas más empleados son los siguientes:

- a) variante del método propuesto por UIT-370, basado en diferencias sobre el nivel medio del terreno en las cercanías del transmisor, en concreto entre dos distancias normalizadas, d_1 y d_2 . Para comunicaciones móviles, se toma:

$$\begin{cases} d_1 = \frac{d}{4}; d_2 = d; & \text{para } d \leq 8km \\ d_1 = 3; d_2 = d; & \text{para } 8km < d \leq 15km \\ d_1 = 3; d_2 = 15; & \text{para } d > 15km \end{cases}$$

- b) método basado en diferencias sobre una recta de regresión parcial de perfil. El intervalo del perfil en el que se realiza la regresión lineal viene determinado por la intersección del primer elipsoide de Fresnel (que se explicará en el apartado 2.10.1) con el perfil. A partir de este dato, para considerar la morfología del terreno, se determina la recta que mejor se ajusta para todos los puntos del terreno ente dicha intersección y la posición del móvil, y se calcula la altura efectiva como la distancia mínima desde lo alto del mástil de antena a la recta de ajuste (Figura III.15).

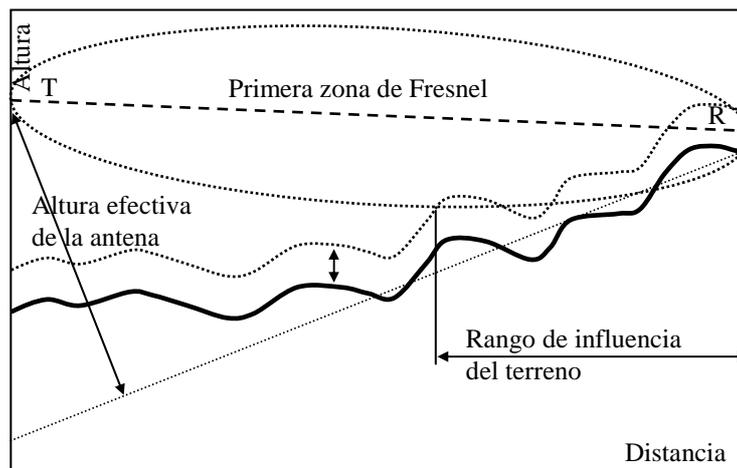


Figura III. 15 Cálculo de la altura efectiva con visión

3.6.3 Modelo Anderson 2D

Este modelo diferencia los casos en los que existe visión directa y aquellos en los que no la hay, de forma que cabe distinguir dos modos fundamentales y excluyentes de funcionamiento:

- a) modo LOS, con visión directa, en el que se utiliza el método de dos rayos con correcciones.
- b) modo NLOS, sin visión directa, en el que se calculan las pérdidas por difracción en múltiples obstáculos.

Adicionalmente, a las pérdidas previstas en cada modo se añaden las correcciones por morfología que se hayan definido.

Modo LOS

En general, en un trayecto con visión directa, el campo en el receptor se debe a las contribuciones del rayo directo desde el transmisor y un cierto número de rayos procedentes de fuentes de reflexión y refracción. Para antenas con altura baja, transmisor y principalmente receptor en sistemas de comunicaciones móviles, las contribuciones dominantes están constituidas por el rayo directo y un único rayo reflejado en las inmediaciones del receptor. En este método se calcula la geometría del rayo reflejado y su composición vectorial con el rayo directo. Además, se añade una corrección para considerar las posibles obstrucciones del elipsoide de Fresnel.

La pérdida básica según este modelo se refleja por la siguiente ecuación:

$$L_{b_LOS} = 32,45 + 20 \log f (MHz) + 20 \log d (km) + L_{reflex} + L_{Fresnel} + L_{morfo}$$

donde

L_{reflex} : son las pérdidas debidas al rayo reflejado,

$L_{Fresnel}$: son las debidas a la obstrucción parcial del elipsoide de Fresnel,

L_{morfo} : representan las correcciones por morfología.

El valor de L_{reflex} se calcula a partir del coeficiente de reflexión, módulo y fase, y del desfase debido a la diferencia de caminos:

$$L_{reflex} = 20 \log |1 + |R| e^{j(\varphi_R + \Delta\varphi)}|$$

Para el valor $L_{Fresnel}$, la obstrucción parcial de elipsoide de Fresnel se calcula con C_{obs} como la diferencia de altura entre el rayo y el terreno, y R_F como el radio equivalente al 60% de la zona de Fresnel, sólo para el obstáculo que intercepte en mayor medida la zona de Fresnel. La expresión es la siguiente:

$$L_{Fresnel} = 6 \left(1 - \frac{C_{obs}}{R_F}\right)$$

Modo NLOS

En este modelo, a las pérdidas de espacio libre se añaden las pérdidas por difracción debidas a los obstáculos que interceptan la línea de visión directa. Los obstáculos correspondientes se modelan como redondeados. A partir de esto, se combinan las pérdidas debidas a cada obstáculo con el método Epstein-Peterson generalizado. Se añaden además dos factores de corrección adicionales por obstrucción parcial en los trayectos que van desde el transmisor al primer obstáculo y desde el último obstáculo hasta el receptor, que se calculan de forma similar al método LOS.

La pérdida básica de propagación con este método es:

$$L_{b_NLOS} = 32,45 + 20 \log f (MHz) + 20 \log d (km) + L_{Difracción} + L_{T.Fresnel} + L_{R.Fresnel} + L_{morfo}$$

3.6.4 Modelo de Walfish-Ikegami (COST-231)

Este modelo proporciona buenos resultados cuando la altura de la antena de la estación base se encuentra por encima de la altura media de los edificios ($h_b > h_{roof}$), como en las macrocélulas. Pero el error aumenta cuando la altura de las antenas de la estación base se aproxima a la altura de los tejados, o está por debajo de ésta (microcélulas). Los rangos de validez del modelo son: banda de frecuencias ($800\text{MHz} \leq f \leq 2\text{GHz}$), altura de la antena de la estación base ($4\text{m} \leq h_b \leq 50\text{m}$), altura del móvil ($1\text{m} \leq h_m \leq 3\text{m}$) y distancia de cálculo ($20\text{m} \leq d \leq 5\text{km}$).

Las expresiones para la pérdida básica de propagación para puntos con LOS o NLOS son las siguientes:

$$L = \begin{cases} L_{fs_LOS} & \text{puntos con visión directa} \\ L_{fs_NLOS} + L_{msd} + L_{rts} & \text{puntos con visión indirecta} \end{cases}$$

Para los puntos con visión directa, la pérdida básica de propagación se evalúa con la expresión:

$$L = L_{fs_LOS} = 42,6 + 26 \log d + 20 \log f$$

En el caso de que no exista visión directa, la expresión vale:

$$L_{fs_NLOS} = 32,5 + 20 \log d + 20 \log f$$

Las otras dos componentes de las pérdidas básicas sin visión directa, es decir, L_{rts} y L_{msd} , se calculan según la expresión:

$$L_{rts} = -8,2 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log \Delta h_m + L_{ori}$$

con L_{ori} como un término de corrección que tiene en cuenta la orientación de la calle respecto al rayo directo entre la estación base y el móvil, calculado según:

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,359\Psi & \text{para } 0 \leq \Psi < 35 \\ 2,5 + 0,075(\Psi - 35) & \text{para } 35 \leq \Psi < 55 \\ 4 - 0,114(\Psi - 55) & \text{para } 55 \leq \Psi \leq 90 \end{cases}$$

donde Ψ es el ángulo entre el eje de la calle donde se encuentra el móvil y el rayo directo, y la expresión:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b$$

donde los parámetros se evalúan:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_b) & \text{para } h_b > h_{roof} \\ 0 & \text{para } h_b \leq h_{roof} \end{cases}$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_b > h_{roof} \\ 54 - 0,8\Delta h_b & \text{para } h_b < h_{roof}, d \geq 0,5km \\ 54 - 1,6\Delta h_b/d & \text{para } h_b < h_{roof}, d < 0,5km \end{cases}$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_b > h_{roof} \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_b}{h_{roof}} & \text{para } h_b < h_{roof} \end{cases}$$

Tanto L_{rts} como L_{msd} se igualan a 0 si al aplicar las fórmulas anteriores se obtienen valores negativos.

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{Ciudades de tamaño medio y áreas suburbanas} \\ -4 + 1,5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{Grandes centros metropolitanos} \end{cases}$$

3.6.5 Modelo de propagación Xia-Bertoni simplificado

Los cálculos según este modelo están basados en teoría de rayos y óptica geométrica. Independientemente de que exista visión directa o no, la pérdida básica de propagación se calcula como la suma de L_{fs} , L_{rts} y L_{msd} . Se distinguen tres casos diferentes de funcionamiento, según la altura de la antena sobre el nivel medio de los tejados: $h_b \gg h_{roof}$, $h_b \approx h_{roof}$ y $h_b < h_{roof}$.

Para las pérdidas en espacio libre, cuando $h_b \gg h_{roof}$, se utiliza la expresión teórica:

$$L_{fs} = -10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

donde

λ : es la longitud de onda

d : es la distancia horizontal entre el transmisor y el receptor.

Si la antena transmisora no se encuentra muy por encima del tejado, se incluye una corrección adicional para tener en cuenta la dispersión local por los obstáculos que rodean la estación base y que refuerzan la señal en la dirección de propagación:

$$L_{fs} = -10 \log \left(\frac{\lambda}{2\sqrt{2}\pi d} \right)^2$$

Las pérdidas por difracción tejado a calle, L_{rts} , se calculan en los tres casos de la misma forma:

$$L_{rts} = -10 \log \left(\frac{\lambda}{2\pi^2 r} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right)$$

donde $\theta = \arctg \left(\frac{|\Delta h_m|}{x} \right)$ y $r = \sqrt{(\Delta h_m)^2 + x^2}$

con el valor de x correspondiente a la distancia entre el móvil y la arista difractante en el tejado (generalmente $x=w/2$) considerando que el móvil se encuentra en el centro de la calle de anchura media w .

El método simplificado de Xia-Bertoni recurre a resolver el cálculo de la difracción multipantalla a través de un desarrollo en serie. Considerando b como la separación media entre edificios y

$$\phi = -\arctg \left(\frac{\Delta h_b}{b} \right)$$

Las expresiones empleadas para los casos en que $h_b \gg h_{roof}$, $h_b \approx h_{roof}$ y $h_b < h_{roof}$, son respectivamente:

$$L_{msd} = -10 \log \left(5,5225 \left(\frac{\Delta h_b}{d} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{1,8} \right)$$

$$L_{msd} = -10 \log \left(\frac{b}{d} \right)^2$$

$$L_{msd} = -10 \log \left(\left(\frac{b}{2\pi(d-b)} \right)^2 \frac{\lambda}{\sqrt{(\Delta h_b)^2 + b^2}} \left(\frac{1}{\phi} - \frac{1}{2\pi + \phi} \right)^2 \right)$$

3.7 Teoría Geométrica de la Difracción

Los modelos de propagación que se fundamentan en la teoría de rayos, basada ésta en la óptica geométrica, proporciona una forma sencilla de calcular las pérdidas de propagación, cuando es aplicable. Además, permite evaluar el retardo y la fase de los rayos, siendo particularmente útil para describir los mecanismos de propagación por reflexión. En cambio, la propagación por difracción requiere aplicar conceptos de óptica física, perdiéndose la idea de rayo y con ello las informaciones de la fase y del retardo.

La teoría de óptica geométrica, por sí sola, no es capaz de predecir el campo en las regiones ocultas. Por ello, se utiliza el concepto de campo difractado para complementar esta teoría. La Teoría Geométrica de la Difracción (GTD o Geometric Theory of Diffraction) es una extensión de la Teoría de Óptica Geométrica (GO o Geometric Optics) complementada por la teoría de la difracción, para predecir el campo en una

región de sombra causada por una cuña. Sin embargo, la GTD no puede aplicarse en la vecindad de las regiones de transición. La Teoría Uniforme de la Difracción (UTD o Uniform Theory of Diffraction) supera estas singularidades para el campo total a lo largo de las llamadas fronteras de transición.

La difracción es un fenómeno local donde el campo que se genera es proporcional al campo incidente en el punto en el que se produce la difracción, multiplicado por un coeficiente. Este coeficiente se encuentra determinado por las propiedades locales del campo y el contorno en el punto de difracción. *Joseph Keller* fue el primero en sistematizar el cálculo del campo difractado al desarrollar expresiones cerradas para los coeficientes de difracción.

La expresión del campo difractado en forma matricial es:

$$[E^d] = [D][E^i] A(s)e^{-jks}$$

donde:

- $[E^d]$: son vectores columnas con las componentes de los campos difractados
- $[E^i]$: son vectores columnas con las componentes de los campos incidentes
- $[D]$: es una matriz cuadrada con los coeficientes de difracción
- s : es la distancia entre el punto de difracción y el punto de observación

$A(s)$ es el factor de atenuación definido por:

$$1/s^{1/2} \text{ para ondas planas y cilíndricas}$$

$$(s'/s(s' + s))^{1/2} \text{ para ondas esféricas}$$

Pero la teoría de la difracción de Keller tiene algunas limitaciones, como por ejemplo la imposibilidad de calcular el campo en regiones cercanas al borde de difracción, a los puntos focales, y a la frontera de sombra. En 1967, Kouyoumjian generalizó las expresiones para el cálculo de los coeficientes de difracción, permitiendo salvar las limitaciones anteriores. A esta nueva teoría se le denomina como Teoría Uniforme de la Difracción (UTD). No obstante, hoy en día se utiliza indistintamente ambos nombres en forma separada o combinada GTD/UTD para referirse al mismo concepto [14].

La utilización de la GTD puede hacerse en modelos de dos o tres dimensiones y requiere el desarrollo de técnicas de trazado de rayos (ray-tracing), es decir, de recorridos entre el transmisor y el receptor, que cumplan las leyes de la reflexión, incidan en cuñas difractantes y no impliquen más de tres interacciones (reflexiones o difracciones). Para facilitar el trazado de rayos se efectúa una simplificación del perfil del terreno, aproximándolo por una sucesión de tramos rectilíneos, de forma que se preserven los rasgos más importantes del perfil.

3.8 Modelos de propagación marítima

En zonas urbanas cercanas a la costa, especialmente en bahías y archipiélagos, se producen situaciones que dificultan la formación regular de células, y por consiguiente, se pierde cierto control en la asignación adecuada de recursos a los usuarios. La causa principal se encuentra en que las pérdidas de propagación en el mar son muy diferentes a las producidas en entornos urbanos. Una estación base que tenga como objetivo de cobertura una población costera tendrá, con mucha probabilidad, algunos usuarios muy lejanos que accederán a la célula fácilmente, puesto que solo tendrán que vencer las pérdidas de propagación en espacio libre, más unos efectos propios de la reflexión en el mar. Cabe, por tanto, hacer mención a los estudios realizados al respecto.

En [15] se muestran una comparativa entre medidas reales en GSM 900 MHz, las pérdidas básicas de propagación y las proporcionadas por tres modelos: el empírico basado en la recomendación P.370-7 de la UIT, el modelo de reflexión descrito por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y el de difracción por tierra esférica según recomendación P.526-E de la UIT.

Este estudio concluye que, la condición angular que caracteriza el ámbito de aplicación del modelo de difracción UIT-R PN 526-6, no se ajusta a las medidas reales que se realizaron a bordo de embarcaciones, y por ello no se pudo obtener comparaciones válidas para dicho modelo. La causa está en la elevada altura de las estaciones base que fueron medidas, por lo que no fue posible cumplir con la condición de incidencia rasante.

Sin embargo, en medidas a larga distancia con servidoras dominantes, la señal siguió con bastante fidelidad el modelo UIT-R PN. 370-7 para 50 % ubicaciones y 50 % del tiempo, que a su vez tiene gran similitud con las pérdidas de espacio libre. El modelo de la UPV proporciona una visión pesimista que en otras medidas podría predecir márgenes de fading.

Por otro lado, los trabajos [16] [17] muestran los resultados de la campaña de medidas de cobertura en la banda de 900 MHz en el Banco Pesquero Sahariano, cuyo servicio es ofrecido por estaciones base situadas en el archipiélago canario. Para conseguir alcances tan lejanos como para llegar a la latitud 21° (Mauritania), que supera los 750 kilómetros, los estudios mencionados concluyen que los enlaces se producen por propagación troposférica. Concretamente, se crea un conducto troposférico ("duct") que atrapa la señal a modo de guíaonda, de manera que las pérdidas de propagación son mínimas. Estas pérdidas, incluso inferiores a las de espacio libre, son debidas a la inexistencia de obstáculos, y a la ausencia de pérdidas por absorción por el confinamiento vertical a que es sometida la señal. Este confinamiento se produce gracias a la variación del índice de refracción en la parte baja de la troposfera.

3.9 Recomendaciones UIT

Tal y como se comentó al principio del apartado 2.2, la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones, en inglés UIT) ofrece una serie de recomendaciones para las comunicaciones móviles que se describen a continuación. Además de las ya mencionadas, se encuentran las siguientes:

- *R-REC-P.526-11 Propagación por difracción*, consiste en una serie de modelos que permiten evaluar los efectos de la difracción en el nivel de potencia de la señal recibida. Los modelos son aplicables a diferentes tipos de obstáculos y medios de propagación.
- *R-REC-P.1057-2 Distribuciones de probabilidad para establecer modelos de propagación de las ondas electromagnéticas*, proporciona información general con el objeto de construir una base común a los métodos estadísticos para la predicción de propagación.
- *R-REC-P.1144-5 Guía de aplicación para los métodos de propagación*, recomienda el modelo de propagación más apropiado para aplicaciones particulares.
- *R-REC-P.1406-1 Efectos de propagación relacionados con las comunicaciones móviles terrestres y radiodifusión en VHF y UHF*, que muestra diversos efectos relacionados con el terreno.
- *R-REC-P.1407-4 Caracterización y parametrización de la propagación multitrayecto*, describe la naturaleza de la propagación multitrayecto y una descripción estadísticas de sus efectos.
- *R-REC-P.1546-4 Métodos de predicción punto a un área para servicios terrestres en el rango de frecuencias de 30 MHz a 3000 MHz*, describe métodos de propagación troposféricos tierra-tierra o tierra-mar basado en curvas de potencia recibida en función de la distancia, altura de antena y frecuencia.

3.10 Efectos producidos por obstáculos cercanos a la antena

En la etapa de diseño y planificación de red se construye un plan nominal de estaciones base que es función de la población y del tráfico estimado que cursarán los clientes. Para este diseño se utilizan simuladores de cobertura y capacidad que determinan las ubicaciones óptimas de las estaciones base, así como varios aspectos relacionados con la configuración de los sistemas radiantes, entre los que se encuentra el modelo de antena. Pero en la práctica se presenta una serie de situaciones que afectan al diagrama de radiación de dichas antenas, con lo cual, la forma y los recursos de la célula inicialmente previstos, sufren una variación significativa, y con ello, las prestaciones reales de la red.

En muchas ocasiones, debido a criterios urbanísticos, de estética o mimetización con el entorno, así como por exigencias impuestas por el arrendador del emplazamiento, no es posible garantizar el despejamiento de la zona de máxima propagación de las antenas. La separación entre la antena y cualquier estructura debe, por tanto, ser superior a una determinada distancia para superar al menos la primera zona de Fresnell. Y en muchas ocasiones, la deformación de los lóbulos laterales o traseros producidos por elementos constructivos, afectan al diagrama de radiación. En este apartado se explicarán los efectos más comunes que afectan a la morfología de la célula.

3.10.1 Principio de Huyghens: zonas de Fresnel

El principio de Huyghens se ilustra en la Figura III.16, en el que una fuente de energía P es recibida en un punto Q . El campo producido por P estará determinado por el factor

$$r^{-1}e^{-jkr}$$

Huyghens argumenta que el modo que tiene el campo de llegar a Q es por medio de *re-radiaciones* de cada punto del frente de ondas. La superficie OAB es esférica, centrada en P , y en todos los puntos de dicha superficie, la fase de la onda es idéntica.

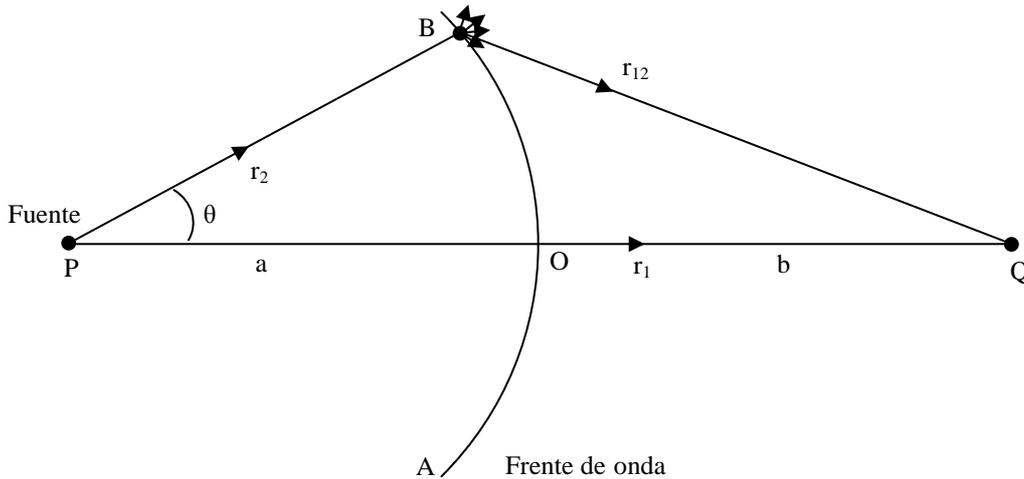


Figura III. 16 Principio de Huyghens

En el punto B , la *re-radiación* se produce en todas direcciones con una potencia que depende del nivel de campo existente en B y un factor que depende del ángulo de propagación desde este mismo punto. El valor de campo en Q se obtiene mediante la suma de todos campos *re-radiados* desde todos los puntos del frente de ondas. Puesto que el campo en P es radiado en muchas direcciones, el valor obtenido en Q será solo una porción del frente de ondas generado, por lo que la intensidad de campo se puede expresar por

$$I(r_1) = \int r_{12}^{-1} \psi(r_2) e^{-jkr_{12}} dS$$

donde

$\psi(r_2)$: es la potencia de campo en el punto r_2 del frente de ondas,

r_{12} : es la distancia desde un elemento del área dS del frente de ondas, hacia Q .

La integral en un principio puede ser desarrollada tal cual está expresada, pero según las observaciones de Fresnel, bajo ciertas condiciones prácticas, se puede realizar una interpretación más simple del problema. Si se dividen los frentes de onda en zonas, como se muestra en la Figura III.17, según se demuestra en [18], el nivel de intensidad de campo en Q equivale a

$$I \approx \psi_0 \frac{2\pi a}{(a+b)jk}$$

Esto quiere decir que la mayor parte de la potencia que se puede recibir en Q se encuentra en la primera zona de Fresnel, con lo cual, es necesario garantizar el despejamiento, al menos en lugares cercanos a la antena, que puedan ser producidos por elementos situados en la cubierta de las edificaciones.

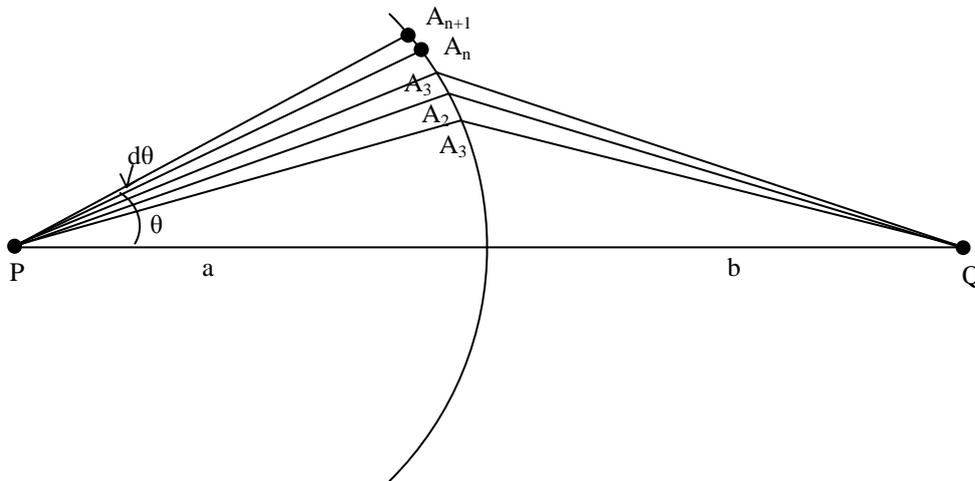


Figura III. 17 Zonas de Fresnel

A efectos prácticos, se establece unas tablas de distancias mínimas para superar la primera zona de Fresnel, según la Figura III.18 y las tablas III.2 y III.3.

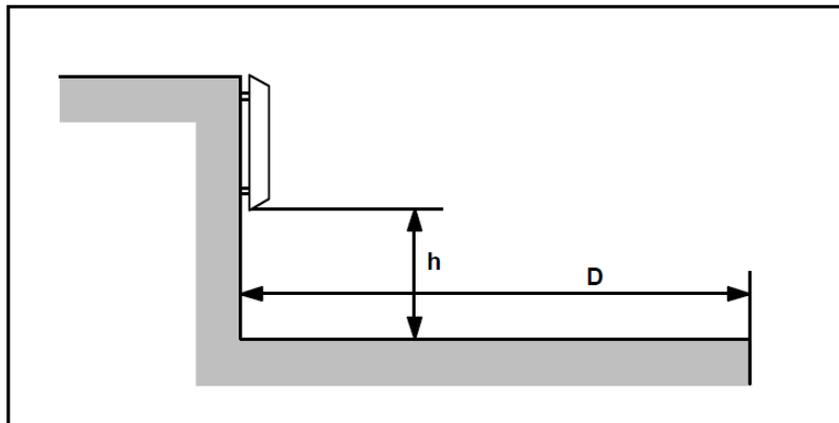


Figura III. 18 Distancia de la antena al borde de la fachada

D	h
0 - 1 m	0.5 m
1 - 10 m	2 m
10 - 30 m	3 m
>30 m	3.5 m

Tabla III. 2 Valores de D y h para 900 MHz

D	h
0 - 2 m	0.5 m
2 - 10 m	1 m
>10 m	2 m

Tabla III. 3 Valores de D y h para 1.800 MHz

Estos valores son válidos para cubiertas de edificios no transitadas. En caso contrario, se debe cumplir las alturas mínimas de separación para garantizar la protección de las personas frente a las emisiones radioeléctricas (RD 1066/2001).

3.10.2 Deformación del diagrama de radiación de las antenas

Las antenas direccionales que se instalan en fachada deberán tener una orientación perpendicular a la misma. En caso de que formen un ángulo, y en función de la relación frente-espalda (diferencia de potencia radiada entre la parte frontal de la antena y la posterior), el diagrama de radiación se verá afectado [19] [20] [21], como se muestra en la Figura III.19. Esta configuración generará un lóbulo lateral que modificará considerablemente la forma de la célula, pudiendo dar servicio a clientes en una zona inicialmente no prevista.

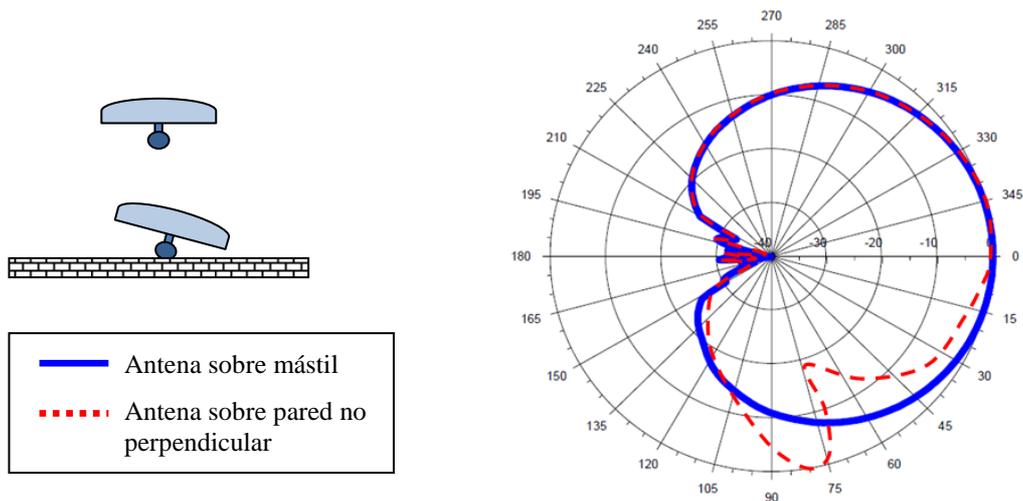


Figura III. 19 Deformación del diagrama de radiación

3.10.3 Downtilt mecánico y downtilt eléctrico

Una forma de limitar el alcance de la célula consiste en proporcionar a la antena algunos grados de inclinación o downtilt. Los dos métodos posibles son [22] mediante la inclinación mecánica y eléctrica.

Downtilt mecánico

La inclinación mecánica se consigue mediante un soporte específico para ello, que se sujeta a la antena y el mástil, como se puede ver en la Figura III.20. El diagrama de radiación en la dirección de máxima propagación se inclina con el mismo ángulo, como se muestra en la Figura III.21, con la particularidad de que los lóbulos traseros se levantan.

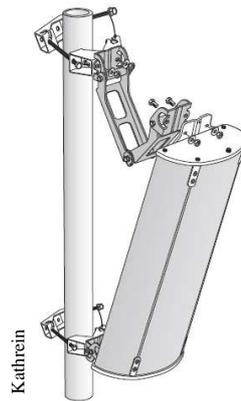


Figura III. 20 Inclinación mecánica de la antena

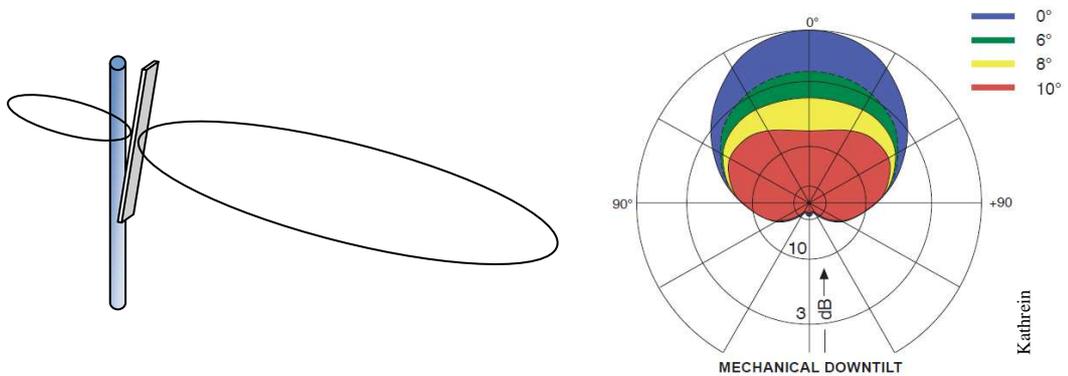


Figura III. 21 Efecto de la inclinación mecánica

Downtilt eléctrico

La inclinación en este caso se consigue asignando desfases diferentes a los dipolos que componen la antena, como se muestra en la Figura III.22.

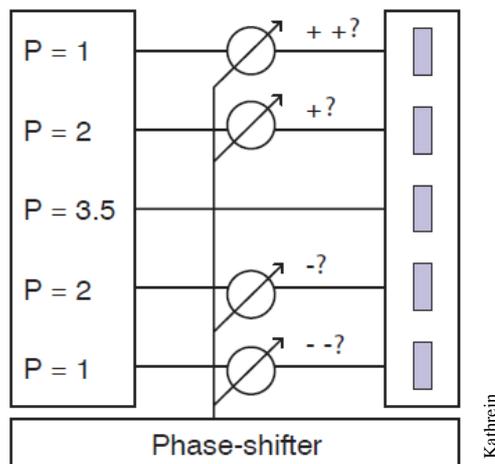


Figura III. 22 Inclinación eléctrica

El diagrama de radiación en la dirección de máxima propagación, y el lóbulo trasero, se inclina con el mismo ángulo, como se muestra en la Figura III.23, reduciendo así el posible sobrealcance del lóbulo trasero se reduce [23]. Pero una combinación de los dos métodos, cuando el soporte de antena lo permite, ofrece los mejores resultados [24].

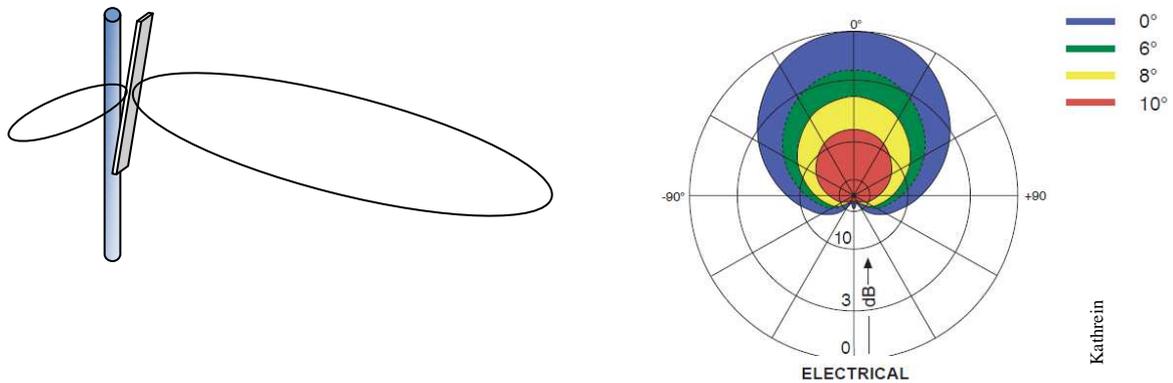


Figura III. 23 Efecto de la inclinación eléctrica

3.11 Comparativa de los modelos de propagación

Los modelos empíricos como el de Okumura-Hata ofrecen mayor simplicidad y no necesitan información muy detallada del escenario salvo una buena retícula de terreno, por lo que los tiempos de ejecución son relativamente pequeños. Los resultados son aceptables para entornos rurales, costas o grandes extensiones. Sin embargo, no son tan útiles para estimaciones de cobertura en entornos urbanos densos, con calles y edificios donde predomine la propagación N-LOS.

Estos modelos fueron muy útiles en los primeros despliegues de las redes móviles, donde la prioridad era conseguir una gran presencia con su señal en las ciudades y carreteras, a nivel de calle o exterior. Era muy habitual por entonces que el usuario se moviese unos metros para mejorar la señal recibida. Conforme el mercado se fue haciendo más competitivo, se empezaba a ofrecer cobertura en los lugares más escondidos de las zonas urbanas, así como en interiores. De este modo, los modelos deterministas que ofrecen mejores predicciones, cobraron su importancia. Para ello requieren información del escenario tales como distribución y morfología de los edificios, calles, espacios abiertos, así como la densidad de usuarios por cada zona. Las predicciones de cobertura y capacidad que ofrecen serán mejores si se dispone de un elevado nivel de detalle del escenario, aunque también incrementa el tiempo de cálculo. La creación de mapas digitales requiere un proceso complejo y costoso, descrito ampliamente en [5].

Otra característica de los modelos teóricos de propagación es que han sido construidos para un rango pequeño de escenarios tipo, clasificándose estos básicamente en urbano, semi-urbano y rural. La variedad de entornos reales con los que se enfrenta un operador para dar servicio ha motivado el estudio y análisis en otro tipo de escenarios. Varios trabajos de investigación muestran los resultados de comparar

medidas de campo con los modelos teóricos, y proponen ajustes para casos singulares, como los que se encuentran en la Tabla III.4.

Ref.	Tipo análisis	Modelos comparados	Zona	Resultados
[25]	Comparativo con medidas	- Hata - Ibrahim-Parson - Cost 231	Budapest-Hungría	Diferencias de hasta 10 dB con medidas. Mejor modelo: Hata
[26]	Comparativo con medidas	- UTD - Cost 231-Hata - Xia-Bertoni	Cartagena-España	Compara tres tipos de altura de edificios. Mejor modelo: UTD
[27]	Comparativo con medidas	- Lee - Stanford University Interim (SUI) - Cost 231-Walfish Ikegami - Egli	Kuala Lumpur-Malasia	Mejor modelo: Lee
[28]	Comparativo con medidas	- Cost 231-Hata - Cost 231-Walfish Ikegami - Espacio Libre - Ericsson	Amman-Jordania	Mejores modelos los dos de COST 231
[29]	Comparativo con medidas	- Espacio Libre - Okumura-Hata - UK Joint Radio Committee of Power Industries (JRC) - Difracción - London (Ibrahim-Parsons)	Joao Pessoa-Brasil	Para espacios muy abiertos: modelo Espacio Libre JRC ofrece buenos resultados en el resto
[30]	Análisis teórico	Modelo para estaciones base muy altas en entornos urbanos		Necesidad de modificar modelos
[31]	Análisis teórico	Modelo para estaciones base muy altas en entornos urbanos		Necesidad de modificar modelos
[32]	Análisis teórico	- Okumura-Hata - Walfish-Ikegami		Diferentes resultados en función de los valores de ajuste
[33]	Análisis teórico	Modelo propagación marítima		Ajuste de modelos para el mar
[3]	Análisis teórico	Efecto de la lluvia en los modelos de propagación		Ajustes varios

Tabla III. 4 Comparativa de modelos de propagación

En general, los modelos y herramientas de simulación no ofrecen los mejores resultados cuando existe una alta densidad de usuarios en varios núcleos de población separados entre sí, con diferencia de altura considerable entre ellos. En esta situación se encuentran simultáneamente caminos de propagación con muchos obstáculos y elevadas pérdidas, junto con otros de casi libre propagación, puesto que la morfología del terreno no permite confinar las áreas de cobertura de las células. Estos escenarios heterogéneos son muy habituales en las Islas Canarias, donde se producen muchos sobrealcances entre diferentes colinas y valles como muestra la Figura III.24, así como entre las propias islas propiciada por la propagación marítima. Estos casos requieren un gran trabajo de ajuste continuo de la configuración de la red puesto que las herramientas de

simulación, por lo general, no son capaces de combinar modelos para escenarios de este tipo.

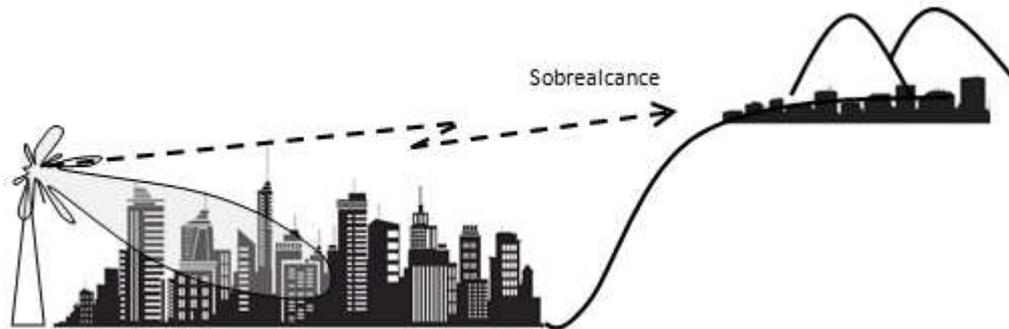


Figura III. 24 Sobrealcance en poblaciones a diferente altura

Bibliografía

- [1] José María Hernando Rábanos, *Comunicaciones Móviles.*: Centro de Estudios Ramón, 1997.
- [2] F. Pérez Fontán and P. Mariño Espiñeira, "Modeling the wireless propagation channel. A simulation approach with MATLAB," *Wiley*, p. 272, 2008.
- [3] M.S. Pontes and L.AR. Silva Mello, "Review on terrestrial propagation channel modelling," *IEEE*, vol. Antennas and Propagation (EuCAP), 2010 Proceedings of the Fourth European Conference, pp. 1-5, April 2010.
- [4] Eraldo Damosso and Luis M Correia, "Digital mobile radio towards future generation system: COST 231 FINAL REPORT," Bruselas, Informe final.
- [5] Jukka Lempiäinen and Matti Manninen, *UMTS Radio Network Planning, Optimization and QoS Management*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [6] D. Chizhik, J. Ling, and R.A. Valenzuela, "The effect of electric field polarization on indoor propagation," *IEEE*, vol. Universal Personal Communications, 1998. ICUPC '98. IEEE 1998 International Conference, vol 1, pp. 459-462, 1998.
- [7] S.J. Fortune et al., "WISE design of indoor wireless systems: practical computation and optimization," *IEEE*, vol. Computational Science & Engineering, vol 2, pp. 58-68, 1995.
- [8] L.J. Greenstein et al., "Microcells in personal communications systems," *IEEE*, vol. Communications Magazine, vol 30, pp. 76-88, December 1992.
- [9] P. Kyritsi, D.C. Cox, R.A. Valenzuela, and P.W. Wolniansky, "Effect of antenna polarization on the capacity of a multiple element system in an indoor environment," *IEEE*, vol. Selected Areas in Communications, IEEE Journal, pp. 1227-1239, 2002.
- [10] R.A. Valenzuela, O. Landron, and D.L. Jacobs, "Estimating local mean signal strength of indoor multipath propagation," *IEEE*, vol. Vehicular Technology, IEEE Transactions, pp. 203-212, 1997.
- [11] M Liénard, S. Baranowski, and P. Degauque, "Propagation Measurements and Simulation for Communication in Tunnel Environments," *COST 259 meeting and workshop on spatial channel models and adaptive antennas*, May 1999.
- [12] Y.Hwang and Y.P.Zhang, "Guided Propagation of Radio Signals in a Enclosed Space," *IEEE*, vol. Trans. on Antennas and propagation, Vol. 49, pp. 757-762, May 2001.
- [13] Lauri Sydänheimo, Mikko Keskilammi, Pekka Salonen, and Markku Kivikoski, "Wireless Data Communication in Underground Mine," *Millennium Conference on Antennas & Propagation*, April 2002.
- [14] G.L. James, "G.T.D. solution for diffraction by convex corrugated surfaces," *IEEE*, vol. Microwaves, Optics and Antennas, IEE Proceedings H, 257-262 1980.
- [15] Miguel Arcas Oliver, Juan José Flores Mederos, Jose M^a Hernando Rábanos, Rafael Herradón Díez, and Florentino Jiménez Muñoz, "Maritime Coverage in Dual GSM 900 DCS 1800 Network of big capacity. Planning, Integration and Optimisation," in *2002 WSEAS Int.Conf. on Microwaves, Antennas and Radar Systems (IMARS '02)*, vol. 2002 WSEAS Int.Conf. on Microwaves, Antennas and Radar Systems (IMARS '02), Cádiz, Spain, 2002, pp. 2131-2135.

- [16] Rafael Belón González, "Estudio de propagación troposférica transhorizonte en la banda de 900 MHz," Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Proyecto fin de carrera 1999.
- [17] Antonio J. González Sosa, "Estudio de cobertura y propagación en el banco pesquero Sahariano," Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Proyecto fin de carrera 1999.
- [18] K.F.Sander and G.A.L. Reed, *Transmission and propagation of electromagnetic waves*. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.
- [19] Borivoj Modlic, Dragan Poljak Antonio Sarolif, "Analysis of a GSM base station antenna near conductive object: Far field pattern distortion," *IEEE*, vol. 17 International Conference on Applied Electromagnetics and Communications, pp. 229-232, October 2003.
- [20] Andreas F Molisch, Josef Fuhl, and Ernst Bonek, "Pattern distortion of mobile radio base station antennas by antenna masts and roofs," *Microwave Conference, 25th European*, vol. 1, pp. 71-76, September 1995.
- [21] Sergio Flores Poveda and Miguel Miñano Belvis, "Modelling of the base station radiation pattern in practical urban deployment," AALBORG UNIVERSITY, Denmark, Master Thesis 2012.
- [22] Kathrein, "Technical Information and New Products," Issue No. 3 - 09/2000 2000.
- [23] I. Forkell, A. Kemper, R. Pabst, and R. Hermans, "THE EFFECT OF ELECTRICAL AND MECHANICAL ANTENNA DOWN-TILTING IN UMTS NETWORKS," *IEEE*, vol. 3G Mobile Communication Technologies, Conference Publication, no. 489, pp. 86-90, May 2002.
- [24] Makoto Sumi, Kazuhiro Komiya, Ryo Yamaguchi, and Keizo Cho, "Azimuth Pattern Design to Reduce Interference in Overlapping Sectors Using Combined Tilt," *IEEE*, 2010.
- [25] Lajos Nagy and Béla Nagy, "Comparison and verification of urban propagation models," *IEEE*, vol. PIMRC '94 / WCN, pp. 1359-1663, 1994.
- [26] José Víctor Rodríguez, Sergio Gallego Martínez, Concepción García Pardo, José María Molina García Pardo, and Leandro Juan Llácer, "Comparison of Various Urban Radiowave Propagation Models With Measurements," *IEEE*, vol. ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, VOL. 8, pp. 977-980, 2009.
- [27] J. Chebil, A.K. Lwas, M.R. Islam, and A Zyoud, "Comparison of empirical propagation path loss models for mobile communications in the suburban area of Kuala Lumpur," *IEEE*, vol. Mechatronics (ICOM), 2011 4th International Conference, pp. 17-19, May 2011.
- [28] AA Tahat and Y.A Alqudah, "Analysis of propagation models at 2.1 GHz for simulation of a live 3G cellular network," *IEEE*, vol. Wireless Advanced (WiAd), 2011, pp. 164-169, June 2011.
- [29] R. M S Cruz et al., "A comparison between theoretical propagation models and measurement data to distinguish urban, suburban and open areas in Joao Pessoa, Brazil," *IEEE*, vol. Microwave and Optoelectronics, 2005 SBMO/IEEE MTT-S International Conference, pp. 285-297, July 2005.
- [30] AP. Neto, E.O. Rozal, and E.G. Pelaez, "Bidimensional statistics analysis of the Bertoni - Walfisch propagation model for mobile radio design in urban areas," *IEEE*, vol. Microwave and Optoelectronics Conference, 2003. IMOC 2003.

- Proceedings of the 2003 SBMO/IEEE MTT-S International , vol.2, , pp. 801-806 , Sep 2003.
- [31] Dong Yuan and Dongya Shen, "Analysis of the Bertoni-Walfisch propagation model for mobile radio," *IEEE*, vol. Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011 Second International Conference, pp. 77-80, July 2011.
- [32] N. Sah, T. Chand, and D. Bagai, "Propagation modeling — a CSP approach," *IEEE*, vol. Wireless and Microwave Technology Conference, 2009. WAMICON '09. IEEE 10th Annual , pp. 1-5, April 2009.
- [33] Huifang Mo, Baodan Chen, and Chong Shen, "Radio propagation prediction model for maritime mobile communication," *IEEE*, vol. Wireless Communications and Applications (ICWCA 2012), IET International Conference , pp. 1-5, October 2012.
- [34] A Hecker and T. Kurner, "Analysis of propagation models for UMTS ultra high sites in urban areas," *IEEE*, vol. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005. PIMRC 2005. IEEE 16th International Symposium, pp. 11-14, September 2005.
- [35] Iskandar and A Kurniawan, "Propagation loss estimation for urban high altitude platform communications channel," *IEEE*, vol. Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA), 2011 6th International Conference , pp. 246-252, October 2011.

Capítulo IV

Acceso Radio UMTS y LTE

En cualquier sistema de comunicación es necesario superar un nivel mínimo de relación portadora a ruido en el receptor (o relación señal a ruido), para que este pueda recuperar la información transmitida. Para el caso concreto de sistemas de comunicaciones móviles, al ruido blanco gaussiano aditivo (RBGA) se le añade el resto de señales emitidas por células colindantes o usuarios que se encuentran en zonas distantes, puesto que la estructura celular no puede delimitar perfectamente las regiones a las que las estaciones base dan servicio, tal y como se ha comentado en el Capítulo III. La capacidad de un sistema celular está condicionada por el ruido, y principalmente por la interferencia generada por todas las células y terminales, como consecuencia de la reutilización de frecuencias.

Los tres sistemas de acceso radio actuales en Europa (GSM, UMTS y LTE) poseen características bien diferenciadas que le otorgan ciertos inconvenientes en el comportamiento frente a situaciones de congestión de tráfico de usuarios, lo que incrementa la complejidad de la gestión de los recursos ante un aumento de las interferencias. Para que la red no se vuelva inestable, existen diferentes mecanismos que ayudan a disminuir la presencia de elevados niveles de potencia interferente en el escaso ancho de banda del interfaz *aire* que todos comparten.

En este capítulo se explicarán los métodos de acceso radio empleados en UMTS y en LTE y los factores que intervienen en la relación entre la potencia de la señal útil y la interferencia, así como las herramientas de medida e indicadores de calidad de las redes de comunicaciones móviles. Posteriormente, en el Capítulo V de esta tesis se mostrarán varios métodos de reducción de interferencias relacionados con estos conceptos.

4.1 Acceso Radio UMTS (WCDMA)

El acceso radio *WCDMA* está basado en la técnica de espectro ensanchado [1] [2] [3] [4], en que la señal ocupa una anchura de banda muy superior a la estrictamente necesaria para la transmisión, y su densidad de potencia es muy reducida, semejante al ruido blanco. El ensanchamiento se realiza empleando una secuencia de código independiente de la secuencia de información.

En todo sistema de acceso múltiple, debe asegurarse la separabilidad entre las señales de diferentes usuarios que transmiten de forma simultánea. Si se eligen señales que formen un conjunto ortogonal, serán separables en el receptor, y en consecuencia podrán compartir los mismos recursos de transmisión.

En la técnica de espectro ensanchado la ortogonalidad y la expansión espectral se consiguen aplicando a los mensajes de cada usuario un código de ensanchamiento. Cada terminal tiene asignado uno de estos códigos que es único para él, distinto de los demás y ortogonal a todos ellos.

La versión utilizada en UMTS, llamada *WCDMA*, se caracteriza por que los códigos ortogonales tienen una tasa de chips (llamada así porque “trocean” la señal de información) de 3,84 Mchips/s. Y para separar una célula de otra, se utiliza también un código de *scrambling*, teniendo este que reunir una serie de requisitos

El esquema de acceso en la norma UMTS es Direct-Sequence Code Division Multiple Access (DS-CDMA), con la información transmitida en un espectro ensanchado de aproximadamente 5 Mhz. El interfaz radio tiene dos modos, el FDD (Frequency Division Duplex) y TDD (Time Division Duplex).

En el sistema FDD, utilizado actualmente en Telefónica, la velocidad de la información con la que puede transmitir un móvil depende de:

- a) la velocidad de chip (3.84 Mcps),
- b) el factor de ensanchado o *spreading factor*, que en FDD varía de 4 a 256 para el enlace ascendente y de 4 a 512 para el enlace descendente,
- c) de la modulación y fase, ya que para la R99 se utiliza una modulación QPSK para el enlace descendente y BPSK para el ascendente, y para datos a alta velocidad o HSPA, se utiliza 16 QAM ó 64 QAM,
- d) y de los canales o códigos que el móvil tiene asignado.

Para diferenciar canales, usuarios y estaciones base se utilizan los códigos. En UMTS se usan dos tipos: los códigos de canalización y los códigos de aleatorización o *scrambling*. Los códigos de canalización se denominan códigos OVSF, los cuales permiten separar la información que envía la estación base a los móviles en el downlink (canales de datos y señalización), y los diferentes canales que un móvil envía a la estación base en el uplink. Además permiten ensanchar la señal, es decir, conseguir el régimen binario de 38400 chips por cada 10 ms.

Sin embargo, las señales que llegan de otras estaciones base al móvil, o las señales que llegan de otros usuarios a las estaciones base, no están sincronizadas, por lo que no es posible eliminar completamente estas señales aunque se usaran códigos ortogonales. Es por eso que se usan los códigos de aleatorización o *scrambling*, que si bien no son ortogonales, tienen buenas propiedades de correlación. Un resumen de todo lo comentado se muestra en las Figuras IV.1 y IV.2.

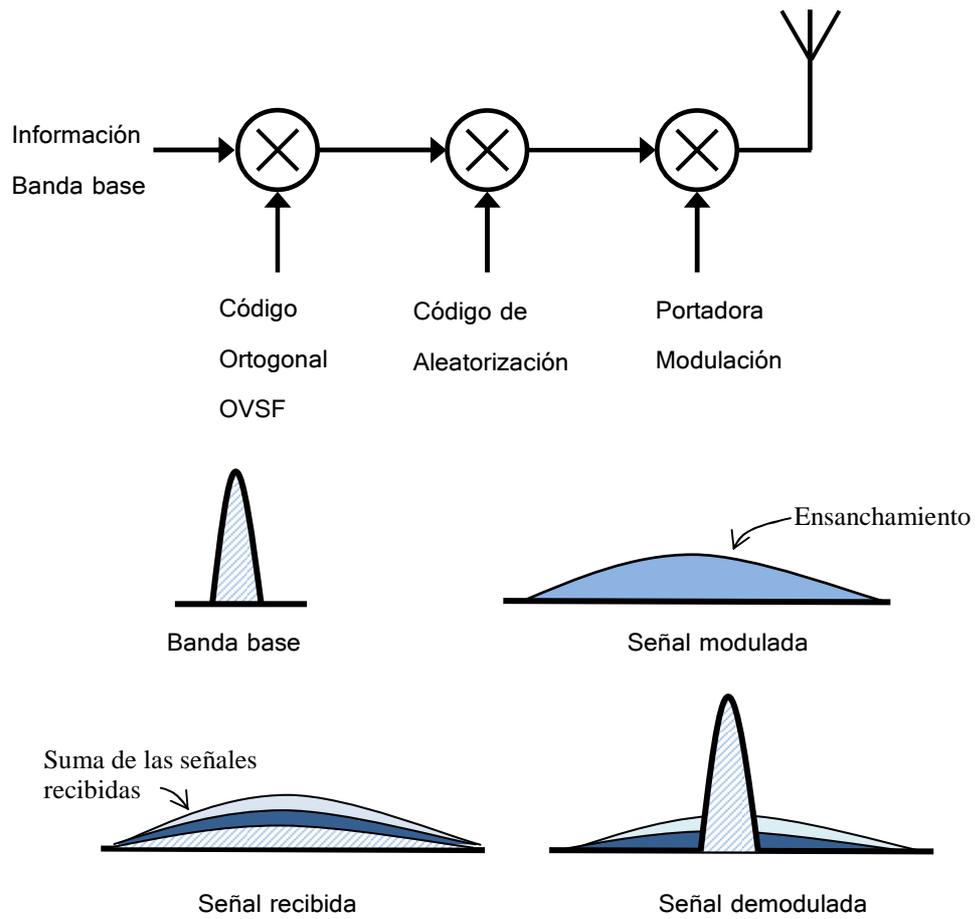


Figura IV. 1 Técnica de espectro ensanchado

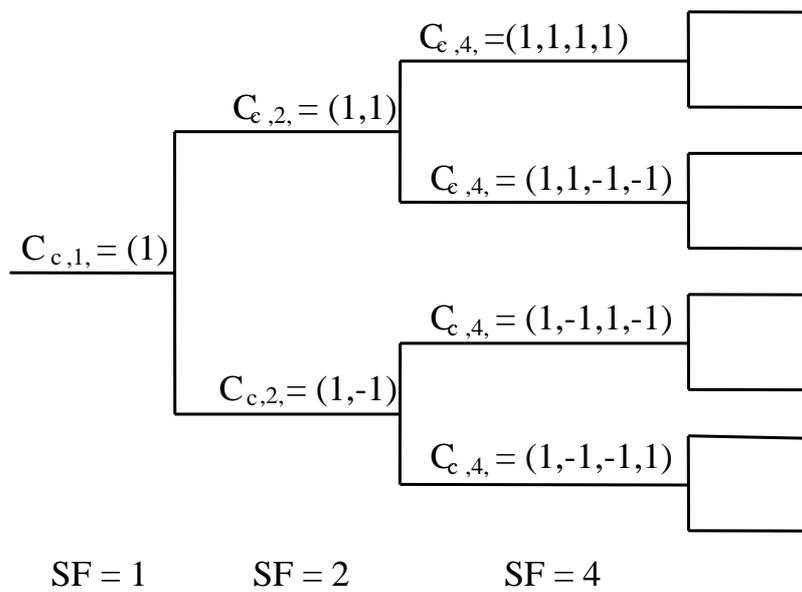


Figura IV. 2 Códigos ortogonales

La técnica de espectro ensanchado produce sistemas muy robustos frente a los efectos de las interferencias, lo que le hace especialmente atractiva en los entornos limitados por interferencia como son las redes de telefonía móvil. En virtud de esta característica, es posible la reutilización de las frecuencias en celdas vecinas, esto es, la formación de agrupaciones celulares de tamaño 1, que es el mínimo posible, con lo cual resulta innecesaria la planificación de frecuencias y aumenta la eficiencia de utilización del espectro.

Además, al ser una tecnología de banda ancha, los receptores tienen gran capacidad de resolución de ecos, pudiéndose utilizar y aprovechar las componentes de multitrayecto (receptor RAKE, Figura IV.3), el cual deja de ser un problema para convertirse en una ventaja, aportando lo que se denomina ganancia por microdiversidad.

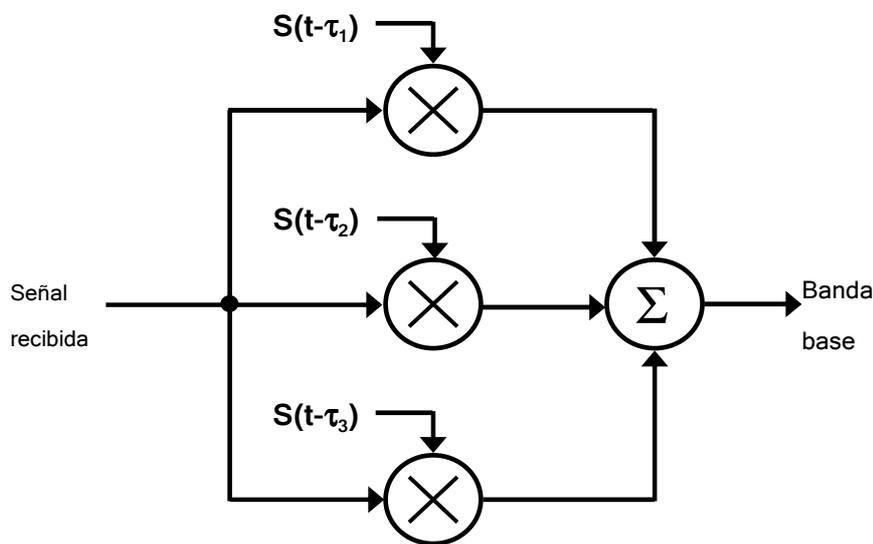


Figura IV. 3 Receptor RAKE

Canal CPICH

El *CPICH* es un canal físico común para el downlink que también se encuentra ensanchado. Su objetivo es ayudar a la estimación de canal para los servicios dedicados y proporcionar la referencia de fase para la estimación del canal en los servicios comunes. Los mecanismos de acceso a la célula y el Soft Handover funcionan con referencia al *CPICH*. Por tanto, cualquier variación de la potencia del *CPICH* afectará al número de usuarios y de servicios que serán ofrecidos.

La potencia de la señal recibida del *CPICH* en el receptor se llama *RSCP* (Received Signal Code Power), se mide en dBm y es equivalente a la *Ec* (Energía de Chip). El nivel útil de la señal se determina por *Ec/No*, se mide en dB y es la potencia de la señal que está por encima del nivel de ruido más el total de señales de otros terminales, como se muestra en la Figura IV.4. Los valores *RSCP* y *Ec/No* son la referencia de diseño de una red, pues determinan la cobertura y el nivel de interferencia total de una zona.

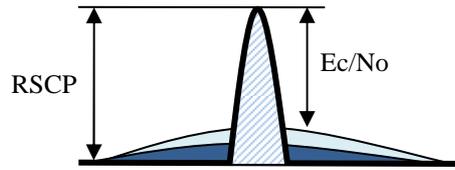


Figura IV. 4 Valores de RSCP y Ec/No

4.1.1 Interferencias en los sistemas WCDMA

Como se ha explicado en el apartado anterior, con el método de acceso radio WCDMA todas las células de una red transmiten con la misma frecuencia, permitiendo la separabilidad entre usuarios mediante los códigos ortogonales y códigos de aleatorización. Pero el grado de ortogonalidad disminuye cuando la propagación se realiza por multitrayecto (efecto muy característico detallado en el Capítulo III). Aún así, en la mayoría de los casos es posible separar en el receptor la señal deseada de todo lo demás, que ahora se ve afectada no sólo por el RBGA, sino por el resto de comunicaciones. Se establece por tanto que, para mantener una comunicación en WCDMA, es necesario superar un nivel de Relación Portadora a Interferente Objetivo CIR_{target} (o Relación Señal a Interferente) [5], tal que:

$$\frac{\text{Strength of desired signal}}{\text{Noise} + \sum \text{Strength of interfering signals}} = CIR_{target}$$

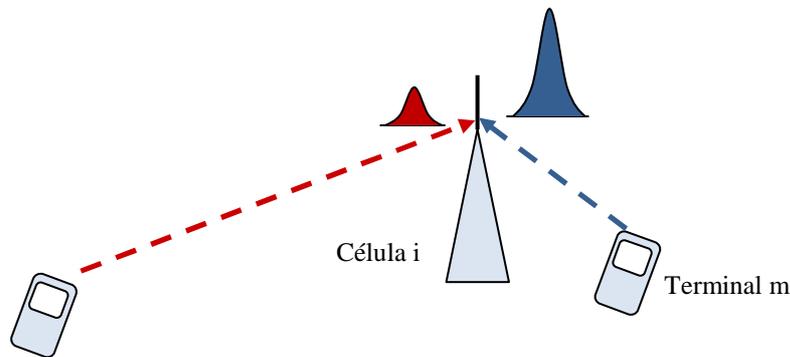


Figura IV. 5 CIR para el Uplink

Desarrollando esta expresión en el uplink, para un terminal m y una célula i , según se muestra en la Figura IV.5, se obtiene la siguiente ecuación.

$$\text{Uplink} \quad \frac{\gamma_{mi}^{\uparrow} p_m^{\uparrow}}{\eta_i + \sum_{n \neq m} \gamma_{ni}^{\uparrow} \alpha_n^{\uparrow} p_n^{\uparrow}} \geq \mu_m^{\uparrow}$$

siendo:

$\gamma^{\uparrow mi}$: factor de atenuación entre el terminal m y la célula i ,

$p^{\uparrow m}$: potencia transmitida por el terminal m ,

η_i : ruido en la célula i ,

$\gamma^{\uparrow ni}$: factor de atenuación del resto de terminales hacia la célula i ,

$\alpha^{\uparrow n}$: factor de actividad para cada terminal,

$p^{\uparrow n}$: potencia transmitida por el resto de terminales,

$\mu^{\uparrow m}$: CIR target

La expresión muestra claramente como la interferencia que aparece en el denominador depende del resto de terminales cuya emisión llega a la célula y de su factor de actividad, es decir, de la tasa binaria que están utilizando (voz a 12,2 Kbps, datos a 64 Kbps, 128 Kbps, etc.).

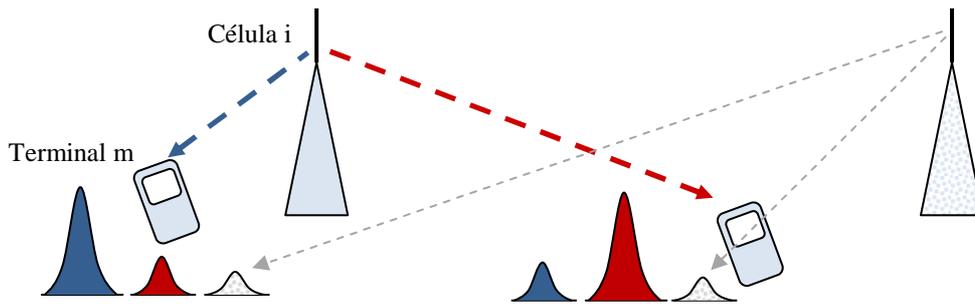


Figura IV. 6 CIR para el Downlink

Desarrollando para el downlink la expresión del CIR_{target} , según la Figura II.6, resulta:

$$\text{Downlink} \quad \frac{\gamma_{im}^{\downarrow} p_{im}^{\downarrow}}{\gamma_{im}^{\downarrow} \bar{\omega}_{im} (\bar{p}_i^{\downarrow} - \alpha_m^{\downarrow} p_{im}^{\downarrow}) + \sum_{j \neq i} \gamma_{jm}^{\downarrow} \bar{p}_j^{\downarrow} + \eta_m} \geq \mu_m^{\downarrow}$$

siendo:

$\gamma^{\downarrow im}$: factor de atenuación entre la célula i y el terminal m ,

$p^{\downarrow im}$: potencia transmitida por la célula i para el terminal m ,

$\bar{\omega}_{im}$: factor de ortogonalidad para el terminal m ,

\bar{p}^{\downarrow}_i : potencia total que transmite la célula i ,

α^{\downarrow}_m : factor de actividad para el terminal m ,

γ^{\downarrow}_{jm} : factor de atenuación del resto células hacia el terminal m ,

\bar{p}^{\downarrow}_j : potencia total que transmite el resto de células,

η_m : ruido en el terminal m ,

μ^{\downarrow}_m : CIR target

En este caso, el CIR_{target} para el downlink muestra como la interferencia en el terminal m depende del resto de señales que transmite la célula i , con un factor de ortogonalidad máximo en su origen, pero que se va perdiendo por la propagación multitrayecto, y del resto de células que tienen áreas de cobertura solapadas, que también llegan al terminal m .

Como se puede observar, para una comunicación entre un terminal y una célula, tanto para el uplink como par el downlink, la CIR se degrada en función del grado de solapamiento que existe entre las células, siendo necesario aumentar la potencia de transmisión para superar el valor de CIR_{target} (que será diferente para cada tipo de servicio), labor que realiza la funcionalidad del Control de Potencia. Pero este aumento de potencia interfiere en el resto de terminales y células, degradando a su vez la calidad de servicio del resto de la red colindante. Esta situación se denomina Interferencia Mutua.

En la Figura IV.7 se muestra el balance de potencia entre el uplink y el downlink. Teniendo en cuenta que las células tienen una potencia media de emisión superior al de los terminales, se pueden producir las siguientes situaciones:

- a) en un tramo del día en el que hay poco tráfico de llamadas de voz y sesiones de datos, la interferencia mutua será pequeña, y la célula tendrá potencia de sobra para dar servicio a todos sus usuarios, por lo que la limitación vendrá dada por la potencia máxima que puedan transmitir sus terminales. En este caso la limitación se da por cobertura en el uplink, o dicho de otro modo, la célula llega “más lejos” de lo que puede llegar el terminal.
- b) pero si el número de usuarios aumenta de forma considerable, y con ello la interferencia mutua, la célula no podrá repartir tanta potencia para cada terminal, por lo que se produce una limitación por capacidad. Es decir, que la célula agota sus recursos para el número de usuarios que pretende servir.

En términos coloquiales, este comportamiento se denomina *respiración celular*, pues el área de la célula cambia en función del número de usuarios que están en ese momento utilizando los recursos.

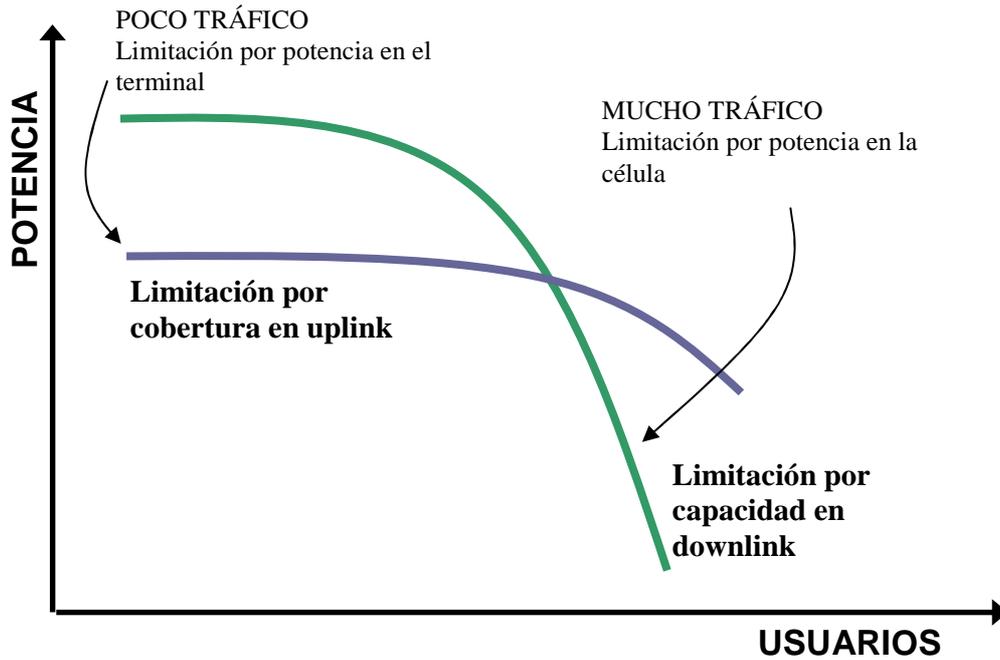


Figura IV. 7 Relación Cobertura - Capacidad

4.1.2 Arquitectura del sistema UMTS

En la Figura IV.8 se muestra un esquema simple de la arquitectura del sistema UMTS. La *RNC* (*Radio Network Controller*) se encarga de realizar las gestiones de recursos radio (potencias, traspasos entre células, etc.). La *MSC* (*Mobile Switching Centre*) se encarga de la conmutación de circuitos (voz), mientras que el *SGSN* (*Serving GPRS Support Node*) se encarga de los paquetes de datos. Los enlaces *Iub* conectan los nodos B con las *RNC*, y entre ellas con el enlace *Iur*. Los *UE* (*User Equipment*) son los terminales de los abonados.

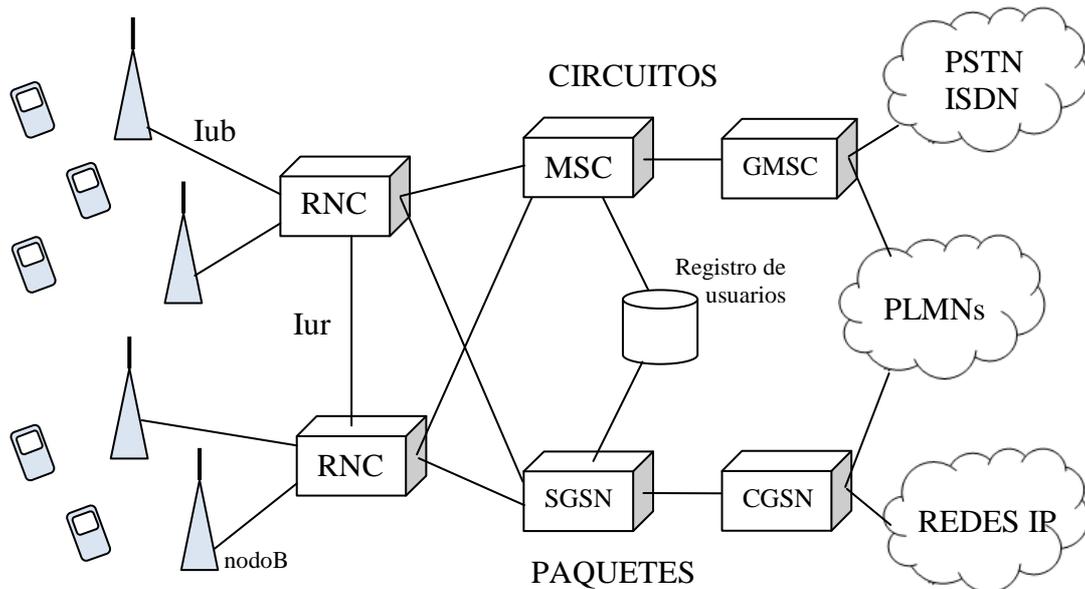


Figura IV. 8 Arquitectura del sistema UMTS

4.2 Acceso Radio LTE (OFDM)

El crecimiento exponencial del tráfico de datos observado desde 2007, junto con la generalización de las tarifas planas para el acceso a Internet móvil que empezaba a producir un desacople entre los ingresos del operador frente a los costes de despliegue de red, fueron los motivos principales por los que se comenzó a definir una nueva norma. El camino apuntado por el 3GPP para cubrir las necesidades tecnológicas en el horizonte 2010-2020 tiene a LTE como máximo exponente.

Uno de los objetivos del nuevo sistema era el aumento de la eficiencia espectral (que se mide en términos de bits/s/Hz) respecto de la tecnología utilizada en WCDMA, lo que implicó el diseño de una nueva técnica de acceso múltiple y un interfaz radio mejorado. Diferentes experiencias obtenidas durante años en las redes móviles implantadas por los operadores, así como el progreso tecnológico para el desarrollo de los nodos y los terminales de usuario, determinaron la técnica *OFDM* (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [6] [7] [8] como la más adecuada para manejar grandes anchos de banda de 20 MHz (100 MHz para LTE-Advanced), frente a los 5 MHz del sistema UMTS, con el objeto de lograr el aumento de eficiencia espectral deseado.

Como se explicó en el Capítulo III, la transmisión de una señal sobre 20 MHz de ancho de banda estará afectada por la dispersión temporal, que produce en el dominio del tiempo interferencia intersimbólica (ISI) y en el dominio de la frecuencia, para sistemas de banda ancha, desvanecimiento selectivo en frecuencias (FSF). Como consecuencia, la señal recibida experimenta una distorsión. La técnica de transmisión *OFDM* constituye un mecanismo de transmisión multi-portadora consistente en multiplexar un conjunto de símbolos sobre un conjunto de subportadoras. Gracias a las propiedades de ortogonalidad de dichas subportadoras, es posible efectuar la transmisión simultánea de todos los símbolos manteniendo la capacidad de separación de los mismos en recepción. Esta técnica ofrece las siguientes ventajas:

- a) gracias a la introducción del denominado prefijo cíclico se consigue eliminar los efectos de la ISI, que consiste en alargar un tiempo T_P la transmisión de cada símbolo OFDM, a base de repetir, al principio del símbolo, la señal que se envía durante los últimos T_P segundos del símbolo, siendo T_P el retardo máximo producido en la transmisión
- b) la ecualización de subportadoras de banda estrecha para contrarrestar el FSF resulta más sencilla para la circuitería disponible en la actualidad mediante la implementación práctica de los moduladores y demoduladores que utiliza técnicas basadas en la transformada discreta de Fourier (DFT: Discrete Fourier Transform).
- c) la asignación dinámica de las diferentes subportadoras a los diferentes usuarios proporciona un alto grado de flexibilidad, mejorando así la gestión de los recursos en función de las necesidades de velocidad de datos en cada instante o de la calidad del canal radio.

La característica fundamental de la técnica *OFDM* es el empleo de un conjunto de K subportadoras que presentan la propiedad de ser ortogonales. Asumiendo la notación de señales complejas, dichas subportadoras pueden formularse en banda base como (Figura IV.9):

$$x_k(t) = e^{j2\pi k\Delta f t} \text{rect}_{T_S}(t) \quad 0 \leq k \leq K - 1$$

donde

$f_k = k\Delta f$: es la frecuencia de la subportadora k-ésima,
 rect_{T_S} : representa un pulso rectangular con duración entre 0 y T_S ,
 $\Delta f = 1/T_S$: es la separación entre subportadoras.

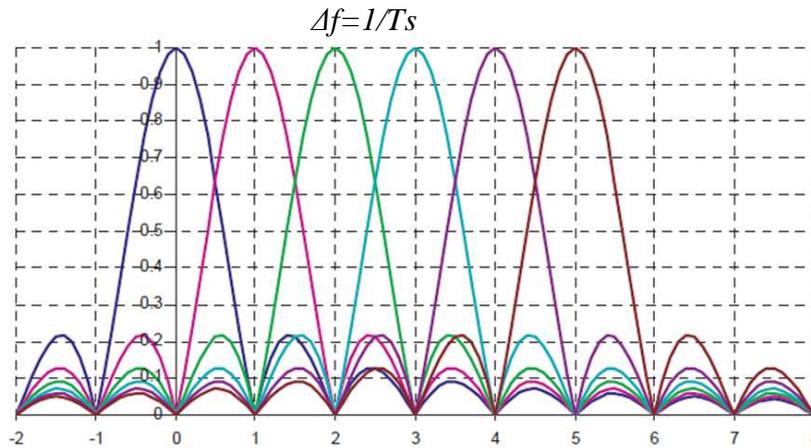
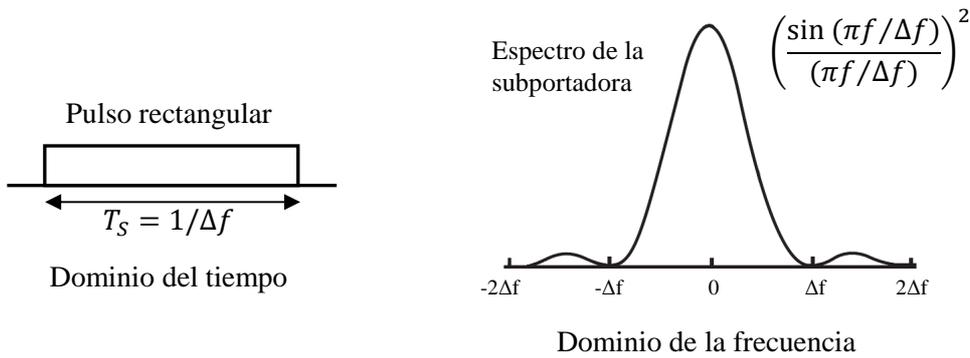


Figura IV. 9 Aspecto de la señal OFDM

Con esta definición, dos subportadoras diferentes $x_m(t)$ y $x_k(t)$ cumplen la condición de ser ortogonales en el intervalo temporal T_S , lo que significa que la integración del producto de las mismas en dicho intervalo es nula excepto cuando $m=k$. Además, la propiedad de ortogonalidad entre subportadoras se consigue precisamente gracias a la relación existente entre la separación de las mismas Δf y su duración temporal T_S .

La Figura IV.10 muestra el esquema de modulación para un conjunto de K símbolos d_0, d_1, \dots, d_k que se desean transmitir, y la Figura IV.11 el receptor, donde los símbolos son recuperados.

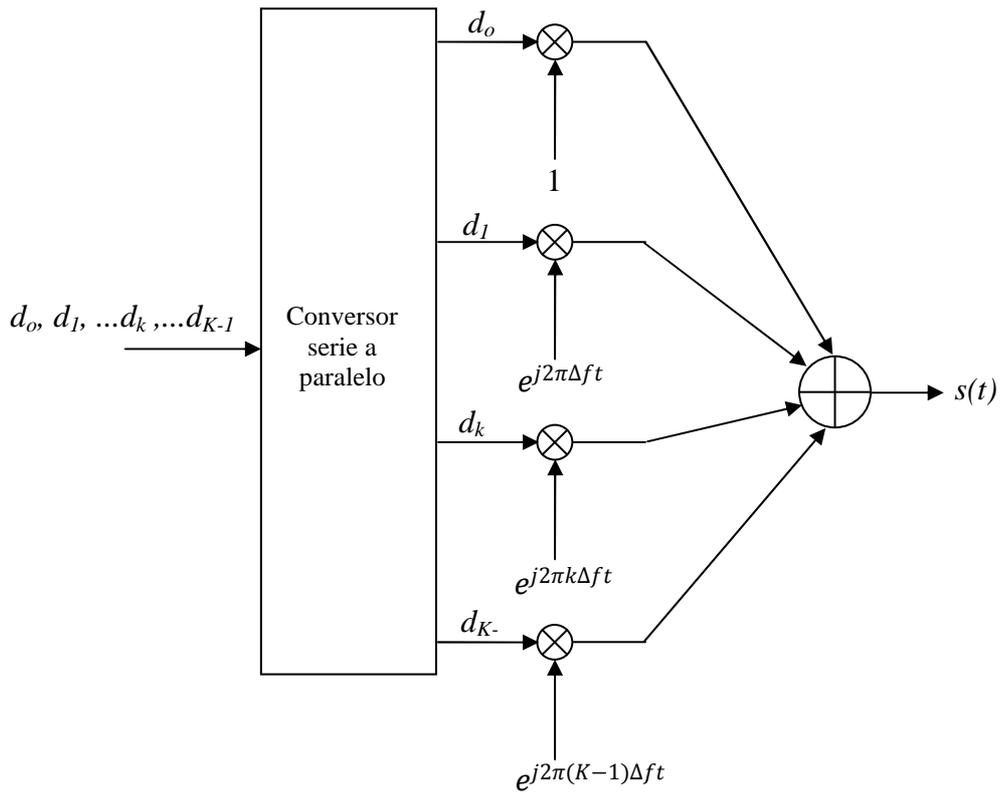


Figura IV. 10 Esquema del transmisor

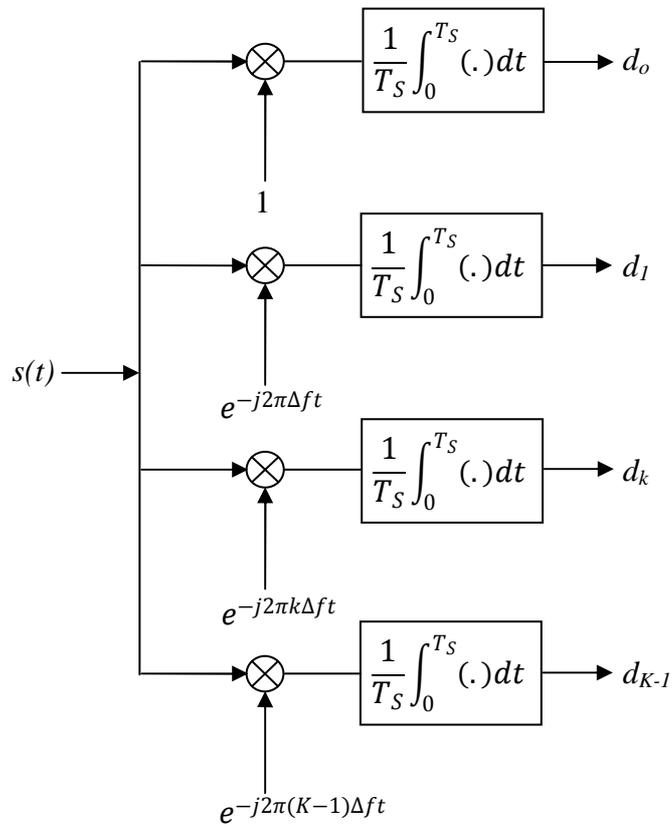


Figura IV. 11 Esquema del receptor

4.2.1 Interferencias en los sistemas OFDM

El método de acceso UMTS visto en el apartado 4.1 garantiza la separabilidad de la información en el receptor mediante la aplicación de códigos ortogonales y de aleatorización, lo que permite cierto solapamiento de las células que emiten en la misma frecuencia mientras no se produzcan niveles considerables de pérdida de ortogonalidad por multitrayecto. Para LTE, la técnica OFDM asegura la ortogonalidad entre las subportadoras que emite una célula concreta, pero no evita la interferencia en los bordes con otras células cuando se produce el solapamiento, salvo que se utilicen diferentes estrategias que serán analizadas en posteriores capítulos. Para entender la necesidad de disponer de estos mecanismos de reducción de interferencias en LTE, se requiere entender previamente el concepto que se explica a continuación [9] [10] [11].

Partiendo de la ecuación de la relación Señal a Interferente:

$$\frac{\text{Strength of desired signal}}{\text{Noise} + \sum \text{Strength of interfering signals}} = SINR$$

se considera la interferencia intracelular como nula debido a las propiedades de ortogonalidad de las subportadoras OFDM. Se define, por tanto, el factor de geometría celular g , como la relación entre la potencia recibida en el terminal de la señal deseada, y la potencia de interferencia recibida del resto de células colindantes. En consecuencia:

$$g = \frac{P_{SC}}{P_{OC}}$$

donde

P_{SC} : potencia deseada de la misma célula

P_{OC} : potencia interferente de células colindantes

Suponiendo que la potencia emitida por todas las células son similares y que la pérdida básica de propagación sigue leyes similares en el mismo entorno, el valor g depende solo de la geometría celular (tipo de antena utilizada, punto interior o borde de célula). El valor $SINR$ vale por tanto:

$$SINR = \frac{P_{SC}}{P_{OC} + P_n} = \frac{1}{g^{-1} + SINR^{-1}}$$

$$SINR = \frac{P_{SC}}{P_n}$$

donde P_n es la potencia de ruido térmico.

De esta ecuación se deduce que $SINR < g$, con lo que la geometría celular, que depende de la virtud que posee una red móvil de generar una estructura celular regular, limita la $SINR$ máxima que se puede obtener. Puesto que el objetivo es alcanzar la máxima eficiencia espectral, la norma LTE recomienda utilizar patrones de reutilización de frecuencias iguales a uno. Pero esta situación puede producir en los

bordes de célula una interferencia excesiva, lo que implica una reducción del factor g , con ello una baja $SINR$, y en consecuencia un caudal limitado.

4.2.2 Arquitectura del sistema LTE

El tráfico de datos cada vez mayor en las redes móviles, en los que predomina la contratación de tarifas planas por parte de los abonados, produciría un desacople entre los ingresos por el incremento de tráfico de voz según el modelo de los primeros años, y la inversión necesaria para el despliegue de red. Por esta causa, LTE contempla una serie de mejoras entre las que se encuentra la simplificación de la arquitectura de red como se muestra en la Figura IV.12. Como se mostró en el apartado 4.1.2, la estructura del sistema UMTS se compone de tres jerarquías principales: el nodo B, el RNC y la MSC. Sin embargo en LTE, el eNodeB (el prefijo *e* viene del inglés *evolved*, es decir, evolucionado) es capaz de tomar por sí solo todas las decisiones de la gestión de recursos radio, por lo que no necesita un elemento superior de control. Además, se define un nuevo enlace entre nodos, el X2, con el objeto de comunicarse entre ellos las necesidades de handovers o congestión de sus recursos. Aparece también un nuevo elemento llamado *EPC* (*Evolved Packet Core*), que contiene los interfaces necesarios para comunicarse con otras redes, los registros de usuarios, tarificación, etc. Contiene los subsistemas *S-GW* (*Serving Gateway*, plano de usuario) y *MME* (*Mobility Management Entity*, plano de control).

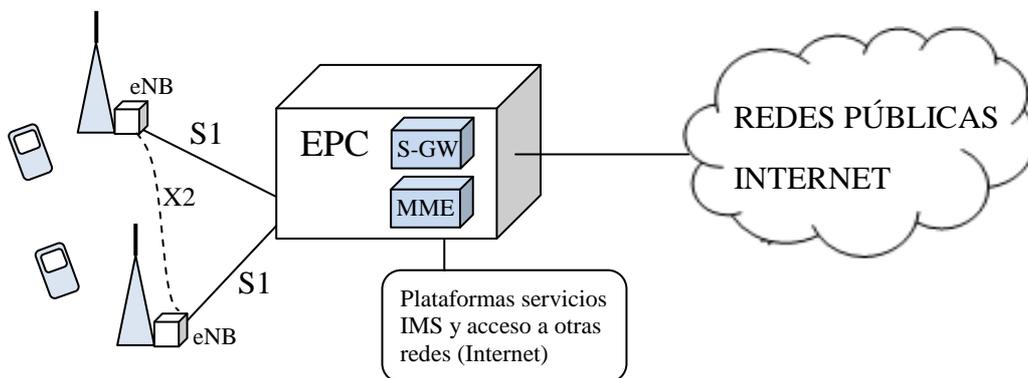


Figura IV. 12 Arquitectura del sistema LTE

4.3 Figuras de mérito e índices de calidad

Para evaluar el funcionamiento de una red celular se dispone de diversas figuras de mérito de ámbito general y de índices específicos que son más apropiados para conocer aspectos concretos de la red, llamados *KPIs* (*Key Performance Indicator*) [12]. La principal fuente de información se origina en los terminales de los propios usuarios, cuyo tráfico de voz, datos y señalización quedan registrados en los sistemas *OSS* (*Operación y Supervisión de Red*). Los resultados de las medidas son presentadas en forma de índices o figuras de mérito estadísticas y, son estos y su evolución, los que se utilizan para evaluar y comparar redes.

4.3.1 Figuras de mérito habituales

Cualquier Figura de mérito debe utilizar como datos de entrada información disponible a partir de las estadísticas de la red. La información inicial más relevante es la siguiente:

- *minutos totales cursados o tráfico ofertado*: Erlangs/BH.
- *número total de llamadas establecidas*.
- *número total de llamadas caídas*.
- *número total de HO efectuados*.

A partir de esta información se definen las siguientes figuras de mérito típicas.

$$\text{Tasa de llamadas caídas} = \frac{\text{llamadas caídas}}{\text{llamadas establecidas}}$$

- Significado: probabilidad de que una llamada no acabe normalmente.
- Ventajas: intuitiva, fácil de calcular y de comprender.
- Inconvenientes: no es válida para el análisis individual de células de tránsito. Da la misma importancia a una llamada caída tras 30 s. que a una caída tras 30 min.

$$\text{Relación caídas y establec.} = \frac{\text{llamadas caídas}}{\text{llamadas establecidas} + \text{traspasos efectuados}}$$

- Significado: probabilidad de que la asignación de un canal termine anormalmente.
- Ventajas: es útil para la comparación célula a célula dentro de una red.
- Inconvenientes: no informa de la calidad percibida por los usuarios. No es válida para comparar redes, ya que la frecuencia de traspasos es fácilmente modificable mediante parámetros.

$$C = \frac{\text{Erlang 60}}{\text{llamadas caídas}}$$

- Significado: es el tiempo que dura una llamada antes de caerse.
- Ventajas: es independiente de las características de cada red. Es aplicable a cualquier tipo de célula dentro de una red.
- Inconvenientes: para conocer la calidad percibida por los usuarios hay que conocer además los hábitos de estos en lo referente a la duración de llamadas.

La última figura de mérito es la más indicada para evaluar el comportamiento de una red, y para comparar redes entre sí, ya que su valor no depende del tipo de célula bajo estudio, ni puede ser manipulado asignando determinados valores a los parámetros celulares. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este índice por sí solo no informa del grado de satisfacción de los usuarios. La relación entre tráfico y llamadas caídas es un índice objetivo para evaluar la red, pero no es válido estudiar el binomio

red + abonados de diferentes redes. Sí serviría para medir la satisfacción de un mismo usuario modelo que utilizase varias redes.

El principal inconveniente de la Figura C es que no informa de las expectativas de los abonados en cuanto a duración de llamadas. Por eso no es válido para medir el grado de satisfacción subjetiva, ya que mide la duración media de llamada antes de caer, pero no dice nada de la duración media de llamada que los abonados utilizan.

Si se desea conocer el grado de satisfacción de los abonados, es preciso conocer las distribuciones de duración de llamadas, así como la relación entre el tráfico y las caídas para relacionar ambas y calcular así las tasas de caídas para cada longitud o duración de llamada. Una Figura de mérito calculada mediante la tasa de llamadas caídas en función de la longitud de la llamada combinada con la distribución de longitudes de llamadas, describiría perfectamente tanto la robustez de la red como las características del tráfico ofertado por los abonados. Es decir, el índice C presenta el tiempo medio de servicio entre caídas. Cuanto mayor sea el valor del índice, más robusta es la red. Sin embargo, la percepción subjetiva de los abonados en dos redes con el mismo índice puede ser muy diferente.

Supóngase dos redes con el mismo número de llamadas por minuto, pero en una de ellas la duración media de llamadas es el doble que en la otra. Para tener el mismo índice la primera red debe tener el doble número de caídas por minuto que la segunda. Ambas redes ofrecen exactamente la misma calidad de servicio, pero en la primera el número de conexiones interrumpidas es el doble ya que los abonados son el doble de exigentes; esto es, reclaman el doble de servicio. El resultado es que el número de abonados irritados en la primera red es el doble que en la segunda, aunque ambas ofrecen una calidad idéntica. Es por esto que interesa conocer la distribución del tiempo de servicio demandado por los usuarios para saber el grado de satisfacción de éstos. Es esta distribución de tiempos de servicio demandado la que determina el grado de exigencia de calidad por parte de los abonados.

De lo expuesto se desprende la necesidad de disponer de tres figuras de mérito diferentes, en función de qué es lo que se desea evaluar:

- a) si se desea medir la calidad objetiva de la red, para analizar su evolución en el tiempo o para compararla con otras redes, es necesario emplear una Figura de mérito independiente de los hábitos de los usuarios.
- b) si se desea medir la calidad de la red tal y como la perciben los usuarios, hay que utilizar una figura de mérito que mida el nivel de servicio demandado, y que sea independiente de las características de la red.
- c) si se desea medir el nivel de exigencia de los abonados de la red, hay que usar una figura de mérito que mida el nivel de servicio demandado, y que sea independiente de las características de la red.

Por tanto, se definen las tres figuras de mérito siguientes:

- a) la figura de mérito que mide el grado de satisfacción de un conjunto de abonados concreto en una red concreta es, directamente, la *tasa de llamadas caídas* en la red. Esta es la probabilidad de interrupción de llamada que los

- abonados perciben en la red. Se presenta normalmente en forma de *porcentaje de llamadas caídas*.
- b) la figura de mérito que mide el nivel de exigencia de un conjunto de abonados es la *distribución de duración de llamadas*, que se asume exponencial. La duración media de llamada es la figura de mérito a utilizar para esto.
 - c) la figura de mérito que evalúa la calidad de una red con independencia de sus abonados es el *cociente entre tráfico en minutos y caídas*, conocido también como valor C, o lo que es lo mismo, el inverso de la tasa de llegada de caídas a un canal permanentemente ocupado.

4.4 Información del funcionamiento de la red

La información necesaria para construir los indicadores de calidad se puede extraer directamente de la estructura de red a través de los contadores y bases de datos del OSS, o bien mediante sistemas autónomos de medidas de campo (drive test), tal y como se muestra en la Figura IV.13.

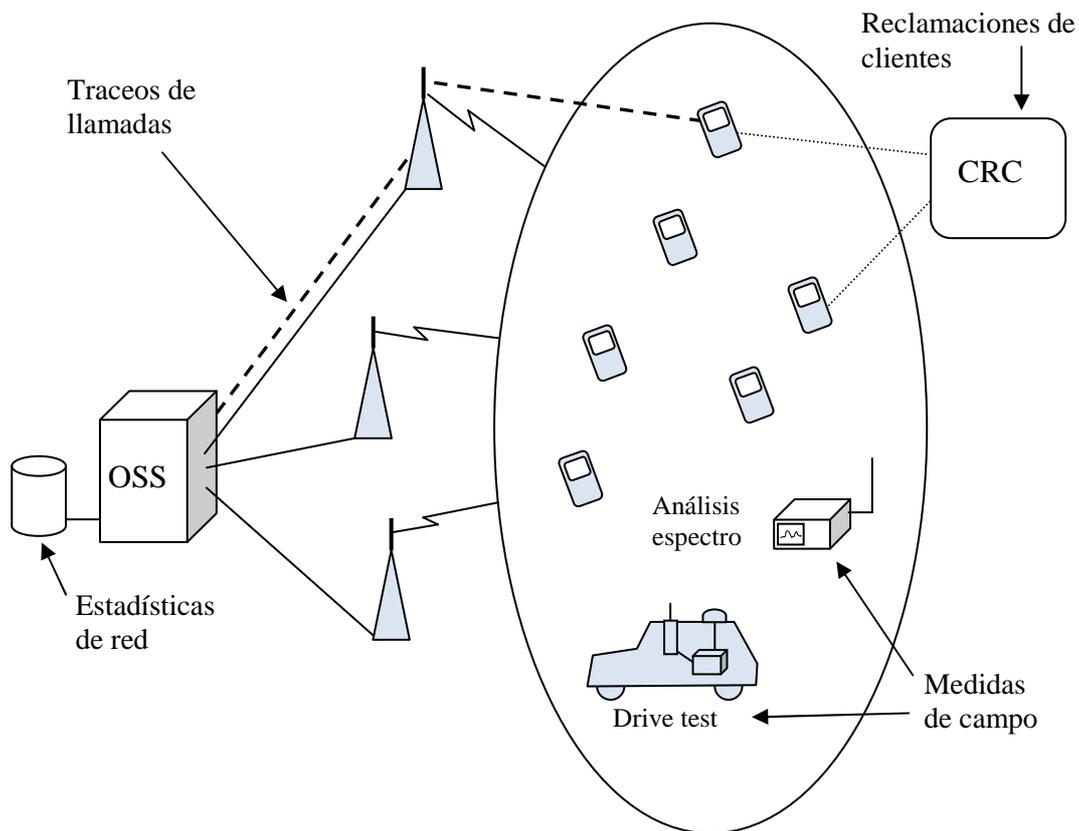


Figura IV. 13 Medida de KPIs del sistema

Las estadísticas de radio se obtienen normalmente de la red o de un servidor conectado a ésta que gestiona y ofrecen gran cantidad de contadores útiles para los diferentes métodos de optimización. Mientras que los trceos de célula consisten en registrar todos los eventos de todas o alguna de las comunicaciones (llamadas,

actualización, etc.) que se producen dentro de una célula. Se denomina evento a los mensajes de señalización que intercambia la red con el móvil y aquellos internos que se generan en el sistema de estaciones base o diferentes interfaces o capas de transmisión. Los tipos de traceo más comunes son los siguientes:

- a) *trazos de célula*: se registra la señalización y medidas de todas las comunicaciones servidas por una célula determinada durante un período de tiempo. Los terminales informan de los valores de potencia e interferencia que recibe de la célula servidora, y de todas las células colindantes que son capaces de escuchar..
- b) *trazos de móvil*: se registra la señalización y medidas de las comunicaciones mantenidas por el terminal de un determinado abonado.

Las herramientas de análisis de traceo permiten realizar las siguientes tareas:

- a) *análisis de accesos a una célula*: mediante este análisis es posible obtener conclusiones sobre el tipo de tráfico que accede a la misma. Igualmente, es posible modelar el tiempo medio entre llamadas o accesos a una célula. Engloba el estudio detallado de la evolución del proceso de establecimiento de una conexión, así como un estudio del grado de ocupación real de los canales de tráfico.
- b) *análisis de traspasos entrantes y salientes de una célula*: estudiando las condiciones en que se producen los traspasos es posible determinar si las colindancias en una determinada zona están bien definidas. Se realizan estudios detallados de traspasos fallidos, traspasos intracelulares, fenómenos de ping-pong, traspasos entre bandas, histogramas de traspasos, etc.
- c) *análisis de desconexiones*: el estudio de las causas de la desconexión de una llamada proporciona una información muy valiosa sobre la calidad de servicio de esa célula.
- d) *análisis de los informes de medida*: el tratamiento estadístico de todos los datos disponibles tras un traceo proporciona una imagen muy fiel de la calidad de servicio de la célula. Los informes de medidas tomados por la estación base y la estación móvil permiten correlar unas magnitudes con otras. Por ejemplo, se puede relacionar la calidad con el timing advance (distancia), o con el nivel de señal.
- e) *representación de conexiones*: permite examinar con detalle la señalización y las medidas intercambiadas entre la red y el móvil en aquellas conexiones que tienen problemas.
- f) *análisis de interferencias*: a partir de las medidas de los niveles con que el terminal recibe a las células vecinas, es posible detectar aquellas que pueden estar interfiriendo a la célula bajo estudio.

Los drive test son medidas que se realizan con un equipo formado por un ordenador portátil, uno o dos teléfonos móviles, y un GPS. Normalmente se sigue una ruta establecida en una zona, carretera, o simplemente alrededor de una célula concreta, en la que se captura toda la información de señalización del interfaz radio entre la red y el teléfono móvil. También se pueden realizar transmisiones de patrones para caracterizar la voz desde un punto de vista equivalente al de un usuario.

Los drive test pueden efectuarse en interiores o en exteriores. En el caso de realizar medidas en interiores es necesario seleccionar un plano, especificar los puntos de medida y el recorrido a efectuar. En el caso de realizar la prueba en exteriores es necesario utilizar un receptor GPS. Opcionalmente se pueden emplear capas de cartografía y sectores para la visualización en tiempo real de la posición geográfica de la Unidad Móvil.

En algunas ocasiones se degrada la calidad del servicio por interferencias producidas por la propia red o por elementos externos, como por ejemplo radioenlaces de canales de televisión y radio ilegales. Esta degradación es detectada primeramente en el análisis de los índices de calidad, en las estadísticas radio y en los traceos. La medida consiste en realizar un estudio con un analizador de espectro ubicado en las cercanías de las células afectadas. El analizador de espectro se puede utilizar también para ver la respuesta en frecuencia de los elementos que componen el subsistema radio, o de los microrepetidores que se instalan por peticiones locales de determinados clientes.

Las reclamaciones de clientes son una herramienta importante para conocer los problemas en la red que no han podido ser detectados con las herramientas de análisis comentadas. Una vez estudiado el problema y resuelto, los clientes son también un método de comprobación de que la acción correctora ha sido la adecuada.

Bibliografía

- [1] José A Rabadán Borges, Rafael Pérez Jimenez, Silvestre Rodríguez Pérez, and Francisco López Hernández, *Fundamentos de los sistemas de espectro ensanchado*, Colección textos universitarios ed., Gobierno de Canarias Dirección general de universidades e investigación, Ed., 2001.
- [2] Harri Holma and Antti Toskala, *WCDMA for UMTS*.: Wiley, 2000.
- [3] Ramjee Prasad and Tero Ojanperä, "An overview of CDMA evolution toward wideband CDMA," *IEEE Communications Surveys*, 1998.
- [4] José María Hernando Rábanos, *Comunicaciones Móviles*.: Centro de Estudios Ramón, 1997.
- [5] Andreas Eisenblätter, Hans-Florian Geerdes, Thorsten Koch, Alexander Martin, and Roland Wessäly, "UMTS Radio Network Evaluation and Optimization Beyond Snapshots," *IEEE*, 2004.
- [6] Ramón Agusti et al., *LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*, Fundación Vodafone España, Ed. Madrid, 2010.
- [7] Stefania Sesia, Issam Toufik, and Matthew Baker, *LTE – The UMTS Long Term Evolution, From Theory to Practice*. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2011.
- [8] Ignacio Berberana Fernández de Murias, Wsewolod Warzanskyj García, and Alejandro Becerra González, *Perspectivas de evolución de los sistemas radio*, 382006th ed., Telefónica I+D, Ed.: Comunicaciones de Telefónica I+D, 2006.
- [9] Alexander Engels et al., "Autonomous Self-Optimization of Coverage and Capacity in LTE Cellular Networks," *IEEE*, vol. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 62, NO. 5, JUNE 2013, no. 0018-9545, pp. 1989-2004, 2013.
- [10] Weihao Lv, Wenjing Li, Heng Zhang, and Yanguang Liu, "DISTRIBUTED MOBILITY LOAD BALANCING WITH RRM IN LTE," *IEEE*, vol. Proceedings of IC-BNMr2010, no. 978-1-4244-6769-3/10, pp. 457-461, 2010.
- [11] Ingo Viering, Martin Döttling, and Andreas Lobinger, "A mathematical perspective of self-optimizing wireless networks," *IEEE*, no. 978-1-4244-3435-0/09, 2009.
- [12] Ralf Kreher, "UMTS Performance Measurement, A Practical Guide to KPIs for the UTRAN Environment," *Wiley*, p. 227, 2006.

Capítulo V

Problema de Optimización Cobertura-Calidad-Capacidad-Coste

La optimización de redes de telefonía móvil se puede definir como el proceso iterativo de búsqueda del conjunto óptimo de las cuatro “C” que le caracterizan, y tiene por objetivo:

- aumentar la Cobertura,
- aumentar la Calidad
- aumentar la Capacidad,
- disminuir el Coste.

Se presenta, por tanto, la necesidad de determinar una configuración óptima en términos de uno o varios de estos cuatro criterios. La dificultad para llegar a un compromiso entre los objetivos fijados hace muy complejos los procesos de optimización. En la mayor parte de los casos, esos objetivos son contrapuestos, ya que para dar mayor cobertura sería necesario aumentar el número de estaciones base, pero esto implica un mayor coste. Otra solución sería hacer un despliegue de células paraguas o dominantes que abarquen áreas muy amplias, con el inconveniente de que estarán muy limitadas en capacidad.

Ni siquiera existe una solución óptima en sentido estricto, sino que dependiendo de la importancia relativa de cada objetivo, la solución puede variar en uno u otro sentido. Así pues, tomando como ejemplo zonas de elevada concentración de usuarios, ya sea de forma estacional o eventual, la red debe disponer de un conjunto de células de pequeña cobertura con los recursos necesarios para ofrecer una gran capacidad. Ambos objetivos (cobertura y capacidad), por tanto, no son optimizables de forma simultánea. Tal y como se explicó en el Capítulo IV con la formulación necesaria para alcanzar una *CIR* o *SINR target*, una red diseñada para maximizar la cobertura con el menor número de estaciones base deberá probablemente sacrificar parte de la capacidad que eventualmente podría soportar con una determinada calidad de servicio. La interferencia mutua entre las células que se solapan y los sobrealcances, otorgan a las redes móviles un carácter altamente no lineal entre los diferentes parámetros de control de emisión de la señal radio y las causas que provocan la modificación, de forma aislada, de alguno de estos parámetros. Además, no siempre la mejor solución desde el punto de vista técnico es viable por diversas causas que se describirán en este capítulo.

Otra característica fundamental de los despliegues de nuevas redes que van apareciendo, según los avances tecnológicos, es el tiempo de implantación y puesta en servicio, desde las primeras estaciones base analógicas que emitían en 450 MHz, hasta los nodos actuales de LTE. Esto le proporciona al sistema un carácter de evolución temporal, desde configuraciones muy simples con pocas estaciones muy fáciles de optimizar, hasta redes ya muy maduras y densas donde el trabajo de mejora de las cuatro “C” resulta notablemente complejo. A este proceso evolutivo le acompaña irremediabilmente la adquisición progresiva, por parte de los clientes, de terminales multibanda y multisistema, así como la aparición de nuevos servicios, como el famoso WhatsApp y aplicaciones similares, que obligó realizar una mejora de la red UMTS, y además tuvo influencia en el diseño de la norma LTE.

Así pues, en una primera fase de optimización se utiliza el modo estadístico o preoperacional, en la que se emplea un simulador de red y una herramienta de planificación. También se realiza el ajuste fino del funcionamiento de la red de acceso en función de los datos estadísticos recogidos durante un largo periodo de tiempo. En esta fase se toma la decisión de llevar a cabo cambios de parámetros físicos en algún elemento de red (frecuencias, inclinación de las antenas, potencias transmitidas, etc.) o cambios de parámetros lógicos (potencia de transmisión, umbrales y temporizadores, definición de colindancias, etc.).

Las herramientas de simulación ofrecen la posibilidad de construir escenarios partiendo de la cartografía real de la zona bajo estudio, importar datos reales de tráfico o generados por el usuario, distribuirlos conforme a diversos métodos de difusión, y realizar cálculos de cobertura con los modelos de propagación más utilizados en las redes de comunicaciones móviles. Empleando estos métodos, se puede simular nuevas configuraciones celulares, optimizar los índices de calidad basados en datos estadísticos, y manejar gran cantidad de información estadística con el objeto de generar automáticamente instrucciones de cambio de parámetros para que el OSS los distribuya en la red.

Pero cuando la red empieza a densificarse, y tiene carácter heterogéneo donde coexisten sistemas GSM, UMTS, LTE en los que no queda otro remedio que realizar handovers entre ellos para garantizar el servicio al usuario, es necesario utilizar algoritmos multiobjetivo que sean capaces gestionar una cantidad considerable de datos y parámetros de red.

En este capítulo se realizará una descripción del problema de optimización, y se mostrarán diferentes técnicas para obtener los objetivos deseados por el operador. También se realizará una descripción de los principales aspectos o agentes externos que limitan el proceso de mejora de las prestaciones de la red.

5.1 La interferencia como aspecto limitador

La tasa de bits experimentada por un usuario depende del valor SINR del canal. Ambos sistemas UMTS y LTE son capaces de cambiar el esquema de modulación desde el más robusto pero de menor velocidad QPSK, pasando por 16QAM o 64QAM, más sensible al ruido pero de mayor velocidad. Esta adaptación se realiza en función del valor, en cada instante, del Indicador de Calidad de Canal (CQI: Channel Quality

Indicator). Para el escenario de la Figura VI.1, de acuerdo con la fórmula de Sahnnon, la eficiencia espectral del sistema (en valores de bits/Hz) con Interferencia Inter Celular (ICI), se puede expresar de la siguiente forma [1]:

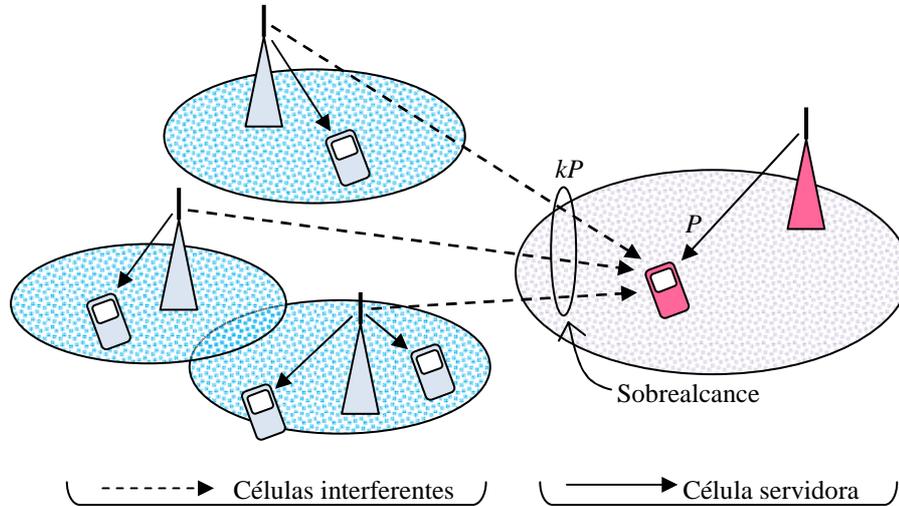


Figura V. 1 Interferencia producida por sobrealcance

$$\eta_{interf} = \log_2 \left(1 + \frac{\text{Potencia célula servidora}}{\sigma^2 + \text{Potencia células colindantes}} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{P}{\sigma^2 + kP} \right)$$

donde σ^2 es el ruido térmico, P la potencia de la célula servidora, y kP la potencia de las células interferentes o colindantes.

Los escenarios donde $kP \gg \sigma^2$ se dice que están limitados por interferencias, y afecta no solo a la eficiencia espectral y a la capacidad de las células, sino a la calidad del sistema que se expresa principalmente con los indicadores de tasa de llamadas caídas o llamadas no completadas, como se mostró en el Capítulo IV. Nótese que un escenario interferido ofrecerá mayor dificultad para mantener la llamada en la célula, y tendrá una tasa de error mayor en los paquetes de señalización del control de handover y potencia, lo cual provocará una limitada respuesta del sistema ante la movilidad de los usuarios por la red. El objetivo por tanto de los procesos de optimización será reducir k al valor más bajo posible.

Como se muestra en, la eficiencia espectral sin interferencia, es decir para $k=0$, se expresa de la siguiente manera:

$$\eta_{no\ interf} = \log_2 \left(1 + \frac{P}{\sigma^2} \right) = \log_2(1 + SNR)$$

Siendo SNR la Relación Señal a Ruido. Por tanto, la pérdida de eficiencia espectral resulta:

$$Loss = \frac{\eta_{no\ interf} - \eta_{interf}}{\eta_{no\ interf}} = \frac{\log_2\left(\frac{1 + SNR}{1 + \left(\frac{1}{SNR} + k\right)^{-1}}\right)}{\log_2(1 + SNR)}$$

La Figura V.2 muestra gráficamente el significado de estas expresiones en función de los valores de k y de SNR . La Figura V.2 a) muestra que, para valores de interferencia moderados ($k \geq 0,50$), incrementos significativos de la SNR apenas tiene efecto en la eficiencia espectral.

En la Figura V.2 b) se puede ver que para escenarios con relativo bajo ruido ($SNR = 15\text{ dB}$), la capacidad se reduce de un 80% a un 40% cuando la Relación Señal a Interferente (SIR), que equivale a k^{-1} , varía de -10 dB a 0 dB . Para valores de $SIR \geq 0$ (escenarios muy interferidos), la pérdida de eficiencia espectral se sitúa por encima del 80%.

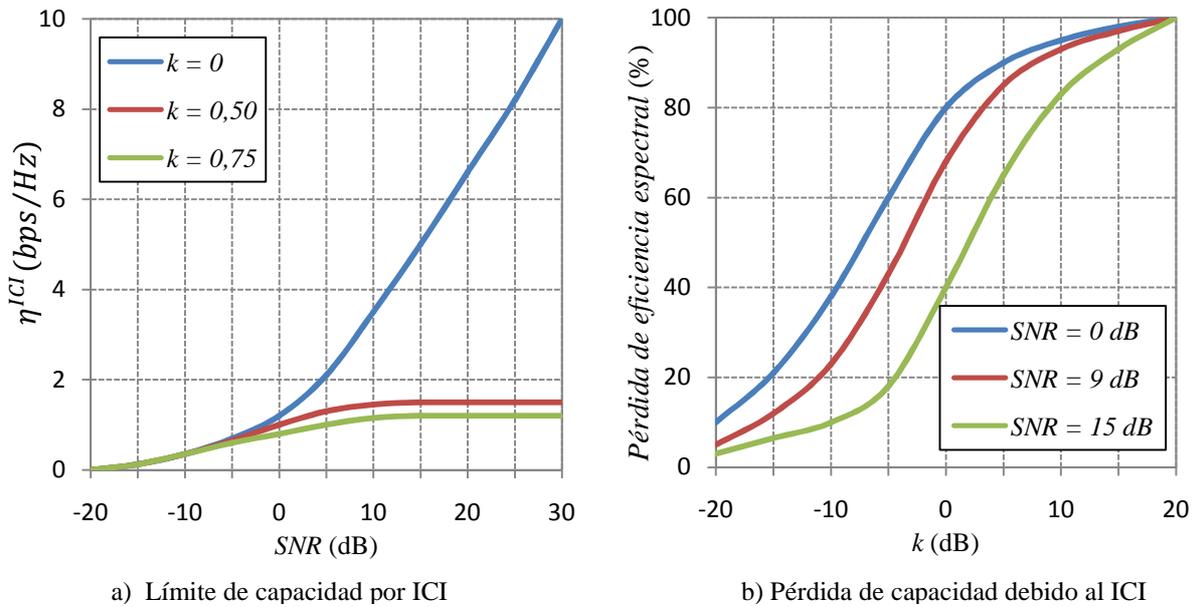


Figura V. 2 Efecto de la Interferencia Inter Celular

Este ejemplo supone una importante reflexión para escenarios muy densificados donde se dan objetivos contrapuestos según lo expresado en la introducción de este capítulo, puesto que ante un supuesto incremento de la potencia de la señal, con el objeto de alcanzar más usuarios que están en el interior de sus viviendas u oficinas, no lleva implícito una mejora de la eficiencia espectral puesto que dichas señales son interferentes para el resto de células. Téngase en cuenta que los aumentos de potencia recibida por los terminales pueden estar originados por incrementos en las potencias de emisión de las estaciones base, o por la variación en la inclinación (también llamado downtilt) de las antenas.

5.2 Funcionalidades y mecanismos convencionales de redes celulares

Los estándares de los sistemas de redes celulares definen una serie de funcionalidades básicas para asegurar valores mínimos de Cobertura-Calidad-Capacidad, que habitualmente son mejoradas o complementadas por cada fabricante. Estas funcionalidades pretenden garantizar la continuidad de la llamada o sesión de datos en movilidad, reducir al mínimo posible la potencia emitida por las estaciones base y terminales, y ejecutar diversos algoritmos de alivio de congestión en situaciones de elevado tráfico. A continuación se muestra una descripción general y suficiente para entender los métodos básicos de autocontrol, algunos de los cuales evitan que las redes se vuelvan inestables.

- a) **Control de Potencia:** es una funcionalidad que permite mantener la potencia del terminal y de la estación base, dentro de unos límites definidos por el operador, y tiene por objetivo reducir el nivel medio de interferencia en la red, emitiendo el nivel mínimo necesario para mantener el enlace. Como ventaja adicional, se logra un ahorro de la batería del móvil.
- b) **Control de Handover:** su propósito es asegurar la continuidad de la llamada de los terminales que se mueven en una zona, asegurando el cambio de célula adecuadamente. Para ello es necesario definir una configuración óptima de relación de colindancias entre las células. Aunque a priori parece una tarea sencilla, la irregularidad de la estructura celular vista en el Capítulo III requiere un estudio detallado de qué células son las más apropiadas para asignar al terminal en movilidad. Además, la existencia de redes heterogéneas y diversidad de servicios y datos, le otorga al sistema la virtud de forzar traspasos a la capa o tecnología más apropiada en función de la necesidad del usuario (GSM, UMTS, LTE).
- c) **Transmisión discontinua:** consiste en la interrupción de datos cuando el usuario que realiza una llamada de voz en GSM y UMTS, permanece en silencio. En LTE esta situación deja de tener sentido puesto que las llamadas de voz son a través de VoLTE [2] (Voz sobre IP).

La tecnología empleada en los sistemas radiantes del interfaz radio, también ha evolucionado notablemente para mejorar los enlaces. Para que los terminales de usuario sean cómodos y ligeros, deberán llevar una batería pequeña, lo que implica que emitirán potencias muy bajas respecto de la que puede emitir una estación base. Como consecuencia, el enlace ascendente (uplink) estará siempre en peores condiciones que el descendente (downlink), es decir, desbalanceado a favor del downlink. Para mantener el balance [libro gris] es necesario disponer en la recepción de la estación base, de una serie de mecanismos que mejoren el canal. Entre estos, se encuentran los siguientes:

- a) **Ganancia por diversidad:** consiste en disponer de dos antenas en el receptor que reciba dos señales incorreladas derivadas de la propagación multitrayecto, con el objeto de elegir la de mayor potencia. Los primeros sistemas utilizaban la ganancia por diversidad, en la que instalaban dos antenas separadas entre 4 y 6 metros de distancia horizontal (para coberturas marítimas la disposición de las antenas era vertical). Actualmente se utiliza la diversidad de polarización, aprovechando los cambios de polarización por múltiples reflexiones que sufren las diferentes

señales. Esta técnica integra en un solo panel dos antenas con polarizaciones de $\pm 45^\circ$, otorgando al sistema radiante un menor impacto visual a la vez que simplifica la instalación.

- b) **Ganancia por Soft Handover:** -*Ganancia por macrodiversidad*, en UMTS es posible que una llamada de voz esté siendo servida hasta por 3 células simultáneamente, ofreciendo así tres caminos alternativos a la señal. Este sistema tiene como inconveniente un mayor consumo de recursos y generación de interferencias, lo que debe ser evitado en zonas de alto tráfico. – *Ganancia por microdiversidad*, como se explicó en el Capítulo IV, los terminales UMTS disponen de un receptor RAKE que es capaz de combinar varias señales con retardos diferentes provocado por la transmisión multitrayecto.
- c) **Amplificadores de recepción:** también llamados TMA (Tower Mounted Amplifier) consiste en la instalación de amplificadores de recepción lo más cerca posible de las antenas de la estación base, mejorando notablemente el nivel de señal que llega al equipo de radio de la estación base.
- d) **MIMO:** que significa Multiple Input Multiple Output, es una técnica multi-antena de transmisión y/o recepción que utiliza diversas antenas acompañadas de técnicas de procesamiento de señal con distintos niveles de complejidad. Permite mejorar las prestaciones del sistema, bien sea aumentando la capacidad (más usuarios por célula), mejorando la cobertura o mejorando la velocidad de transmisión por usuario. Debido a la complejidad técnica del procesamiento y a la tecnología disponible entonces, no tuvo éxito en el despliegue del UMTS.
- e) **Beam Forming:** es otra técnica multi-antena para la conformación del haz, con el objeto de modificar el diagrama de radiación del sistema radiante en función de la concentración de usuarios que están siendo servidos, o de usuarios interferentes de otras células que se solapan.

5.3 Optimización Multiobjetivo

La aplicación de técnicas de optimización multiobjetivo permite mejorar los procesos de optimización de redes celulares, al abordar problemas con criterios de optimización en conflicto entre sí. Tal y como se describe en [3], no existe una definición de "óptimo" que sea aceptada universalmente, como en el caso de la optimización con un solo objetivo. Esto hace difícil incluso poder comparar los resultados de una técnica con los de otra, porque normalmente la decisión acerca de cuál es la mejor respuesta corresponde realmente a un humano que aplicará sus propios criterios (los cuales suelen ser subjetivos).

La optimización con objetivos múltiples (*MOP*, Multi-objective Optimisation Problem), llamada también optimización vectorial y optimización con criterios múltiples, puede definirse [4]:

El problema de encontrar un vector de variables de decisión que satisfaga las restricciones y optimice una función vectorial cuyos elementos representen las funciones objetivo. Estas funciones forman una descripción matemática de los criterios de desempeño que usualmente están en conflicto entre sí. Por lo tanto, el término

"optimizar" significa encontrar una solución tal que proporcione valores para todos los objetivos que resulten aceptables para el diseñador.

En otras palabras, deseamos determinar, de entre el conjunto de valores que satisfacen las restricciones, el conjunto de valores que produzca los óptimos asociados a las preferencias del decisor o unidad decisora.

Las restricciones dadas definen la región factible y cualquier punto de esa región constituye una solución factible. La función vectorial hace corresponder los puntos de la región factible con los puntos del espacio de soluciones, los cuales representan todos los valores posibles de las funciones objetivo. Las restricciones representan las limitaciones impuestas sobre las variables de decisión. El problema es que el significado de la palabra óptimo no está bien definido en este contexto, puesto que en raras ocasiones tenemos una solución tal que para todas las funciones objetivos y para todos los puntos de la región factible, dicha solución presente un valor mínimo (o máximo, dependiendo del criterio de optimización). En términos generales, la optimización multiobjetivo se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{mínimo } f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]$$

estando x sujeto a un conjunto de restricciones.

Se define una solución a un problema de optimización multiobjetivo, como un óptimo de Pareto, si no existe un vector factible que pudiera decrementar algún o algunos objetivos en la mencionada solución, manteniendo los niveles alcanzados en el resto de los objetivos. Desgraciadamente, el óptimo de Pareto casi siempre produce no una, sino un conjunto de soluciones a las que se les llama *no inferiores* o *no dominadas*.

Otros autores [5] precisan aún más la definición anterior mediante la división en los conceptos siguientes:

- a) *Dominancia de Pareto*. Se dice que una solución factible domina a otra, si y sólo si la primera es parcialmente mejor (por ejemplo, menor o igual) que la segunda para todos los objetivos y estrictamente mejor que la segunda para por lo menos uno de ellos.
- b) *Optimalidad de Pareto*. Se dice que una solución es un óptimo de Pareto con respecto a F , si y sólo si no existe otra solución que domine a la primera. La expresión "óptimo de Pareto" se debe entender siempre como referida al total del espacio de decisión.
- c) *Conjunto óptimo de Pareto*. Para un problema de optimización multiobjetivo dado (MOP), se define el conjunto óptimo de Pareto respecto a dicho problema, como el conjunto de puntos de la región factible que son óptimos de Pareto.
- d) *Frente de Pareto*. Para un problema dado y su conjunto óptimo de Pareto, se define el frente de Pareto como las soluciones que se obtienen para dichos puntos.

Los conceptos anteriores son extensamente usados para el análisis de los diferentes algoritmos de optimización multiobjetivo. Lógicamente, cualquier algoritmo práctico trata de encontrar el conjunto óptimo de Pareto y su frente de Pareto asociado, aunque el resultado suele ser una aproximación al mismo, o en el mejor de los casos, un subconjunto adecuadamente representativo (bien distribuido).

5.4 Métodos heurísticos de optimización

Los métodos de optimización exacta son válidos para problemas de un o dos objetivos. Estos modelos clásicos buscan el óptimo local, garantiza el óptimo numérico y permiten un elevado número de restricciones. Sin embargo no son válidos para los problemas multiobjetivo por su elevada complejidad. Para ello se utilizan los métodos heurísticos que se basan en imitar fenómenos sencillos observados en la naturaleza.

Los métodos heurísticos no garantizan la obtención del óptimo, pero sí son capaces de obtener, en un tiempo de computación aceptable, otras soluciones que pueden ser válidas. Estos métodos se pueden agrupar según dos tipos: los que están basados en algoritmos heurísticos para problemas específicos (*heurísticos*), y los que utilizan estrategias más complejas para una gran cantidad de problemas multiobjetivo (metaheurísticos).

Otro método de especial interés en el análisis estadístico de indicadores de calidad de las redes móviles es la *lógica difusa o borrosa*, que consiste en la construcción de unos umbrales de decisión adaptativos en función del comportamiento de días, semanas o meses atrás de una célula. Mediante esta técnica se puede conocer si, por ejemplo, el aumento en el índice de congestión de un recurso radio es eventual y no requiere actuación, o si va en progresivo aumento lo que implica la toma de decisiones por parte del operador para dotar de más capacidad a la zona afectada.

En la Figura V.3 se muestra un esquema de los modelos comentados.

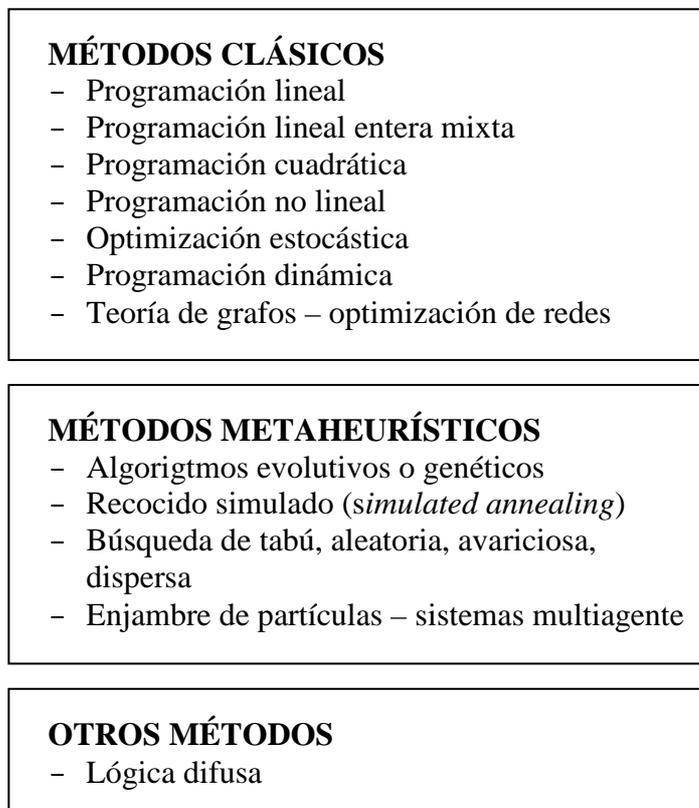


Figura V. 3 Métodos de optimización

5.4.1 Optimización de áreas de RNC

Una de las aplicaciones de la optimización metaheurística es la minimización de trasposos o handovers entre áreas de RNC. Para una red como la de la Figura V.4, los terminales que realicen un handover entre dos nodos de distintas RNCs, requerirán mayor señalización que los que se producen dentro de la misma RNC, lo que implica un mayor retardo y un aumento de la probabilidad de que el handover no se produzca en el momento preciso, lo que producirá una llamada caída.

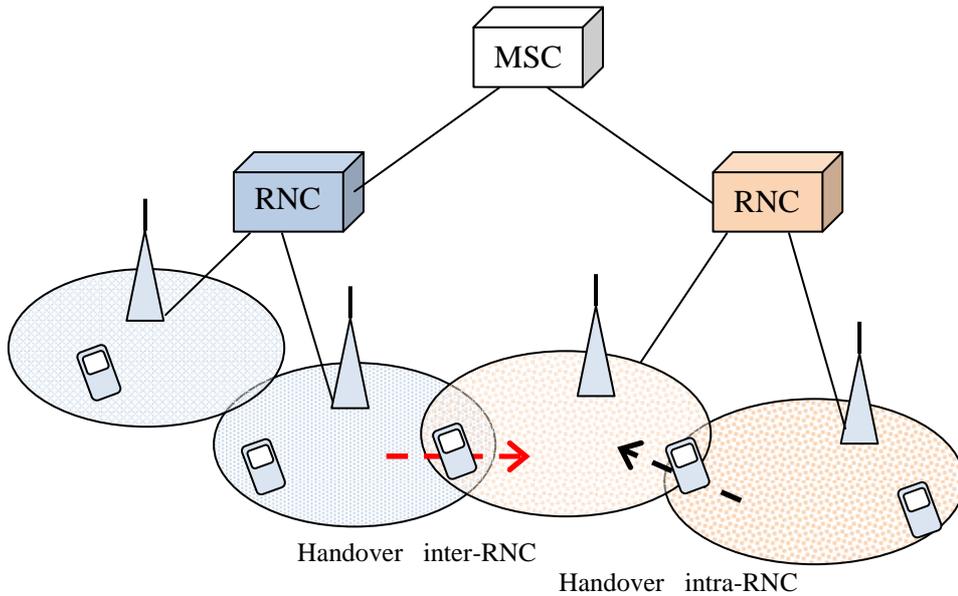


Figura V.4 Handover inter-RNC

En una red muy extensa con decenas de nodos, el problema consiste en asignar los nodos a las RNCs, de tal manera que se minimicen los handovers entre áreas y el tráfico de voz y datos esté equilibrado. Una solución a este problema se describe en [6]. También puede resolverse construyendo la siguiente función de coste:

$$C = \sum_{t=1}^{T_{\max}} (C_{\text{trasposos}}(AL_t) + C_{\text{sectores}}(AL_t) + C_{\text{tráfico}}(AL_t)) + C_{\text{numero_AL}}$$

donde

T_{\max} : es el número máximo de áreas de localización (llamadas AL_t). Las soluciones que superan este valor no se consideran.

$C_{\text{trasposos}}(AL_t)$: es el coste asociado a número de trasposos entre áreas diferentes para un AL_t , determinado.

$C_{\text{sectores}}(AL_t)$: es el coste asociado al número de sectores contenidos en el AL_t .

$C_{\text{tráfico}}(AL_t)$: es el coste asociado al tráfico del AL_t .

$C_{\text{numero_AL}}$: es el coste asociado al número de nodos.

La optimización se plantea como una búsqueda en el espacio de soluciones, considerando como tal el conjunto de todas las posibles particiones que pueden hacerse

sobre el total de los sectores del problema. Para realizar la búsqueda se parte de una solución inicial, sobre la que se aplican modificaciones para obtener otras soluciones intermedias, que pueden mejorar la solución de partida. Con el objeto de evitar los mínimos locales dentro del espacio de particiones se aceptan soluciones peores durante el proceso de búsqueda. Para decidir cuándo se permite una solución intermedia peor se utiliza el algoritmo simulated annealing, ampliamente utilizado en herramientas de planificación y optimización de redes móviles.

5.5 Modelos de movilidad de tráfico

Otra línea de gran interés es la evaluación de modelos de tráfico y movilidad que permitan optimizar los procesos de planificación de la red de acceso radio, para poder evaluar la capacidad y la calidad de servicio en un entorno concreto. Este trabajo de tesis está desarrollado en ensayos prácticos reales de la red de Telefónica, por lo que en este apartado tiene interés solo como referencia.

Los procesos de simulación para la estimación de la capacidad y cobertura efectiva de los sistemas celulares, pueden ser de dos tipos: estáticos y dinámicos. Los procesos de simulación estáticos utilizan la técnica de Monte Carlo, en la que se toma un número de imágenes del estado de la red estadísticamente significativo, que luego se procesan para estimar los parámetros de interés. La simulación dinámica es una simulación orientada a eventos, en la que se simula el comportamiento de los usuarios de la red en el tiempo, incluyendo sus movimientos y sus estados de actividad y reposo.

Los procesos de simulación estáticos son más simples de implementar y requieren de una menor capacidad de procesado que los dinámicos, pero presentan una serie de limitaciones, la principal de las cuales es que no permiten una estimación precisa de los parámetros que caracterizan la calidad del servicio ofrecido. Por ejemplo, la simulación estática permite calcular la probabilidad de que un usuario se encuentre en un estado de indisponibilidad (la causa pudiera ser que para mantener la conexión se requiere más potencia que la máxima que proporciona su terminal), pero no la probabilidad de que el servicio quede interrumpido (esto suele suceder cuando el estado de indisponibilidad se prolonga durante un determinado periodo de tiempo).

Los procesos de simulación dinámica permiten solventar estas limitaciones, pero precisan de una capacidad de procesado muy alta, así como poder disponer de modelos de tráfico y movilidad realistas. En [3] se proporciona mayor información sobre estos procesos y los modelos de movilidad.

5.6 Marco regulatorio para el despliegue de redes móviles

En la etapa de planificación de una red móvil se diseña un plan nominal en función de la densidad de población, características del entorno (urbanos, rurales, industriales, zonas comerciales, turísticas, etc.) y de los recursos estimados que demandarán los clientes, como el tráfico de voz y datos. Para este diseño se utilizan simuladores de cobertura y capacidad para determinar las ubicaciones óptimas de las estaciones base [7]. Pero en la etapa de prospección y arrendamiento de terrenos o

azoteas, o de compartición de infraestructuras ya existentes, que tienen por objeto la instalación de la estación base, no siempre se consigue la ubicación óptima sino otra que en muchos casos difiere en gran medida de la red ideal. Esta situación es muy habitual, dificultando la optimización y mejora de KPIs del servicio de telefonía móvil.

Uno de los factores que condiciona el despliegue y la configuración de la red es el marco regulatorio, que se ha ido desarrollando con cierto retardo respecto de la evolución e implantación de la tecnología en nuestra sociedad. Según el ámbito de las diferentes administraciones públicas, el marco regulatorio se distribuye según la siguiente clasificación. En el Anexo I se ofrecen más detalles para el caso de la Comunidad Autónoma Canaria.

- a) Títulos habilitantes
- b) Regulación estatal
- c) Regulación autonómica
- d) Regulación insular
- e) Regulación municipal

Bibliografía

- [1] David González G, *Design of Static Intercell Interference Coordination Schemes for Realistic LTE-based Cellular Networks.*: UPC Documento de Tesis, 2013.
- [2] Ramón Millán, "Qué es VoLTE," *BIT*, no. 190, pp. 65-68, Septiembre 2012.
- [3] Ignacio Berberana Fernández de Murias et al., "Técnicas de optimización multiobjetivo y modelos de movilidad para la planificación de redes celulares," *Comunicaciones de Telefónica I+D*, vol. 25, pp. 121-144, Marzo 2002.
- [4] A. OSYCZKA, *Multicriterion Optimization in Engineering.*: Ellis Horwood Limited, 1984.
- [5] DAVID. A. VAN VELDHUIZEN, "Multiobjective Evolutionary," *Evolutionary Computing, Massachusetts Institute of Technology*, no. 8, pp. 125-147, 2000.
- [6] L. F. Morán-Mirabal, J. L. González-Velarde, M. G. C. Resende, and R. M. A. Silva, "Randomized heuristics for handover minimization in mobility networks," *Springer*, no. DOI 10.1007/s10732-013-9223-0, pp. 845-880, 2013.
- [7] Jukka Lempiäinen and Matti Manninen, *UMTS Radio Network Planning, Optimization and QoS Management.* Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.

Capítulo VI

Técnicas SON:

Self Organizing & Self Optimizing Networks

La coexistencia de tres tecnologías (GSM-UMTS-LTE), que ofrecen servicio de forma simultánea a los abonados, en configuración multicapa (macro, micro, pico, femto), conlleva una mayor complejidad en las tareas de optimización manual, operación y mantenimiento de la red. La inversión que sería necesaria acometer para gestionar una red tan compleja, produciría un desacople entre los ingresos por tarificación del tráfico de voz según el modelo utilizado hace unos años, y los ingresos por el tráfico de datos cada vez mayor, en los que predomina la contratación de tarifas planas. Este modelo de negocio implica elevados costes de mantenimiento de las operadoras.

En este sentido, aparece el concepto SON, que es definido por varios autores como “Self Organizing Networks”, compuesto a su vez por tres etapas: “Self Configuration”, “Self Optimizing” y “Self Healing”. Básicamente, tiene como objetivo la automatización de arduas tareas en la configuración, puesta en servicio, y optimización de parámetros de red, así como la de responder adecuadamente a eventualidades, consiguiendo con todo ello una reducción en los costes de operación y una mejora sustancial de la calidad de la red.

El empleo de técnicas y herramientas para automatizar procesos de difícil resolución, tales como la planificación en la fase de despliegue, o la optimización una vez que la red está en servicio, ya se venía utilizando en redes GSM y UMTS, pero no disponían del nivel de automatización que se requiere para los escenarios actuales. El análisis y la resolución de problemas multiobjetivo de asignación de frecuencias o áreas de localización, ofrecía buenas soluciones a costa de necesitar días o semanas de recolección de datos y aplicación de las configuraciones propuestas.

En este sentido, se crearon varias iniciativas y foros de trabajo. El proyecto europeo MOMENTUN (Models and Simulations for Network Planning and Control of UMTS) [1] fue planteado con el objeto de desarrollar modelos de simulación y diseño de redes UMTS. Dentro del programa de investigación y desarrollo europeo Celtic, el proyecto Gandalf [2] exploró la posibilidad de automatizar las tareas de gestión comunes en las redes móviles (principalmente GSM, UMTS y WLAN). El proyecto MONOTAS [3] desarrolló técnicas y algoritmos que permiten a las redes móviles

adaptarse rápidamente a los incrementos de tráfico, mediante cambios de parámetros radio, para evitar situaciones de congestión.

Por ello, en base a la experiencia y fundamentos bien consolidados en las tecnologías anteriores, el 3GPP reconoce la importancia del desarrollo de técnicas SON para LTE y, como consecuencia, ha contribuido a su estandarización en las diferentes *releases* (fases en la evolución) de esta tecnología. Otras iniciativas investigadoras han apostado por las técnicas SON y han realizado grandes esfuerzos por llegar a un consenso en los objetivos que se persiguen con las mismas y a tipificar los casos de uso más importantes de dichas técnicas. Entre estas iniciativas encontramos NOMOR (Novel Mobile Radio research) [4] [5], la alianza NGMN (Next Generation Mobile Networks) [6] [7] y consorcios creados a partir de proyectos financiados por la Comisión Europea como SOCRATES [8] (Self-Optimisation and self-ConfigURATion in wirelESs networks) o SEMAFour [9].

La automatización de muchas de las tareas que se realizan en redes tan densificadas produce beneficios notables, ya que reduce la intervención humana, lo que supone también una reducción del OpEx (gastos de explotación). Además, el aumento de la eficiencia de la red, es decir, del trinomio cobertura-capacidad-calidad, reduce también el CapEx (gastos de capital), pues si una red está bien optimizada y configurada, se necesitan menos estaciones base. Según un análisis llevado a cabo durante 5 años en una red real del oeste de Europa [10], una red que utiliza algunas de las técnicas SON alcanza un ahorro del 34% en OpEx y un 21% en CapEx. Un ejemplo de la mejora obtenida con las técnicas SON es el caso en que por avería de un nodo (y su correspondiente pérdida de servicio), los nodos colindantes identifican rápidamente el hueco de cobertura dejado y ajustan sus parámetros radio, de handover y carga con el propósito de que la degradación del servicio sea la mínima posible

6.1 Introducción a las técnicas SON

El diseño de una red y la puesta en servicio de un nuevo nodo comienza habitualmente por un análisis de las necesidades de recursos radio de una zona, de una estimación de cobertura y de los efectos que tendrá en el resto de nodos que ya están en servicio. Esta etapa, utilizada desde los primeros años del GSM, no está considerada una técnica SON como tal, pero supone un comienzo de los primeros métodos de automatización de complejos cálculos de planificación de frecuencias y áreas de localización, de relaciones de colindancias y configuración del sistema radiante. El término *automático* hace referencia a la capacidad de los algoritmos de proponer soluciones óptimas, pero no a su aplicación en la red, que debía realizarse de forma manual mediante el OSS.

Sin embargo, las técnicas SON actuales tienen como objetivo la automatización real de diversas tareas, otorgando a los propios nodos de LTE la capacidad de configurarse y optimizarse por sí solos en función de unas condiciones de partida o eventos que son programados por el operador. En la siguiente Figura podemos ver las etapas que componen estas técnicas, cuya descripción es la siguiente.

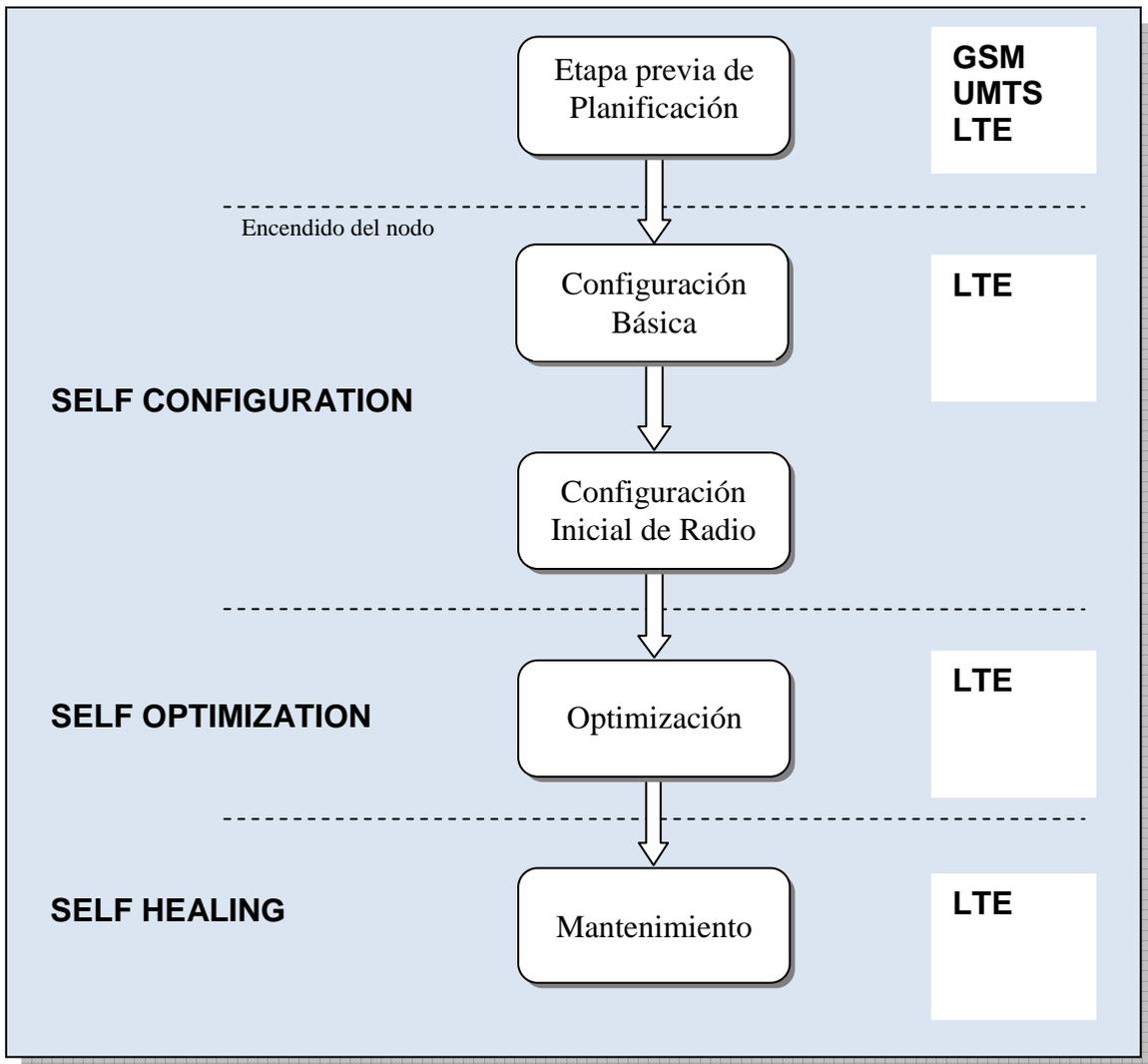


Figura VI. 1 Etapas de las técnicas SON

- Self Configuration:** es el proceso de incorporación automática de un nuevo nodo a la red, en el que se incluye la configuración de la red de transporte con la central, el envío del tipo de hardware instalado y la carga de una lista genérica de parámetros. Todo esto se realiza en una fase pre-operacional, antes de que el nodo esté activo y tiene como objetivo lograr un despliegue más rápido y eficiente, así como con un menor coste asociado.
- Self Optimization:** una vez que el nodo está en servicio con una configuración mínima, en este proceso comienza la recolección y análisis de las medidas que va recibiendo de los nodos colindantes y de los terminales que empiezan a engancharse y cursar tráfico en el nuevo elemento, así como de los KPIs de la red que está en servicio, y que son almacenados por el sistema de Operación y Supervisión de red (OSS). Este proceso ya es continuo durante toda la vida útil de la estación base, con el objeto de adaptarse constantemente a la evolución natural de la red. Tiene como finalidad la optimización de parámetros de handover, offsets, lista de células vecinas, balance de carga, etc.

- c) **Self Healing:** consiste en la detección y prevención de fallos en el hardware, en el software o fallos externos como falta de suministro eléctrico o conectividad de la red, y tiene como objetivo reducir la indisponibilidad de las células que dan servicio. Esta fase se llama *Cell Outage Compensation*.

Las funcionalidades SON pueden estar centralizadas en el OSS, distribuidas y localizadas en los Nodos, o en configuración híbrida en ambos subsistemas [11].

- *SON centralizado:* los algoritmos de optimización se ejecutan en el OSS. Tiene la ventaja de que su configuración es más sencilla pero los nodos pierden autonomía, lo que aporta complejidad a las labores de optimización (Figura VI.2)

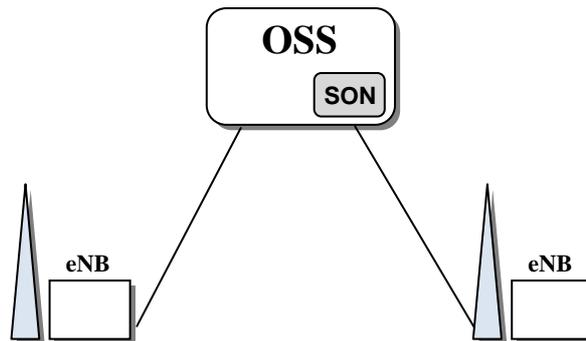


Figura VI. 2 SON centralizado

- *SON distribuido:* los algoritmos residen y se ejecutan en los propios nodos, lo que les da mucha autonomía y simplifica el sistema, pero se pierde control (Figura VI.3).

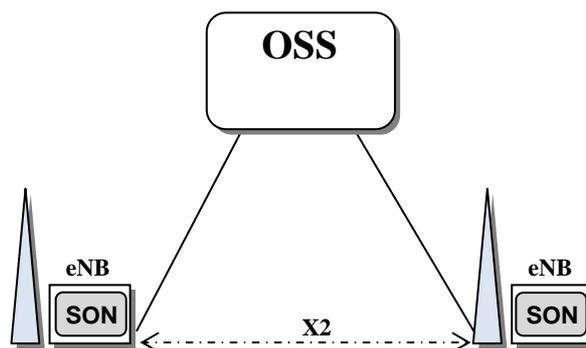


Figura VI. 3 SON distribuido

- *SON híbrido:* algunas funcionalidades están centralizadas en el OSS, y otras en los nodos. Los algoritmos simples y rápidos pueden estar localizadas mientras que las más complejas o que requieren un conocimiento mayor de un cluster se alojan en el OSS (Figura VI.4).

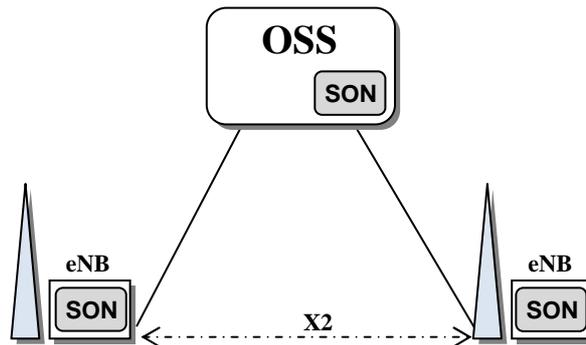


Figura VI. 4 SON híbrido

6.2 Casos de Uso definidos en SOCRATES

Las técnicas SON se componen de varios casos de uso, que corresponden con las tareas típicas que los optimizadores de calidad de red ejecutan manualmente, en el día a día, para obtener las mejores prestaciones en cada situación. Estos casos de uso están bien definidos, pero la manera de integrarlos y automatizarlos continúa aún en desarrollo. En la Figura VI.5 se muestra de forma genérica las categorías y subgrupos de los casos de uso más comunes definidos en SOCRATES [8].

PLANIFICACIÓN	IMPLANTACIÓN	OPTIMIZACIÓN	MANTENIMIENTO
Ubicación de nodos Configuración HW Parámetros de radio Integración en red Parámetros de transporte Relación de colindancias	Instalación HW Autenticación de red Instalación de SW Definición parám. de transporte Definición de parámetros de red Prueba del nodo	Optimización listas de colindancias Control de interferencias Parámetros de handover Optimización QoS Balance de cargas Optimización femtonodo Optimización RACH	Reposición o ampliación HW Actualización SW Monitorización de red Análisis y recupera. de fallos Compensación de células fuera de servicio Ahorro de energía

Figura VI. 5 Casos de uso de las técnicas SON

A continuación se describe los casos de uso más relevantes para este trabajo de tesis.

6.2.1 Automatic Neighbor Relation (ANR)

El diseño de un nuevo nodo en la red requiere una lista básica de colindancias que, una vez en servicio, será optimizada. Además debe permanecer en constante evolución para adaptarse a los cambios en su entorno, tales como la puesta en servicio de nuevos nodos, apagado o avería de otros, incrementos de tráfico y otras situaciones singulares. Los métodos manuales para el diseño de listas de colindancias están basados en estimaciones del alcance y solape con otras células, en cálculos geométricos como las regiones de Voronoy, o en análisis de medidas de las células del entorno. Cuando el nuevo nodo ya está en servicio, lo más habitual es utilizar medidas de campo que se analizan en entornos gráficos del tipo GIS, mediante el estudio de estadísticas de handovers intentados, completados y fallidos, o también utilizando traceos de llamadas y de células.

En las redes heterogéneas actuales, con múltiples sistemas y capas, este trabajo resulta muy complejo, por lo que las técnicas ANR adquieren gran importancia. Su objetivo principal es la definición automática de listas de colindancias basadas en las medidas tomadas por los UEs (User Equipment, o terminal del abonado) de las células vecinas que recibe, apoyado por ciertas configuraciones de partida. Además, deben ser capaces de adaptarse rápidamente a cambios inesperados en la red para atender desviaciones de la calidad o capacidad del servicio. En la Figura VI.6 se muestra un ejemplo. Sea eNB 1 el nodo servidor y eNB 2 un nuevo nodo que se ha puesto en servicio.

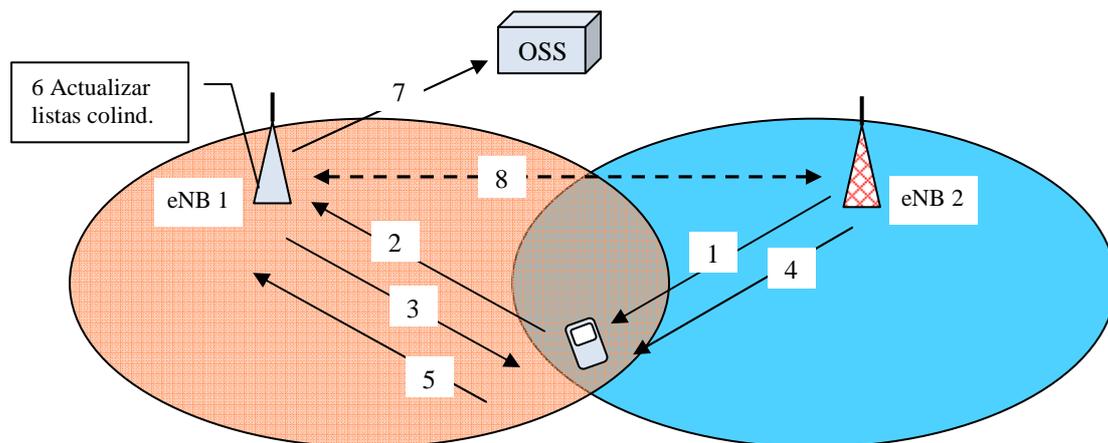


Figura VI. 6 Ejemplo de técnica ANR

El Global-CID es un identificador único de célula en todo el mundo. Se compone del MCC (identificador del país), más el MNC (identificador del operador), más el LAC (es el código de localización de área) y el CI (identificador de célula). La capa física de cada célula LTE está identificada por un código PCI (*Physical Cell Identity*) con la que los terminales pueden identificar unívocamente una señal de referencia específica, para sincronizarse a ella y comenzar la estimación de la intensidad y calidad de la señal recibida. Los códigos PCI son limitados por lo que en su reutilización se deberá evitar que un terminal pueda recibir dos células al mismo tiempo con el mismo código.

Un posible método para añadir a eNB 1 la colindancia eNB2 sería el siguiente:

- 1- El UE mide el PCI que radia el nodo eNB 2.
- 2- El UE envía la medida de la potencia de la señal y el PCI al nodo eNB 1.
- 3- El eNB 1 ordena al UE que mida el Global-CID.

- 4- El UE obtiene el Global-CID del canal de radiodifusión del nuevo nodo.
- 5- El UE informa de al eNB 1 del dato obtenido.
- 6- El nodo servidor eNB 1 actualiza su lista de colindancias y la remite al OSS.
- 7- El OSS remite al nodo eNB 1 la dirección IP de nuevo nodo eNB 2.
- 8- Si es necesario, eNB 1 establece una conexión X2 con eNB 2.

En la Figura VI.7 [5] se puede ver la arquitectura del ejemplo mostrado. El algoritmo ANR y la lista de colindancias están alojados en el eNB. Recibe la información de los UEs mediante las medidas RRC, y tiene comunicación con el OSS y con otros nodos a través del X2. La lista contiene dos partes. La parte izquierda contiene las colindancias medidas por los UEs, y la parte derecha los atributos de la relación de colindancias controlados por el OSS, que indica las colindancias que no se deben borrar, las que no son válidas para un handover, o las que no deben disponer de X2. Como se puede observar, la parte izquierda está en permanente comunicación con el entorno del nodo y se actualiza según nuevos eventos, mientras que la parte derecha contempla una serie de condiciones fijas controladas por el ingeniero optimizador a través del OSS.

El algoritmo ANR se divide en tres funciones: eliminación de colindancias, detección de nuevas colindancias y la actualización de la lista de colindancias que depende de las dos funciones anteriores, así como de las condiciones establecidas en el OSS.

Para añadir una nueva colindancia, se siguen los siguientes pasos:

- 0- La función de detección le da instrucciones al RRC (*Radio Resource Control*) para que los UEs comiencen a medir.
- 1- El RRC devuelve las medidas de los UEs.
- 2- La función de detección decide si conviene añadir una colindancia.
- 3- La función de actualización modifica la lista de colindancias.
- 4- Esta misma función, informa al OSS de la colindancia añadida.
- 5- El OSS consulta si debe actualizar la lista de atributos.

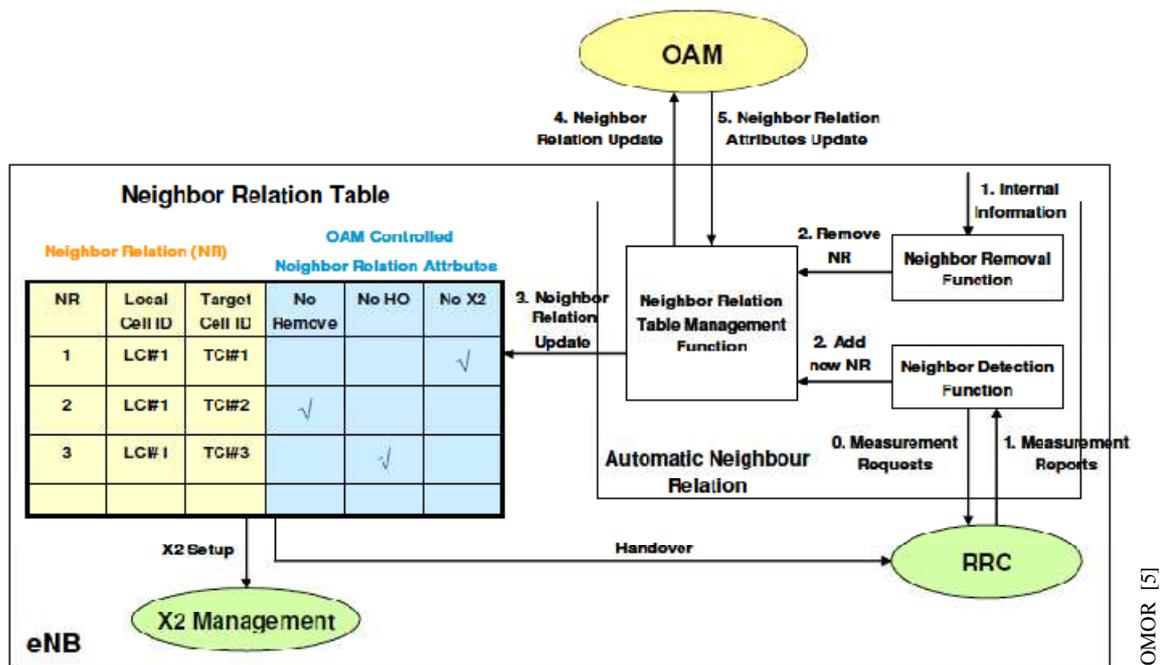


Figura VI. 7 Arquitectura del ANR

Para borrar una colindancia de la lista se utiliza un método similar. En este caso la información viene de un proceso interno de análisis de estadísticas de handover que determina cuándo una colindancia se puede borrar porque falla con frecuencia, se realiza muy pocas veces o porque el handover dejaría al terminal en un enlace radio de poca calidad.

6.2.2 Handover Parameter Optimisation

Los handovers que se realizan hacia las células contenidas en las listas de colindancias (establecidas por el ANR), se ejecutan principalmente en función del nivel de potencia de la célula servidora, de la potencia de la célula destino, y de unos determinados temporizadores. Las estrategias manuales de optimización de parámetros que se utilizan en la actualidad, se basan en la técnica de “prueba y error”. En la práctica, cada célula posee tasas de éxito y fallo de handover diferentes dependiendo del entorno y la distribución de usuario en la zona a la que dan servicio. Los algoritmos SON de Optimización de Parámetros de Handover tienen como objetivo seleccionar continuamente el valor más apropiado de dichos parámetros, para asegurar en todo momento el éxito del mayor número posible de trasposos, en función del estado variable de carga y tráfico de las células, y se basa en observaciones continuas del estado de la red.

En la Figura VI.8 [8] se muestra un esquema de los parámetros genéricos que utiliza el algoritmo para optimizar los handovers: los niveles de potencia medidos por el UE de la célula origen (*SeNB*) y destino (*TeNB*), la *Histéresis* y el *TTT* (*time to trigger*) o tiempo de disparo necesario para retrasar y afianzar la toma de decisión, evitando oscilaciones rápidas. El handover se produce si durante un tiempo *TTT*, el valor de potencia medida de la célula *TeNB* supera al nivel de *SeNB* más el valor de *Histeresis*.

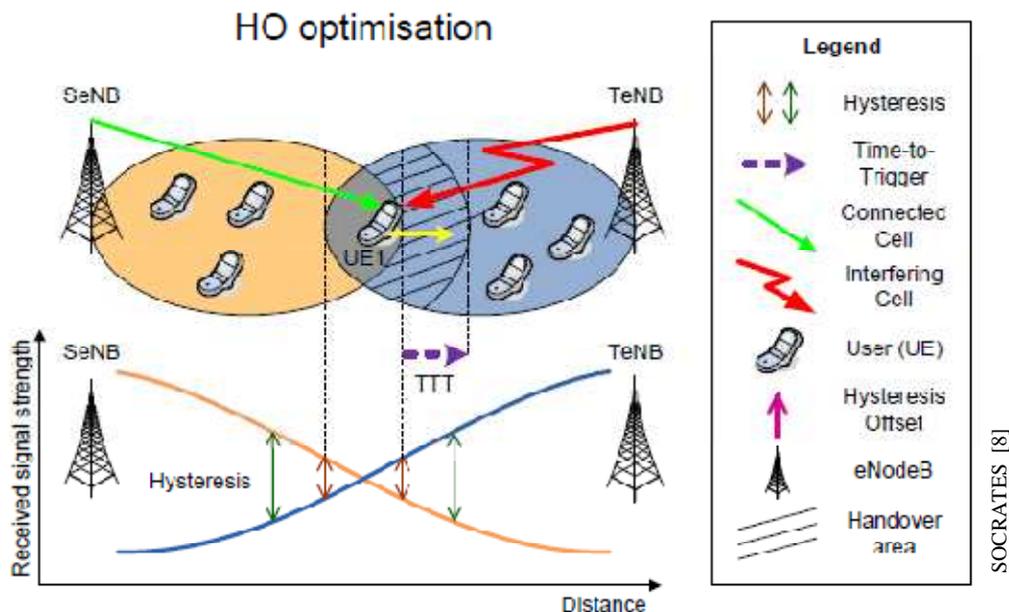


Figura VI. 8 Optimización de parámetros de HO

Cuando el nivel de señal recibida de una célula colindante empieza a ser mayor que el de su célula servidora, se dispara un evento para completar un handover. La histéresis le indicará al proceso cuánto debe superar en nivel la célula destino a la origen, y el *time to trigger* le indicará durante cuánto tiempo se debe de producir esta condición. El algoritmo SON deberá analizar el número de handover intentados, minimizar los que fallan, maximizar los que se completan, y evitar que un terminal intente volver a la célula original una vez se ha realizado el traspaso (*efecto ping-pong*). Además, deberá mantener lo más bajo posible el número total de handovers y órdenes de traspaso con el objeto de reducir la señalización en el interfaz radio, obteniendo así una mejora en la interferencia y consumos de potencia.

Un ejemplo real de optimización manual de estos parámetros se utilizó en un conocido restaurante de la isla de Tenerife que dispone de una microcélula para atender a sus clientes. Cerca de este restaurante se encuentra una autopista a la que llegaba sin dificultad la señal. Los terminales que tenían llamadas establecidas, al pasar cerca de esta zona, realizaban un handover a la microcélula. Debido a la velocidad del vehículo, el tiempo de permanencia en esta microcélula era tan pequeño, que al sistema no le daba tiempo de realizar un nuevo handover hacia la siguiente célula en la dirección en la que se movía el terminal. Esta situación generaba muchas llamadas caídas. La solución adoptada fue aumentar el *time to trigger* en un valor superior al tiempo en el que los vehículos permanecían en el área de influencia de la microcélula, de tal manera que nunca se engancharan a ella. Este valor se determinó tras realizar varias medidas de campo.

Esta situación singular corresponde con un trabajo manual de optimización, pero no resulta eficiente cuando se producen cambios repentinos e inesperados de incrementos de tráfico, congestión, averías, etc. En estos casos, la capacidad de las técnicas SON de responder rápidamente, aportarían grandes mejoras en la eficiencia y prestaciones de la red.

6.2.3 Load Balancing

La técnica Load Balancing es una funcionalidad que permite aliviar o distribuir la carga de una red en situaciones concretas de alto tráfico. Consiste en forzar traspasos de terminales que están consumiendo recursos en una célula que está saturada y no admite más usuarios, a otra célula colindante que es recibida por el UE con un nivel inferior de potencia (pero suficiente para dar continuidad a la llamada), con el objeto de permitir la entrada de nuevos usuarios en la célula origen.

En la Figura VI.9 se muestra una situación típica. En una célula determinada hay una petición de acceso de un móvil, pero esta célula no puede admitir más carga porque está congestionada, o bien ha sobrepasado cierto umbral. Entonces se pone en marcha un mecanismo para ver qué móvil podría hacer un traspaso a una célula vecina que tenga un nivel de señal aceptable y suficiente para poder mantener el enlace radio. Si esa célula tiene también congestión, es probable que no admita el traspaso, por lo que se seguirá la búsqueda de células colindantes candidatas.

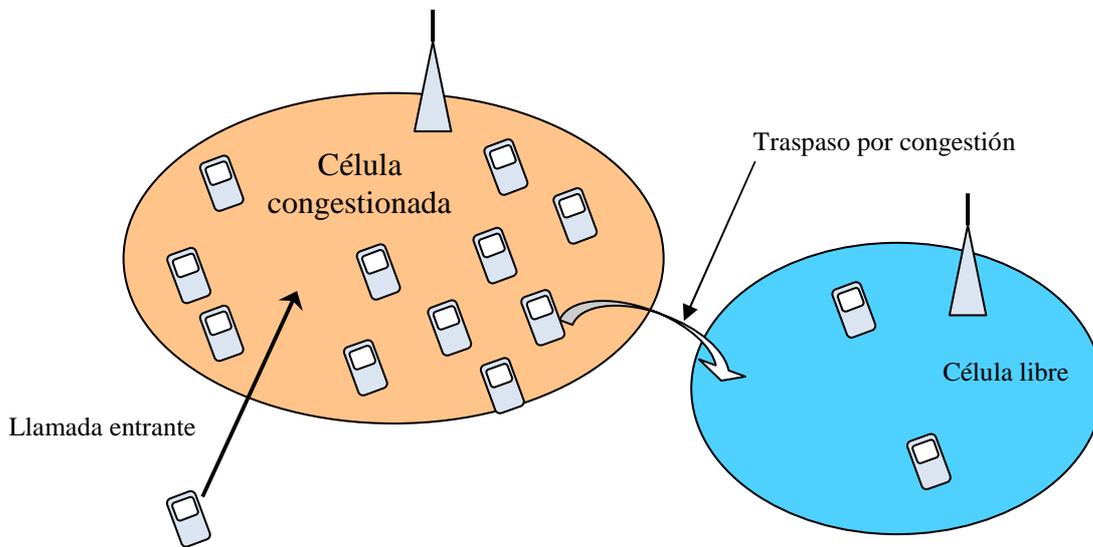
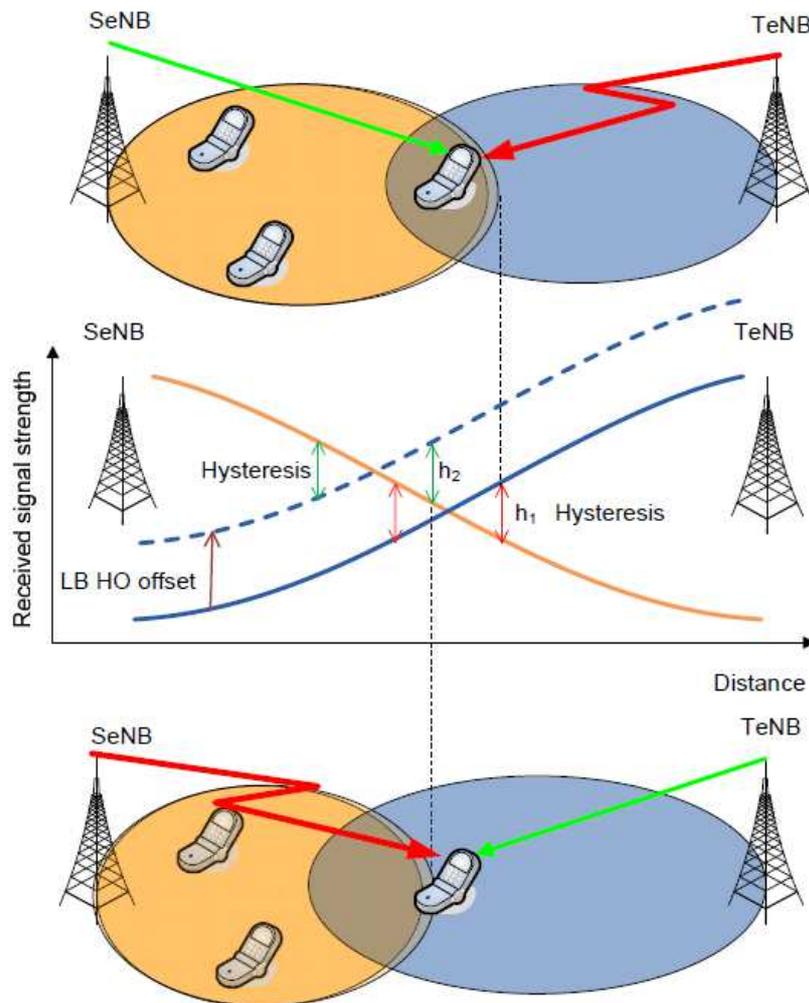


Figura VI. 9 Mecanismo de balanceo de carga

Cuando se realiza el traspaso por congestión, el móvil se encontrará en una célula con peor nivel, que ahora es su servidora, y tendrá como vecina otra célula con mejor nivel que es la célula origen, por lo que se intentará retornar a ella. Se produce por tanto una situación de *ping-pong*, que se evita mediante un mecanismo que falsea las medidas de la célula origen durante un tiempo.

Para forzar un traspaso por congestión cuando la situación lo requiere, se activa un offset configurable que falsea la medida tomada por el UE, de tal manera que la célula colindante (solapada con la servidora) incrementa virtualmente su valor de potencia recibida en un valor igual al offset. Como consecuencia, el algoritmo de decisión de handover visto en el apartado 5.2.2, se encuentra con una célula colindante con mayor potencia recibida, con lo que dispara un handover por nivel como si el terminal se estuviera desplazando hacia la célula vecina.

En la Figura VI.10 se muestra el procedimiento descrito. Un terminal que está en la célula servidora recibe la colindante con un valor de potencia inferior. Si se le añade un offset, se logra un efecto de “aumento virtual” de la potencia colindante y de su área de cobertura. Una vez realizado el traspaso, la histéresis desaparece, por lo que se puede disparar un handover para retornar a la célula origen (efecto ping-pong).



SOCRATES [8]

Figura VI. 10 Relación entre el balance de carga y el handover

La funcionalidad de trasposos por congestión tiene un inconveniente. El tráfico de una zona suele crecer en periodos determinados del día, afectando a varias células a la vez. En el momento en que se activa la funcionalidad Load Balancing, existirán muchos móviles que han sido redirigidos para dar paso a nuevas peticiones de acceso de otros usuarios, cursando llamadas en células con niveles de potencia más bajos de lo normal, es decir, con enlaces radio de peor calidad. Esto aumenta la probabilidad de que se caigan las llamadas por varias razones. Por un lado, los desvanecimientos de señal afectarán más a la continuidad de la llamada, pues no se tiene como servidora la mejor célula. Por otro lado, el control de potencia solicitará un aumento de la misma, generando más interferencia en la red. Además de todo esto, cuando expiren los temporizadores *anti ping-pong*, los móviles tratarán de volver a la mejor célula. Esta situación es un claro ejemplo de optimización de objetivos múltiples que se contradicen entre sí. En la Figura VI.11 se muestra el resultado de la aplicación de Load Balancing en un caso real, en el que se logró reducir el porcentaje de llamadas no completadas (son las llamadas que no se pueden establecer porque la célula está congestionada o muy interferida), frente a un pequeño incremento de las llamadas caídas.

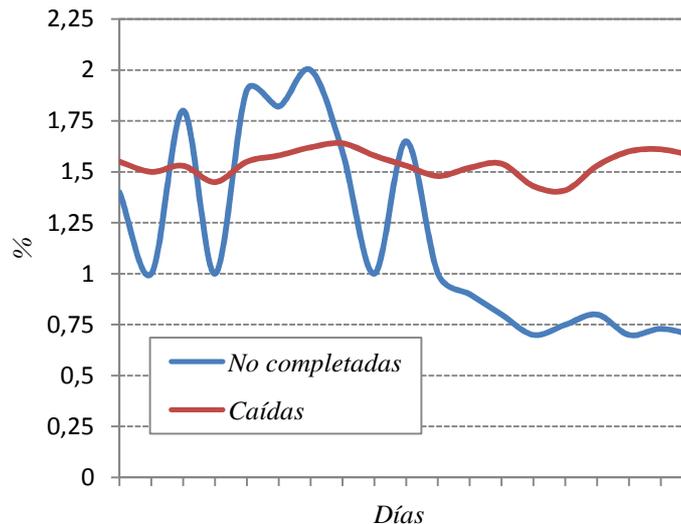


Figura VI. 11 Mejora de las llamadas no completadas por congestión en un caso real

De igual forma que sucede con la funcionalidad vista en el apartado 5.2.2 para Handover Parameter Optimization, este proceso, para ser eficiente, deja de ser manual y se automatiza como un caso de uso de técnicas SON.

6.2.4 Inter Cell Interference Coordination (ICIC)

La técnica de acceso OFDM empleada en LTE, que divide la señal en 1.201 subportadoras, permite confinar las interferencias a las subportadoras en las que se originan. Es decir, usuarios distintos que tienen como servidora dos células que se solapan, producirán interferencia mutua solo si ocupan el mismo bloque de subportadoras simultáneamente. Por consiguiente, es posible implementar un organizador (*scheduler*) que asigne recursos a los usuarios evitando las subportadoras en las que el nivel de interferencia sea inadecuado.

Uno de los métodos para solucionar o minimizar los efectos de este problema es emplear una técnica de asignación llamada *ICIC (Inter-Cell Interference Coordination)*. Esta técnica parte del supuesto de que los usuarios realmente afectados por la interferencia se encuentran en áreas de solape (normalmente en los bordes de células) o en situación de sobrealcance de varias células. La técnica *ICIC* propone dividir el espectro del que dispone la celda en bloques y reservar uno de ellos para uso exclusivo de los usuarios en el borde. Las celdas adyacentes ubicarán a sus usuarios de borde en bloques distintos por lo que se consigue evitar la interferencia entre usuarios geográficamente cercanos. En [12] se propone emplear un patrón de reutilización de 1 a 3 para los usuarios de borde mientras que los de centro tienen disponible el resto del espectro, siguiendo el reuso 1:1 habitual en LTE. La Figura VI.12 [13] ilustra esta distribución del espectro.

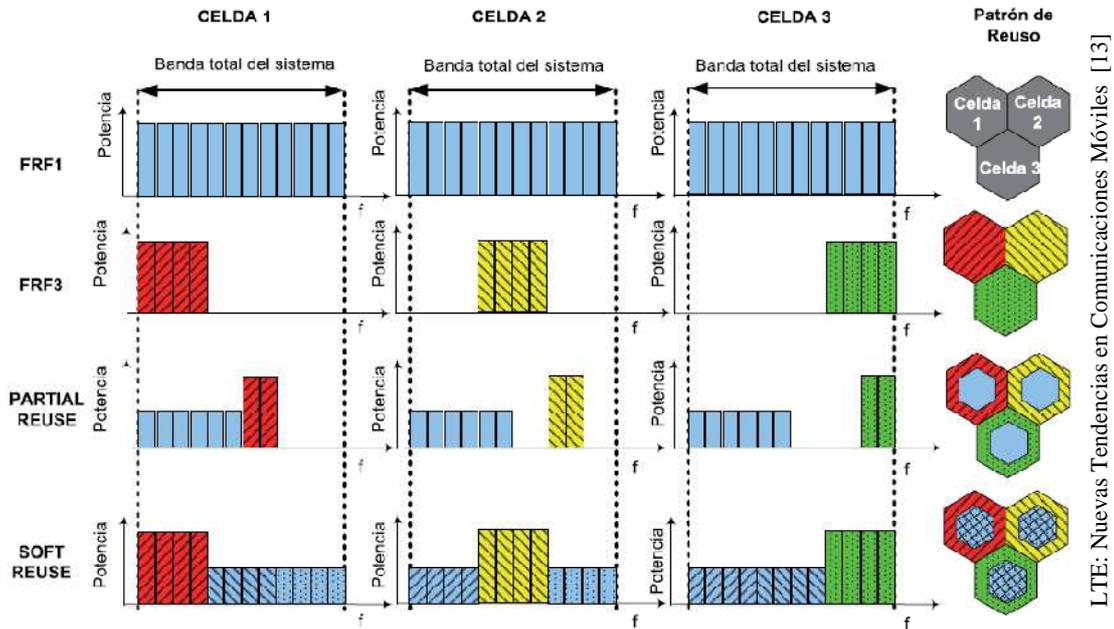


Figura VI. 12 Técnicas ICIC más comunes

En el reuso 1 (FRF1), los usuarios disponen de todas las subportadoras sin ningún tipo de control, por lo que la interferencia es elevada en los bordes de célula o áreas de solape. En el otro extremo está el reuso 3 (FRF3), donde las subportadoras se dividen en 3 grupos que se asignan a agrupaciones de 3 celdas. Este esquema es muy útil en situaciones donde interese reducir la interferencia intercelular, pero disminuye drásticamente la capacidad potencial por celda puesto que se desperdicia parte del espectro, y en algunos casos no se podría garantizar la calidad de servicio de las conexiones establecidas en términos de velocidad de pico y throughput obtenido por los usuarios. Como solución intermedia, se proponen [14] [15] un par de estrategias denominadas partial reuse (PR) y soft-frequency reuse (SR). Tal y como se observa en la Figura, estas estrategias combinan los esquemas FRF1 y FRF3 en la misma celda, de forma que el esquema FRF1 se usa para los usuarios cercanos al eNB y el FRF3 se deja para los usuarios en el borde de la celda o en áreas de solape y sobrealcance.

6.2.5 Cell Outage Management

El objetivo de esta funcionalidad es minimizar la degradación de la calidad, capacidad y cobertura de la red cuando una célula se ha quedado fuera de servicio por avería. Se compone de tres fases que se muestran en la Figura VI.13. *Detección*, que consiste en realizar una estimación de cuando una célula se puede quedar fuera de servicio en función de, por ejemplo, alarmas reiteradas de temperatura; o en la simple detección en sí, ante una avería o apagado inesperado. *Mapeado*, que consiste en un análisis de la nueva configuración de red, basado en simulaciones de cobertura y traceos de los terminales, con el objeto de suministrar información a los algoritmos de compensación para mejorar su respuesta. *Compensación*, que resulta de la aplicación de una nueva configuración de listas de colindancias, parámetros de handover o carga de las células colindantes, con el propósito de tratar de cubrir el hueco generado.

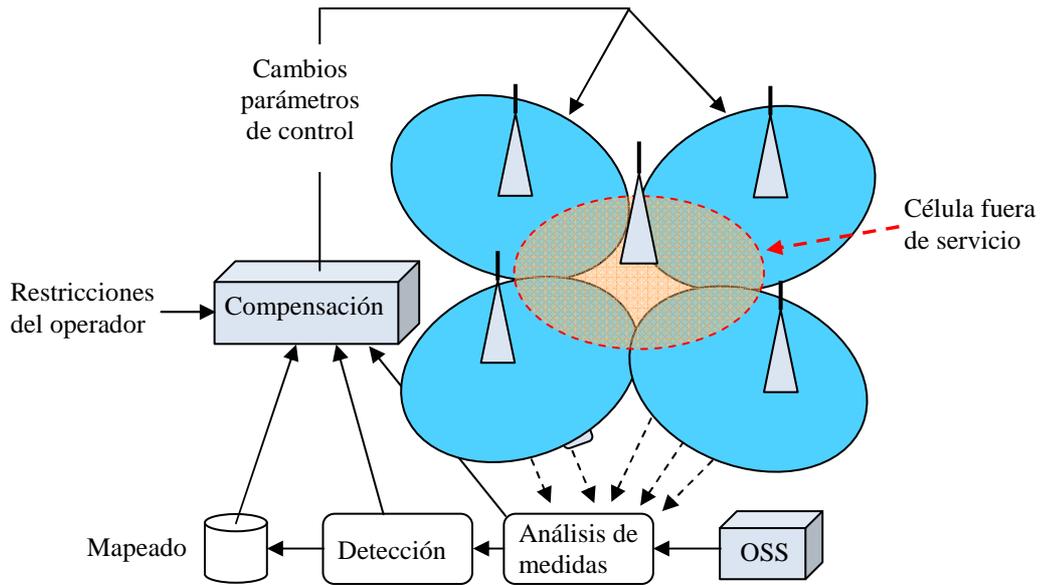


Figura VI. 13 Gestión de células fuera de servicio

6.3 Casos de Uso definidos en SEMAFOUR

Las redes móviles futuras estarán constituidas por varias tecnologías de acceso inalámbricas jerarquizadas en varias capas, como se muestra en la Figura VI.14. Estos ecosistemas deberán proporcionar acceso inalámbrico de banda ancha con una alta fiabilidad, eficiencia y ubicuidad a una amplia variedad de aplicaciones multimedia avanzadas. La introducción de las tecnologías más modernas como el LTE, que conviven actualmente con el GSM del que no se tiene previsto aún su apagado, conforman un escenario multi-RAT (Radio Access Technology).

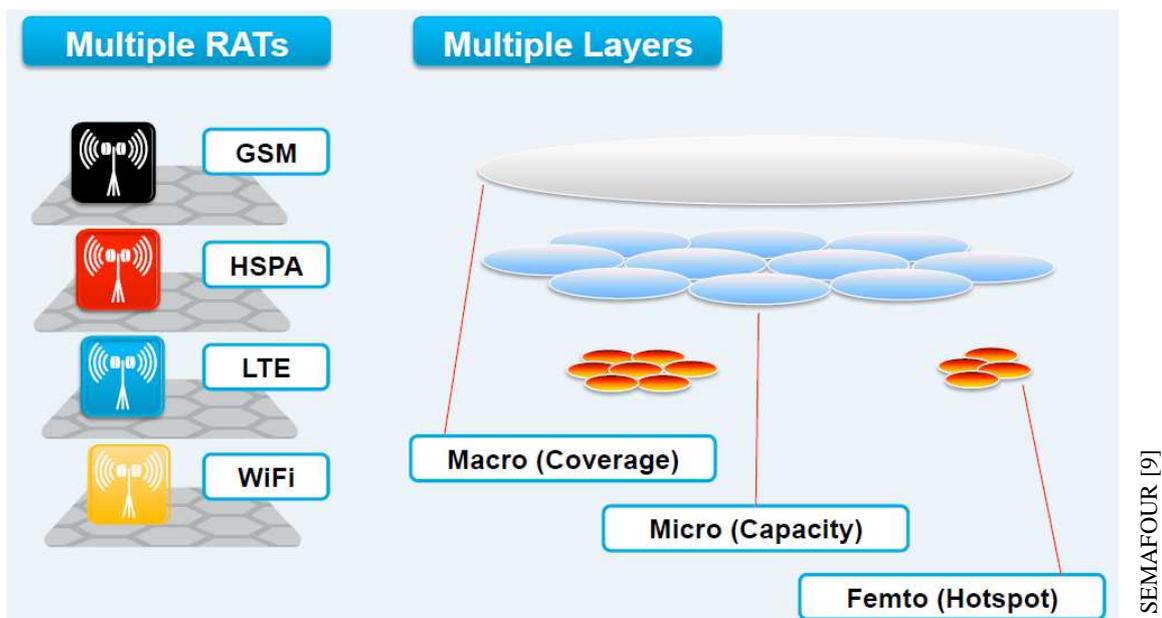


Figura VI. 14. Escenario multi-RAT y multi capa

SEMAFOUR [9]

En el apartado 6.2 se ha descrito los diferentes Casos de Uso desarrollados en SOCRATES para automatizar determinadas tareas específicas y aisladas de optimización. Sin embargo, SEMAFOUR [9] tiene por objetivo definir un sistema unificado para controlar un entorno inalámbrico multi-RAT como si fuera una sola red, con el que se conseguirá mejorar la gestión y la reducción de los costes de operación, optimización y mantenimiento de las redes. Con estas nuevas técnicas SON se podrá aportar soluciones a las nuevas funcionalidades y requisitos descritos en el reciente *Release 12* del 3GPP. En los siguientes apartados se detalla los casos más interesantes para este trabajo de Tesis [16].

6.3.1 Usuarios con alta movilidad

SEMAFOUR describe las situaciones de alta movilidad en aquellos escenarios con una densidad elevada de células y con usuarios que se mueven a gran velocidad. Tal puede ser el caso de una ciudad con vías rápidas cercanas. Esto produce muchos handovers en poco tiempo con impacto directo en:

- reducción del QoS debido a las múltiples reselecciones de célula durante una transmisión de datos,
- aumento de las llamadas caídas,
- incremento de la señalización y de la sobrecarga de los procesadores de los nodos

La solución que se propone consiste en analizar el movimiento de los usuarios y en buscar patrones que determinen su comportamiento, con el objeto de asignar las células y los handovers en función de la trayectoria estimada. Con este método se podrá eliminar handovers innecesarios o poco útiles, dedicar la capa microcelular a los terminales lentos, y la capa macrocelular a los terminales rápidos.

Desde los primeros sistemas 2G utilizados en los años 90, ya existía la posibilidad de configurar las colindancias y sus parámetros para crear capas de células que atendían a usuarios con diferentes comportamientos. Pero este trabajo se realizaba manualmente mediante análisis de estadísticas, traceos de células y medidas de campo. Con la funcionalidad descrita se pretende automatizar esta compleja tarea.

6.3.2 Selección de red LTE/WiFi

El 3GPP define en el estándar LTE la capacidad de hacer handover hacia un punto de conexión WiFi durante una sesión de datos, según cuatro niveles que se clasifican por la manera de realizar el cambio de una red a otra, siendo el cuarto nivel totalmente transparente al usuario. Esto permite al operador descargar las células LTE de algunos usuarios, mejorando así la capacidad total del sistema.

El objetivo de esta funcionalidad SON es la selección de la mejor red LTE o WiFi en usuarios urbanos densos para mejorar la experiencia del usuario.

6.3.3 Sistema de reconfiguración activa de antenas

Esta funcionalidad consiste en la sectorización activa de la antena para atender la demanda de tráfico en cada momento, utilizando conjuntamente el downtilt mecánico con el downtilt eléctrico que se puede variar de forma controlada para crear dos zonas

diferenciadas, como se muestra en la Figura VI.15. Las ventajas es que se puede hacer un reuso espacial de los recursos y se puede dedicar una parte del haz principal a una zona con alta demanda de tráfico. La desventaja es que la potencia debe ser repartida entre ambas zonas.

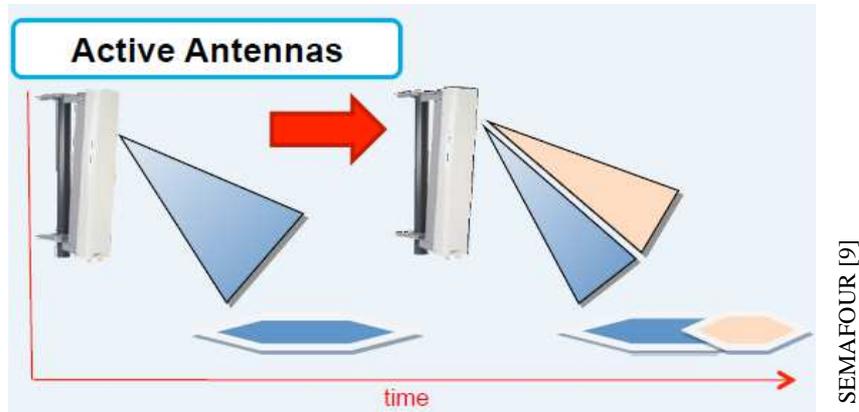


Figura VI. 155. Configuración activa de antenas

6.4 Soluciones propuestas

En este apartado se muestran las diferentes soluciones y métodos propuestos por varios autores para los casos de uso especificados.

6.4.1 Etapa previa de planificación

Para la etapa previa de planificación se han desarrollado numerosos trabajos desde los primeros diseños de redes UMTS, que constituyen una base para extrapolar las conclusiones a las actuales redes LTE. Para ello utilizan métodos heurísticos basados en la construcción de una función en la que intervienen todos los emplazamientos y usuarios de una red o de un *cluster*. Concretamente, esta función depende de la potencia de transmisión de cada móvil o estación base tratados como ruido para el elemento bajo estudio, de los factores de ortogonalidad, de las pérdidas de propagación y de los factores de actividad.

En otros trabajos se construye un algoritmo iterativo en el que, en cada paso, se realizan cambios de parámetros conforme a unas reglas determinadas, y se evalúa el resultado comparando el factor de calidad obtenido.

También se utiliza el algoritmo genético que transforma un conjunto de objetos matemáticos individuales con respecto al tiempo, usando operaciones modeladas de acuerdo al principio Darwiniano de reproducción y supervivencia del más apto, y tras haberse presentado de forma natural una serie de operaciones genéticas, de entre las que destaca la recombinación sexual. Cada uno de estos objetos matemáticos suele ser una cadena de caracteres (letras o números) de longitud fija que se ajusta al modelo de las cadenas de cromosomas, y se les asocia con una cierta función matemática que refleja su aptitud. En este caso, se considera n objetivos, f_i , ($i=1, \dots, n$), siendo cada uno una

función de varios parámetros dados por el vector \mathbf{x} . El problema de optimización multiobjetivo consiste en la minimización de la siguiente ecuación:

$$y = f(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X))$$

siendo

$$\begin{cases} x = (x_1, x_2, \dots, x_m) \in X \\ y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in Y \end{cases}$$

En este caso, los objetivos son dos ($n=2$): cobertura y capacidad. El vector x son los parámetros a optimizar: parámetros de antena y potencia del CPICH. El conjunto de soluciones óptimas son aquellas en las que la mejora en una dimensión no supone degradación en la otra dimensión. Esto se conoce como soluciones óptimas Pareto.

Gran parte de los trabajos y herramientas disponibles comercialmente, utilizan el algoritmo Simulated Annealing, que es un proceso iterativo en el que se producen pequeños cambios en cada paso, como por ejemplo añadir un emplazamiento, cambiar la potencia de emisión o mover un emplazamiento. El resultado de cada paso es evaluado y puede ser aceptado o rechazado según determinados criterios. El algoritmo utiliza mecanismos probabilísticos para converger a soluciones que pueden ser localmente óptimas. Los métodos propuestos están orientados más a la planificación que a la optimización, y consiste en la selección de un conjunto de emplazamientos de una lista de candidatos posibles, con el objeto de alcanzar los objetivos de calidad de red. Los usos más habituales son: dimensionado de áreas de Localización y de RNC, planificación de frecuencias, configuración de la potencia del CPICH y la orientación e inclinación de antenas.

Las referencias encontradas pertenecen a dos grupos bien diferenciados: planificación y optimización, y se muestran en la siguiente tabla.

Referencia	Tipo
[58] [43] [81] [75]	Planificación
[54] [97] [59] [72] [56]	
[96] [79] [50]	Optimización
[98] [64] [56] [83]	

6.4.2 Desarrollo de técnicas SON

En la literatura científica se encuentran varios trabajos que describen las técnicas *SON* y sus beneficios. Algunos de estos realizan una descripción matemática y modelos de los principales problemas de optimización, basados en parámetros de antenas y en modificaciones adaptativas de parámetros de red en tiempo real. Otros autores han desarrollado trabajos de investigación más específicos sobre uno de los casos de uso contemplados en el apartado 6.2. Para creación de listas de colindancias (*NL:Neighbor List*) se proponen métodos de adaptación rápida en función de las medidas enviadas por los UEs.

Para la optimización de handovers (**HO: Handover Optimization**) se utilizan métodos para relacionar los KPIs (handovers fallidos, llamadas caídas y ping-pong) con las medidas RRM, con el objeto de obtener un modelo de respuesta entre el valor de los parámetros y el efecto que produce. Otros trabajos evitan el ping-pong entre células una vez realizado el handover, y se basan en las velocidades a las que se mueven los UEs. También se han desarrollado métodos para reducir la señalización que generan los handovers, así como su relación con la carga de las células, puesto que Capacidad y Cobertura por lo general son objetivos opuestos.

En el caso de la optimización y balance de carga (**LB: Load Balancing**), hay estudios basados en medidas de carga a través de los UEs que utiliza estimaciones de SINR después de haber hecho un handover. Otro estudio propone un algoritmo para mejorar la capacidad de la célula, utilizando la formación del haz mediante el procesado en array de las antenas. Para ello, modela las áreas de cobertura para dar servicio a más o menos clientes en función de su localización.

Algunas publicaciones ofrecen métodos de optimización conjunta de **HO-LB**. Tal es el caso del método para coordinar ambos objetivos y que no se interfieran entre sí. Consiste en combinar los parámetros de ambas técnicas en una sola función de optimización. Otro trabajo propone ofrecer cobertura y capacidad mediante la instalación de microcélulas. Su potencia se ajusta para causar la mínima interferencia mutua mediante el modelado de una función para distribuir los PRBs entre las macrocélulas y microcélulas, de tal manera que la interferencia sea la mínima y el throughput el máximo.

Para definir automáticamente las relaciones de colindancias (**ANR: Automatic Neighbor Relation**) se parte de una configuración inicial que se va modificando en función de los KPIs de handovers, almacenando en una lista los que han resultado fallidos para ayudar al algoritmo a encontrar la configuración óptima en el menor tiempo posible.

Debido a que la interferencia es un elemento que limita claramente el rendimiento de las redes móviles, existe un considerable volumen de trabajos relacionados con la interferencia intercelular (**ICIC: Inter Cell Interference Coordination**) como puede ser la Tesis Doctoral basa en métodos meta-heurísticos [17]. Destaca también un algoritmo que gestiona la asignación de recursos a los usuarios en el borde de la célula, adaptándose a las condiciones de tráfico y de interferencia inter-celular [12]. La estrategia seguida por este algoritmo consiste en ajustar el comportamiento del *scheduler* del enlace ascendente, contemplando la ubicación de los usuarios, la prioridad de los datos a transmitir por cada uno y la información de señalización de interferencias intercambiada entre la celda y sus vecinas. Otro método singular propone la coordinación entre todas las células de la potencia que emiten, basado en máscaras de subportadoras. Utiliza un sistema de lógica difusa para la interpretación constante de las medidas de interferencia, y adaptación a los cambios de estado. Algunos trabajos ofrecen métodos para la optimización de **Femtonodos**, o relacionados con el ahorro energético (**ES: Energy Saving**) y Self Healing.

Las referencias encontradas se muestran en la siguiente tabla, agrupadas por los casos de uso comentados.

Referencia	Tipo
[62] [42] [90] [84] [11] [68] [49] [78] [91] [63] [82] [41]	Técnicas SON
[55] [77] [85]	Neighborg List
[93] [47] [45] [51] [86] [73] [76] [69] [95] [52] [40] [44]	Handover Optimization
[74] [39] [53] [67] [80]	Load Balancing
[65] [57] [60]	Load Balancing & Handover Optimization
[70] [71] [99] [77] [85]	Automatic Neighbor Relation
[12] [38] [46] [88] [17]	Inter Cell Interference Coordination
[92] [48] [89]	Femtonodos
[94] [61] [87]	Energy Saving
[66]	Self Healing

6.4.3 Otras técnicas de reducción de interferencias

Los canales radio se ven perturbados por el ruido térmico de los componentes electrónicos y de las antenas, así como de otras fuentes de radiación. Este tipo de interferencias se modelan como Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (RBGA). Pero en los sistemas móviles, las limitaciones de capacidad tienen realmente su origen en las interferencias inter-celulares. Tradicionalmente se ha tratado la interferencia como si fuera ruido térmico, lo que puede resultar adecuado cuando el nivel de aquella es relativamente bajo respecto del nivel de la señal útil. Pero cuando ambos niveles son similares, se necesitan procedimientos más complejos, que también permitan implementar medios para poder estimar el canal interferente. Además del método ICIC comentado, las técnicas para la reducción de interferencias se muestran en la Figura VI.16 [17] [18]:

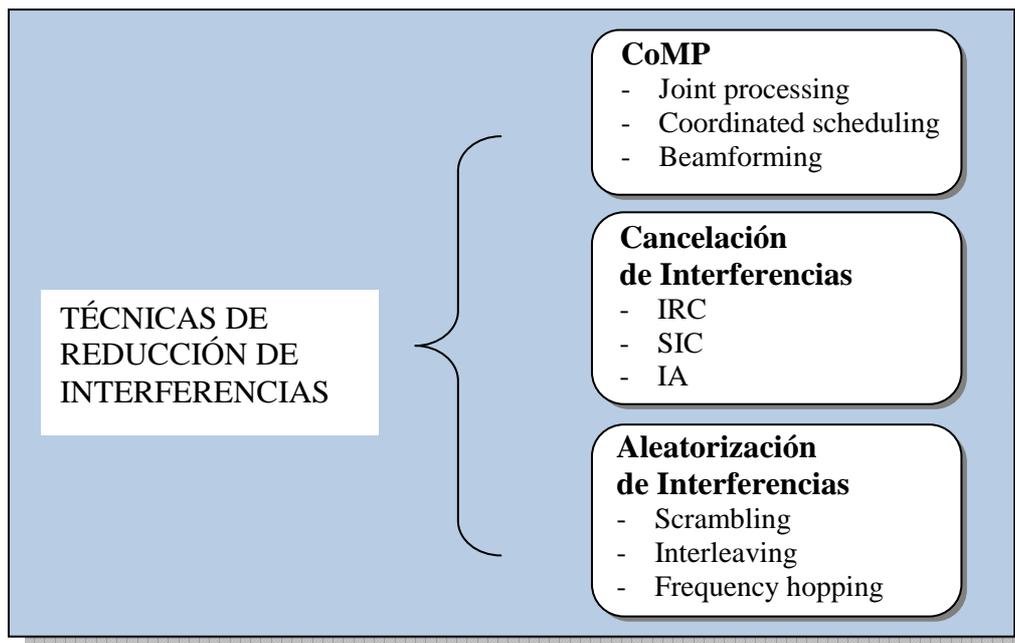


Figura VI. 166 Técnicas de reducción de interferencias

Transmisión y recepción multipunto cooperativas (CoMP)

Es una técnica de asignación de recursos coordinados entre varias estaciones base. Según [19], para el downlink se clasifican de la siguiente manera:

- a) *Joint Processing*: los datos de los usuarios se encuentran en cada estación base. Esta técnica consiste en la transmisión de los datos de un usuario por múltiples puntos.
- b) *Coordinated Scheduling/Beamforming*: este tipo de técnicas se componen de algoritmos de asignación de recursos donde los datos se encuentran únicamente en la célula servidora, pero las decisiones para realizar el scheduling y beamforming se realiza coordinando varias estaciones.

Cancelación de Interferencias

Es un tipo de técnica de decisión multiusuario en la que se demodula y descodifica la información deseada, que después se utiliza junto con estimaciones del canal para cancelar la interferencia de la señal recibida, mediante su procesamiento tras la detección. El concepto básico es regenerar las señales de interferencia y, posteriormente, restársela a la señal recibida [20]. Se trata de eliminar la interferencia en vez de evitarla, y consta de cuatro tipos:

- a) *Detection and subtraction*: la interferencia se puede eliminar mediante el modelado de los símbolos interferidos. Las señales estimadas que resultan se restan de las señales recibidas [21]. Para que esta técnica sea posible en el receptor, los transmisores deben estar sincronizados.
- b) *Spatial suppression*: en este caso se requiere el uso de múltiples antenas, y no requiere que los transmisores estén sincronizados. Los receptores que utilizan esta técnica se llaman Interference Rejection Combining (**IRC**) [22]. El concepto fundamental es la utilización de la correlación que existe (entre antenas) de las señales de interferencia. En [23] se muestra la ganancia obtenida con esta técnica.
- c) *Successive Interference Cancellation (SIC)*: este método detecta, por cada etapa, la señal más fuerte de un usuario, y posteriormente la segunda señal más fuerte, y así sucesivamente, con el objeto de obtener una estimación de canal que luego es utilizada en la reconstrucción de la señal original en recepción. En [24] [25] se muestra una evaluación de estas técnicas, y en [26] [27] los resultados de unas pruebas realizadas.
- d) *Interference Alignment (IA)*: consiste en la coordinación de múltiples transmisores para que su interferencia mutua se alinee en los receptores, lo que facilita la cancelación de la interferencia. Esta técnica puede ser considerada como una estrategia de gestión de la interferencia. En [28] se muestra el incremento de capacidad que se puede conseguir con este método. En [29] [30] [31] se describen las posibilidades que ofrece **IA**.

Aleatorización de Interferencias

Estas técnicas consisten en la aleatorización las señales de que emiten las Estaciones Base, que producen interferencia en los receptores, y se consigue mediante el uso de una codificación, la aplicación de códigos pseudo-aleatorios, o por medio de saltos de frecuencia. En las primeras redes GSM se empezó a utilizar el frequency hopping en dos modalidades (portadoras que cambiaban de frecuencia, o portadoras en banda base donde era el usuario el que saltaba entre ellas). La asignación al azar hace que se uniformicen las interferencias, de tal manera que exista un reparto equitativo de dicha

interferencia que beneficia a los usuarios más desfavorecidos que se encuentran en el borde de las células. En las redes saturadas se obtienen buenos resultados [32]. Otras referencias a este método se muestra en [33] [34] [35] [36] [37].

Bibliografía

- [1] Andreas Eisenblätter et al., "Final Report on Automatic Planning and Optimisation," *MOMENTUM*, no. IST-2000-28088, pp. 68-89, Apr 2003.
- [2] www.celtic-initiative.org.
- [3] www.macltd.com/monotas.
- [4] www.nomor.de.
- [5] Sujuan Feng and Eiko Seidel, "Self-Organizing Networks (SON) in 3GPP Long Term Evolution," *NOMOR*, p. 15, May 2008.
- [6] www.ngmn.org.
- [7] Frank Lehser, "NGMN Use Cases related to Self Organising Network, Overall Description," *NGMN*, no. 2.02, p. 18, December 2008.
- [8] Thomas Kürner et al., "Final Report on Self-Organisation and its Implications in Wireless," *INFSO-ICT-216284 SOCRATES*, no. D5.9, p. 135, Jan 2010.
- [9] <http://www.fp7-semafour.eu/>.
- [10] L. Gabriel et al., "Economic benefits of SON features in LTE networks," *IEEE*, vol. Sarnoff Symposium, no. 2011 34th IEEE, May 2011.
- [11] Kovalenko A.I., Shelkovnikov B. N., and Zhukov R.V., "The Architecture of the self-organizing Long Term Evolution Networks," *TCSET'2010, IEEE*, p. 216, February 2010.
- [12] B. Solana and O. Moreno, "Evaluation of an Interference-Coordination Algorithm Based on Self-Organizing Techniques on a Real LTE Deployment Scenario," *Latin America Transactions, IEEE*, vol. 8, no. 2, pp. 180-183, April 2010.
- [13] Ramón Agusti et al., *LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*, Fundación Vodafone España, Ed. Madrid, 2010.
- [14] O. Ben Haddada, B. Fourestie S-E. Elayoubi, "Performance Evaluation of frequency," *IEEE Trans. Wireless Commun*, vol. 7(5), pp. 1623-1633, 2008.
- [15] A. Simonsson, "Frequency reuse and intercell interference coordination in E-UTRA," *IEEE VTC Spring*, pp. 3091–3095, 2007.
- [16] Daniela Laselva et al., "SON functions for multi-layer LTE and multi-RAT networks," *SEMAFOUR*, vol. INFSO-ICT-316384 SEMAFOUR, p. 141, Noviembre 2013.
- [17] David González G, *Design of Static Intercell Interference Coordination Schemes for Realistic LTE-based Cellular Networks.*: UPC Documento de Tesis, 2013.
- [18] Telefónica I+D, "Perpectivas de evolución de los sistemas radio," *Comunicaciones de Telefónica I+D*, no. 38, pp. 21-42, Abril 2006.
- [19] "Further Advancements for E-UTRA Physical Layer," *3GPP Technical Report*, no. TR 36.814 (Release 9), www.3gpp.org.
- [20] G. Boudreau et al., "Interference Coordination and Cancellation for 4G Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 4, pp. 74-81, April 2009.
- [21] M.-X. Chang and Y.-T. Su, "Blind and Semiblind Detections of OFDM Signals in Fading Channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, no. 5, pp. 744-754, May 2004.
- [22] Y. Léost, M. Abdi, R. Richter, and M. Jeschke, "Interference Rejection Combining in LTE Networks," *Bell Labs Technical Journal*, vol. 17, no. 1, pp. 25-49, June

- 2012.
- [23] N.-D. Dao, J. Soler-Garrido, R. Cepeda, Y. Sun, and W. H. Chin, "Design and Evaluation of Antenna Selection Methods for Interference Rejection Combining," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 8, pp. 2751-2759, August 2012.
- [24] J. Axnas, Y.-P. Wang, M. Kamuf, and N. Andgart, "Successive Interference Cancellation Techniques for LTE Downlink," *Proc. of IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2011), Toronto (Canada)*, September 2011.
- [25] Z. Bai et al., "On MIMO with Successive Interference Cancellation Applied to UTRA LTE," *Proc. of 3rd International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP 2008), St. Julians (Malta)*, March 2008.
- [26] L. Dong, Z. Song, L. Wenxin, and W. Wenbo, "A Frequency Reuse Partitioning Scheme with Successive Interference Cancellation for OFDMA Uplink Transmission," *Proc. of IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2009), Tokyo (Japan)*, September 2009.
- [27] R. Ghaffar and R. Knopp, "Fractional Frequency Reuse and Interference Suppression for OFDMA Networks," *Proc. of 8th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOPT 2010), Avignon (France)*, May - June 2010.
- [28] V. Cadambe and S. Jafar, "Interference Alignment and Degrees of Freedom of the K-User Interference Channel," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 54, no. 8, pp. 3425-3441, August 2008.
- [29] J. Reitterer and M. Rupp, "Interference Alignment in UMTS Long Term Evolution," *Proc. of European Conference on Signal Processing (EUSIPCO 2011); Barcelona (Spain)*, August-September 2011.
- [30] M. Maso, M. Debbah, and L. Vangelista, "A Distributed Approach to Interference Alignment in OFDM-Based Two-Tiered Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 5, pp. 1935-1949, June 2013.
- [31] C. Zhou, W. Chen, and Z. Chen, "Combination of Interference Alignment and Beamforming in Cellular Networks," *Proc. of 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM 2011), Harbin (China)*, August 2011.
- [32] R. Bosisio and U. Spagnolini, "Interference Coordination vs. Interference Randomization in Multicell 3GPP LTE System," *Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2008), Las Vegas (United States)*, March-April 2008.
- [33] D. Khan and B. Priyanto, "Performance Evaluation of Frequency Hopping Schemes in UTRA-ITE Uplink," *Proc. of IEEE Annual IEEE Conference 2008, Aalborg (Denmark)*, February 2008.
- [34] I. Kim, Y. Han, Y. Kim, and S. C. Bang, "Sequence Hopping Cell Search Scheme for OFDM Cellular Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 7, pp. 1483-1489, May 2008.
- [35] K. Chang, P. Ho, and Y. Choi, "Signal Design for Reduced Complexity and Accurate Cell Search/Synchronization in OFDM-Based Cellular Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 9, pp. 4170-4175, July 2012.

- [36] F. Lu, T. Komine, T. Suzuki, and M. Sawahashi, "CAZAC Sequence Hopping for Physical Uplink Control Channel of LTE," *Proc. of IEEE 68th Vehicular Technology Conference (VTC 2008 Fall), Calgary (Canada)*, September 2008.
- [37] H. A. Ngo and L. Hanzo, "Area Spectral Efficiency of Soft Decision Space-Time-Frequency Shift-Keying-Aided Slow Frequency Hopping Multiple Access," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 3, pp. 1433-1439, January 2012.
- [38] Mariana Dirani and Zwi Altman, "A Cooperative Reinforcement Learning Approach for Inter-Cell Interference Coordination in OFDMA Cellular Networks," *IEEE*, pp. 170-176, 2010.
- [39] Ahmad Awada, Bernhard Wegmann, Ingo Viering, and Anja Klein, "A Game-Theoretic Approach to Load Balancing in Cellular Radio Networks," *IEEE*, no. 978-1-4244-8016-6/10, pp. 1184-1189, 2010.
- [40] Koichiro Kitagawa, Toshihiko Komine, Toshiaki Yamamoto, and Satoshi Konishi, "A Handover Optimization Algorithm with Mobility Robustness for LTE systems," *IEEE*, no. 978-1-4577-1348-4/11, pp. 1647-1651, 2011.
- [41] Xavier Gelabert, Berna Sayrac, and Sana Ben Jemaa, "A Heuristic Coordination Framework for Self-Optimizing Mechanisms in LTE HetNets," *IEEE*, vol. TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. X, NO. Y, MONTH 2013, pp. 1-14, 2013.
- [42] Ingo Viering, Martin Döttling, and Andreas Lobinger, "A mathematical perspective of self-optimizing wireless networks," *IEEE*, no. 978-1-4244-3435-0/09, 2009.
- [43] Edoardo Amaldi, Antonio Capone, Federico Malucelli, and Francesco Signori, "A mathematical programming approach for W-CDMA radio planning with uplink and downlink constraints," *IEEE*, vol. IEEE Vehicular Technology Conference, no. v 58, n 2, pp. 806-810, 2004.
- [44] Zhou Guohua, Peter Legg, and Gao Hui, "A Network Controlled Handover Mechanism and its Optimization in LTE Heterogeneous Networks," *IEEE*, no. 978-1-4673-5939-9/13, pp. 1915-1919, 2013.
- [45] Haijun Zhang, XiangmingWen, Bo Wang, Wei Zheng, and Yong Sun, "A Novel Handover Mechanism between Femtocell and Macrocell for LTE based Networks," *IEEE*, no. 978-0-7695-3961-4/10, pp. 228-231, 2010.
- [46] M.A.Imran and R.Tafazolli, "A Novel Self Organizing Framework for Adaptive Frequency Reuse and Deployment in Future Cellular Networks," *IEEE*, no. 978-1-4244-8016-6/10, pp. 2354-2359, 2010.
- [47] Haijun Zhang, XiangmingWen, Bo Wang, Wei Zheng, and Zhaoming Lu, "A Novel Self-optimizing Handover Mechanism for Multi-service Provisioning in LTE-Advanced," *IEEE*, no. 978-0-7695-3927-0/09, pp. 221-224, 2009.
- [48] Antonio De Domenico and Emilio Calvanese Strinati, "A Radio Resource Management Scheduling Algorithm for Self-Organizing Femtocells," *IEEE*, no. 978-1-4244-9116-2/10, pp. 191-196, 2010.
- [49] Oriol Sallent et al., "A Roadmap from UMTS Optimization to LTE Self-Optimization," *IEEE*, vol. Communications Magazine, no. 0163-6804/11/, 2011.
- [50] Alexander Gerdenitsch, Stefan Jakl, Yee Yang Chong, and Martin Toeltsch, "A rule-based algorithm for common pilot channel and antenna tilt optimization in UMTS FDD networks," *IEEE*, vol. ETRI Journal, International Conference, no. v 26, n 5, pp. 437-442, 2003.

- [51] Dongming Su, Xiangming Wen, Haijun Zhang, and Wei Zheng, "A Self-Optimizing Mobility Management Scheme based on Cell ID Information in High Velocity Environment," *IEEE*, no. 978-0-7695-4042-9/10, pp. 285-288, 2010.
- [52] Qi Liao, Sławomir Stanczak, and Federico Penna, "A Statistical Algorithm for Multi-Objective Handover Optimization Under Uncertainties," *IEEE*, no. 978-1-4673-5939-9/13, pp. 1552-1557, 2013.
- [53] Heng Zhang, Xue-song Qiu, Luo-ming Meng, and Xi-dong Zhang, "Achieving distributed load balancing in self-organizing LTE radio access network with autonomic network management," *IEEE*, no. 978-1-4244-8865-0/10, pp. 454-459, 2010.
- [54] Andres Navarro and Narcis Cardona, "Adaptive planning of 3G/4G systems using Q-analysis or polyhedral dynamics," *IEEE*, vol. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC, no. v 4, pp. 2637-2641, 2004.
- [55] David Soldani, Gordon Alford, Flavio Parodi, and Mikko Kylv'ajad, "An Autonomic Framework for Self-Optimizing Next Generation Mobile Networks," *IEEE*, no. 1 -4244-0992-6/07, 2007.
- [56] Jie Zhang, Liang Guo, and Joyce Y. Wu, "An integrated approach for UTRAN planning and optimization," *IEEE*, vol. IEEE Vehicular Technology Conference, no. v 59, n 4, pp. 2360-2364, 2004.
- [57] Dimitrios KARVOUNAS et al., "An Opportunistic Approach for Coverage and Capacity Optimization in Self-Organizing Networks," *IEEE*, vol. IIMC International Information Management Corporation, 2013, no. ISBN: 978-1-905824-37-3, 2013.
- [58] S.M. Allen, S. Hurley, R.K. Taplin, and R.M. Whitaker, "Automated cell planning to improve network rollout," *IEEE*, vol. IEEE Vehicular Technology Conference, no. v 60, n 5, pp. 3438-3442, 2004.
- [59] Jean-Marc Picard et al., "Automatic cell planning strategies for UMTS networks," *IEEE*, vol. Int. J. Mobile Network Design and Innovation, no. Vol. 1, No. 1, 2005.
- [60] Alexander Engels et al., "Autonomous Self-Optimization of Coverage and Capacity in LTE Cellular Networks," *IEEE*, vol. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 62, NO. 5, JUNE 2013, no. 0018-9545, pp. 1989-2004, 2013.
- [61] Tomasz Mach and Rahim Tafazolli, "Battery Life Idle Parameter Optimization of UE in Self Organizing Network," *IEEE*, no. 978-1-4244-8016-6/10, pp. 1332-1336, 2010.
- [62] Martin Döttling and Ingo Viering, "CHALLENGES IN MOBILE NETWORK OPERATION: TOWARDS SELF-OPTIMIZING NETWORKS," *IEEE*, no. 978-1-4244-2354-5/09, pp. 3609-3612, 2009.
- [63] Premnath KN and Srinivasan Rajavelu, "Challenges in Self Organizing Networks for Wireless Telecommunications," *IEEE*, no. 978-1-4577-0590-8/11, pp. 1331-1334, 2011.
- [64] S. Ben Jamaa, Z. Altman, J.M. Picard, and B. Fourestie, "Combined coverage and capacity optimisation for UMTS networks," *IEEE*, vol. Networks 2004 - 11th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium, pp. 175-178, 2004.
- [65] Andreas Lobinger, Szymon Stefanski, Thomas Jansen, and Irina Balan,

- "Coordinating Handover Parameter Optimization and Load Balancing in LTE Self-Optimizing Networks," *IEEE*, no. 978-1-4244-8331-0/11/, 2011.
- [66] Fedor Chernogorov, Jussi Turkka, Tapani Ristaniemi, and Amir Averbuch, "Detection of Sleeping Cells in LTE Networks Using Diffusion Maps," *IEEE*, no. 978-1-4244-8331-0/11, 2011.
- [67] Weihao Lv, Wenjing Li, Heng Zhang, and Yanguang Liu, "DISTRIBUTED MOBILITY LOAD BALANCING WITH RRM IN LTE," *IEEE*, vol. Proceedings of IC-BNMr2010, no. 978-1-4244-6769-3/10, pp. 457-461, 2010.
- [68] Henning Sanneck, Yves Bouwen, and Eddy Troch, "Dynamic Radio Configuration of Self-Organizing Base Stations," *IEEE*, no. 978-1-4244-6317-6/10, pp. 716-720, 2010.
- [69] Yejee Lee, Bongihin Shin, Jaechan Lim, and Daehyoung Hong, "Effects of Time-to-Trigger Parameter on Handover Performance in SON-Based LTE Systems," *IEEE*, no. 978-1-4244-8129-3/10, pp. 492-496, 2010.
- [70] Christian M. Mueller, Hajo Bakker, and Lutz Ewe, "Evaluation of the Automatic Neighbor Relation Function in a Dense Urban Scenario," *IEEE*, no. 978-1-4244-8331-0/11, 2011.
- [71] Anders Dahlén et al., "Evaluations of LTE Automatic Neighbor Relations," *IEEE*, no. 978-1-4244-8331-0/11, 2011.
- [72] Roger M. Whitaker and Steve Hurley, "Evolution of Planning for Wireless Communication Systems," *IEEE*, vol. Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'03), no. 0-7695-1874-5/03, 2002.
- [73] Thomas Jansen, Irina Balan, John Turk, Ingrid Moerman, and Thomas Kurner, "Handover parameter optimization in LTE self-organizing networks," *IEEE*, no. 978-1-4244-3574-6/10, 2010.
- [74] Andreas Lobinger, Szymon Stefanski, Thomas Jansen, and Irina Balan, "Load Balancing in Downlink LTE Self-Optimizing Networks," *IEEE*, no. 978-1-4244-2519-8/10, 2010.
- [75] Sana Ben Jamaa, Zwi Altaman, Jean-Marc Picard, Benoît Fourestié, and Julien Mourlon, "Manual and Automatic Design for UMTS Networks," vol. Mobile Networks and Applications, no. Volume 9, Issue 6, pp. 619 – 626, 2004.
- [76] Zhenzhen Wei, "Mobility Robustness Optimization based on UE mobility for LTE system," *IEEE*, no. 978-1-4244-7555-1/10, 2010.
- [77] Mehdi Amirijoo et al., "Neighbor Cell Relation List and Measured Cell Identity Management in LTE," *IEEE*, no. 978-1-4244-2066-7/08, pp. 152-159, 2008.
- [78] David López-Pérez, Ákos Ladányi, Alpár Jüttner, Herve Rivano, and Jie Zhang, "Optimization Method for the Joint Allocation of Modulation Schemes, Coding Rates, Resource Blocks and Power in Self-Organizing LTE Networks," *IEEE*, no. 978-1-4244-9921-2/11, pp. 111-115, 2011.
- [79] Andreas Eisenblatter et al., "Optimization Methods for UMTS Radio Network Planning," *IEEE*, 2004.
- [80] Timo Nihtilä, Jussi Turkka, and Ingo Viering, "Performance of LTE Self-Optimizing Networks Uplink Load Balancing," *IEEE*, no. 978-1-4244-8331-0/11, 2011.
- [81] Stephen Hurley, "Planning effective cellular mobile radio networks," *IEEE*, vol. IEEE Transactions on Vehicular Technology, no. v 51, n 2, pp. 243-253, 2002.

- [82] Tobias Bandh, Raphael Romeikat, Henning Sanneck, and Haitao Tang, "Policy-based Coordination and Management of SON Functions," *IEEE*, vol. 12th IFIP/IEEE 1M 2011: Application Session, no. 978-1-4244-9221-3111, pp. 827-840, 2011.
- [83] L. F. Morán-Mirabal, J. L. González-Velarde, M. G. C. Resende, and R. M. A. Silva, "Randomized heuristics for handover minimization in mobility networks," *Springer*, no. DOI 10.1007/s10732-013-9223-0, pp. 845–880, 2013.
- [84] Honglin Hu, Jian Zhang, Xiaoying Zheng, Yang Yang, and Ping Wu, "Self-Configuration and Self-Optimization for LTE Networks," *IEEE Communications Magazine*, no. 0163-6804/10, pp. 94-100, February 2010.
- [85] Dooyoung Kim, Bongjhin Shin, Daehyoung Hong, and Jaechan Lim, "Self-Configuration of Neighbor Cell List Utilizing E-UTRAN NodeB Scanning in LTE Systems," *IEEE*, no. 978-1-4244-5176-0/10, 2010.
- [86] Jose Alonso Rubio, "Self-Optimization for Handover Oscillation Control in LTE," *IEEE*, no. 978-1-4244-5367-2/10, pp. 950-953, 2010.
- [87] Ruixiao wu, Zhigang WEN, Chunxiao FAN, Jie LIU, and Zhenjun MA, "SELF-OPTIMIZATION OF ANTENNA CONFIGURATION IN LTE-ADVANCE NETWORKS FOR ENERGY SAV ING," *IEEE*, vol. Proceedings of IC-BNMT2010, no. 978-1-4244-6769-3/10/, pp. 529-534, 2010.
- [88] Richard Combes, Zwi Altman, Majed Haddad, and Eitan Altman, "Self-Optimizing Strategies for Interference Coordination in OFDMA Networks," *IEEE*, no. 978-1-61284-955-3/11, 2011.
- [89] Luis G. U. Garcia, Gustavo W. O. Costa, Andrea F. Cattoni, Klaus I. Pedersen, and Preben E. Mogensen, "Self-Organizing Coalitions for Conflict Evaluation and Resolution in Femtocells," *IEEE*, no. 978-1-4244-5638-3/10, 2010.
- [90] Seppo Hämmäläinen, "Self-Organizing Networks in 3GPP LTE," *IEEE*, no. 978-1-4244-2515-0/09, 2009.
- [91] Christian Makaya et al., "Service Continuity Support in Self-Organizing IMS Networks," *IEEE*, no. 978-1-4577-0787-2/11, 2011.
- [92] Junsik Kim, Hongsoog Kim, Kyongtak Cho, and Namhoon Park, "SON and Femtocell Technology for LTE-Advanced System," *IEEE*, no. 978-0-7695-4182-2/10, pp. 286-290, 2010.
- [93] Moazzam Islam Tiwana, Berna Sayrac, and Zwi Altman, "Statistical learning for automated RRM: Application to eUTRAN mobility," *IEEE*, no. 978-1-4244-3435-0/09, 2009.
- [94] Lixiang Xu, Chengjun Sun, Xiaoqiang Li, Chaegwon Lim, and Hong He, "THE METHODS TO IMPLEMENTATE SELF OPTIMISATION IN LTE SYSTEM," *IEEE*, vol. Proceedings of ICCTA2009, no. 978-1-4244-4817-3/09, 2009.
- [95] Ahmad Awada, Bernhard Wegmann, Dirk Rose, Ingo Viering, and Anja Klein, "Towards Self-Organizing Mobility Robustness Optimization in Inter-RAT Scenario," *IEEE*, no. 978-1-4244-8331-0/11, 2011.
- [96] Edoardo Amaldi, Anronio Capone, Federico Malucelli, and Francesco Signori, "UMTS radio planning: Optimizing base station configuration," *IEEE*, vol. IEEE Vehicular Technology Conference, no. v 56, n 2, pp. 768-772, 2002.
- [97] Kathryn E. Oliver, Stuart M. Allen, and Steve Hurley, "Utilising network dimensioning to improve automated cell planning," *IEEE*, vol. IEEE Vehicular Technology Conference, no. v 60, n 5, pp. 3419-3423, 2004.

- [98] Hans Heller, Ulrich Lauther, Thomas Winter, and Mark Ziegelmann, "UTRAN-OPT - An UMTS Terrestrial Radio Access Network Optimizer," *IEEE*, vol. Proceedings of the IASTED International Conference on Wireless and Optical Communications, no. v 3, pp. 1-6, 2003.
- [99] Ho Van Quan et al., "Visualization of Self-Organizing Networks Operated by the ANR Algorithm," *IEEE*, no. 978-1-4244-4568-4/09, pp. 1-8, 2009.

Capítulo VII

Diseño de un algoritmo ANR para optimizar escenarios con interferencia

En este capítulo se muestra en primer lugar una evaluación de escenarios con elevada interferencia, con el objeto de conocer las características de la red en determinadas situaciones. En segundo lugar se realizan pruebas de optimización de calidad por los métodos convencionales, en células aisladas, donde se comprueba los efectos producidos. En una de estas pruebas se determina que el Valle de la Orotava, en Tenerife, es donde más afecta la interferencia y el sobrealcance al rendimiento de las redes de comunicaciones móviles. Por último, se presenta el diseño y los resultados del algoritmo ANR, que supone una mejora de calidad para la red.

7.1 Evaluación de escenarios con elevada interferencia

La distribución espacial y temporal de usuarios en una determinada zona es un dato fundamental para el diseño de redes de telefonía móvil, pues determinará la ubicación de las estaciones base y la configuración de sus sistemas radiantes. Por su condición de movilidad, este dato solo puede obtenerse mediante estimaciones por densidad de población y por la actividad que le caracteriza (comercial, residencial, turística, industrial, vías rápidas, etc.). Sin embargo, existen determinadas situaciones donde estas condiciones teóricas no se cumplen por dos causas principales: la estación base se ha tenido que ubicar en un punto más alto de lo diseñado inicialmente, o existe un pequeño grupo de usuarios que se encuentran a una altitud considerable respecto del resto de la población. Ambos casos no siempre tienen fácil solución, lo que produce niveles de interferencia notables en el sistema. En este capítulo se describe el resultado de diversas pruebas realizadas en dos escenarios singulares:

- *emplazamientos dominantes*: son lo que tienen una estación base a elevada altura por aprovechamiento de infraestructuras existentes o por estar condicionadas por el marco regulatorio de la zona.

- *usuarios dominantes*: se trata de ocasiones donde cierta cantidad de usuarios se encuentran a una altura tal que reciben la señal de muchas estaciones base a la vez con niveles de potencia similares.

7.1.1 Emplazamientos dominantes

En este apartado se mostrará el análisis llevado a cabo en dos escenarios donde una o más células están situadas a una altura muy superior del resto de estaciones base y su población. El primer caso consiste en la típica célula paraguas (es un símil que se emplea por su amplia cobertura), donde se ha aprovechado un emplazamiento ya existente para tecnologías anteriores al UMTS. En el segundo caso se mostrará el proceso de optimización de células que no son paraguas pero que tienen cierta dominancia sobre el resto, produciendo sobrealcances en poblaciones lejanas debido a la orografía del terreno.

7.1.1.1 Células paraguas

La zona elegida para el estudio es la ciudad de San Sebastián de la Gomera, cuya panorámica se muestra en la Figura VII.1.



Figura VII. 1 Panorámica de San Sebastián de la Gomera

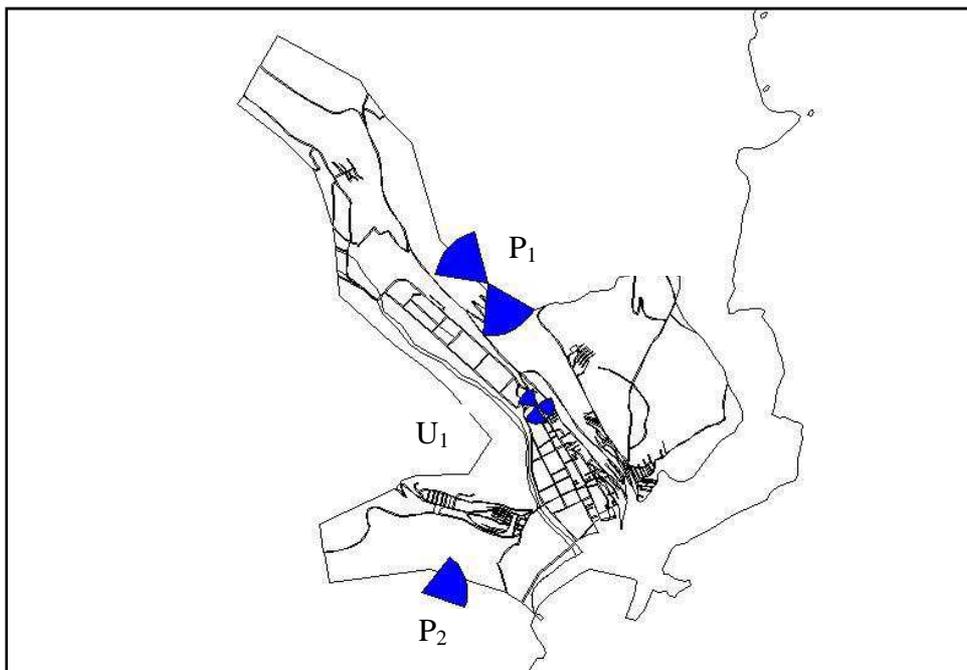


Figura VII. 2 Ubicación de las estaciones base

Las dos estaciones base instaladas inicialmente del tipo paraguas, P_1 y P_2 , se ubican en las laderas colindantes y tienen bastante altura sobre la población. Posteriormente se procedió a la instalación de la estación base urbana U_1 en el propio casco de la ciudad (Figura VII.2). En la Figura VII.3 se muestra la orografía del terreno y la ubicación de los emplazamientos, visto desde el final del barranco.

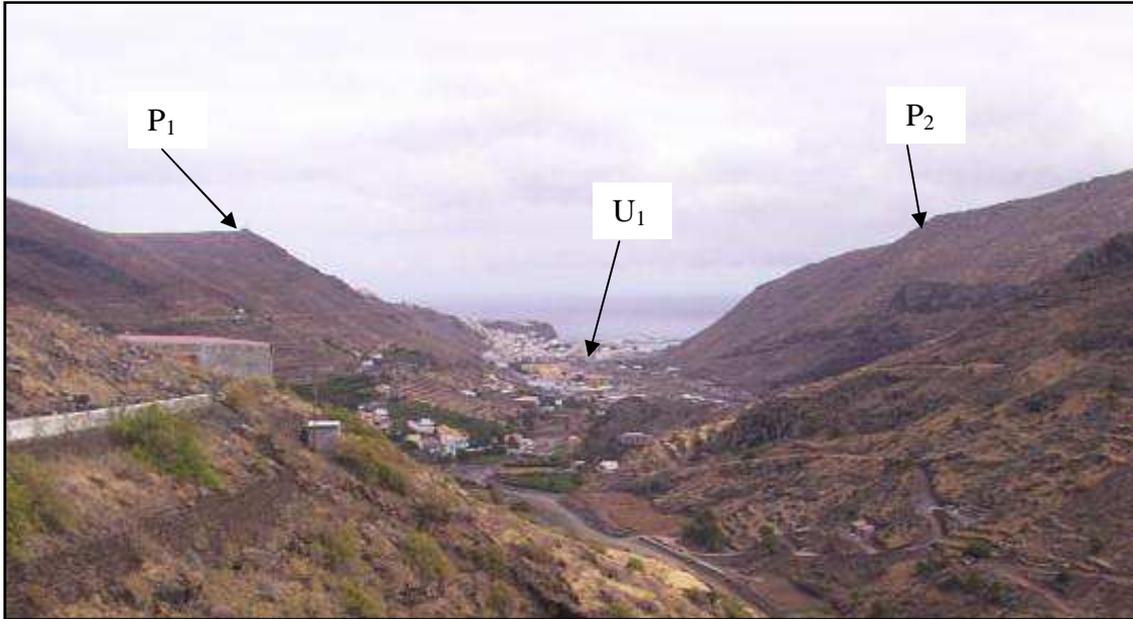


Figura VII. 3 Orografía del terreno

Este escenario presenta células dominantes P_1 y P_2 con muy pocas pérdidas de propagación (espacio libre) frente a U_1 situadas en el casco urbano con mayores pérdidas por obstáculos cercanos. Para evaluar el comportamiento de la red se realizaron medidas de voz (apartado 4.4) en la ciudad con las tres células de U_1 en servicio (emitiendo señal) y bloqueadas. Posteriormente se realizaron comparaciones con las dos medidas. Los niveles de Interferencia E_c/N_0 (dB) resultantes (apartado 4.1) se muestran en la Figura VII.4.

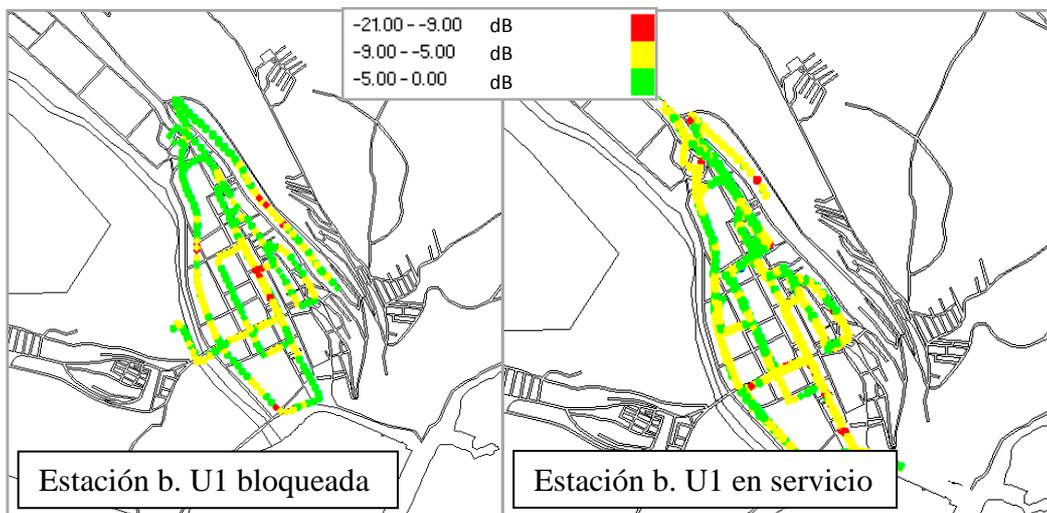


Figura VII. 4 Niveles de RSCP medidos (valores en dBm)

La Figura VII.5 representa el porcentaje del número de muestras medidas para los casos en los que el terminal recibe una sola célula, dos células solapadas o tres células solapadas simultáneamente, para ambas situaciones. Con las tres células de la estación base U_1 bloqueadas, el porcentaje de veces que el móvil está siendo servido por una sola célula respecto de recibir dos o tres, es mayor que cuando U_1 está emitiendo. Sucede lo mismo para los casos en los que recibe dos o tres células, obteniendo los valores mostrados en la Tabla VII.1. Según se mostró en el apartado 4.1.1, un grado de solapamiento mayor de células significaba mayor interferencia de las células colindantes sobre la célula servidora. Por lo tanto, con las tres células solapadas, la interferencia intercelular es mayor.

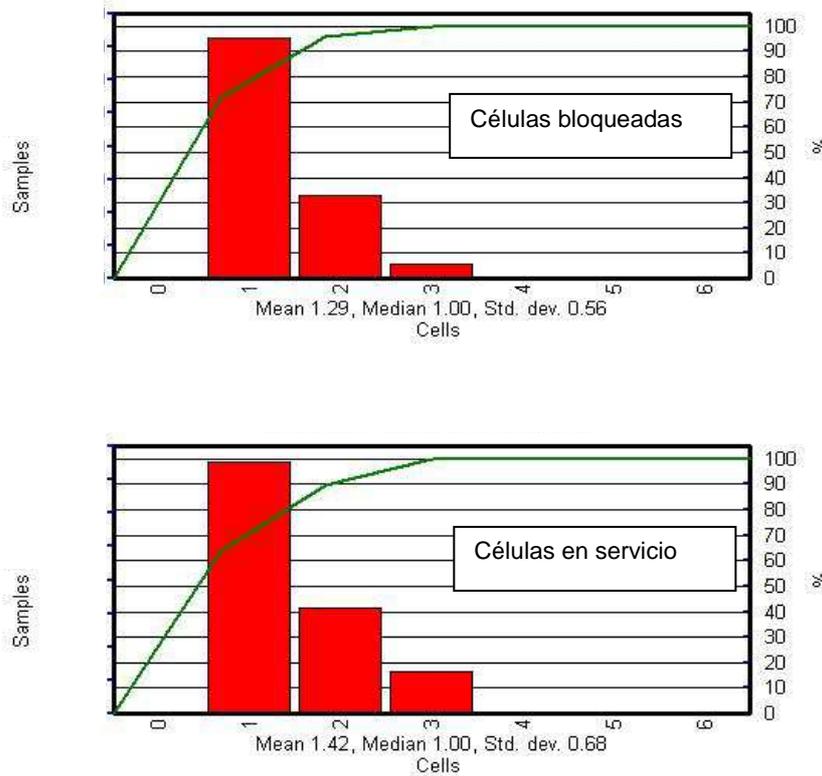


Figura VII. 5 Porcentaje de solapamiento

Grado de solapamiento	% de muestras con células bloqueadas	% de muestras con células en servicio
2 células recibidas	32 %	41 %
3 células recibidas	5 %	17 %

Tabla VII. 1 Grado de solapamiento de las células en ambos casos

Las medidas se realizaron en un momento de baja carga. Pero los datos muestran una pérdida de capacidad en la zona debido al aumento de interferencias intercelulares, que además empeorará según vaya creciendo el número de usuarios y con ella la interferencia.

En la Figura VII.6 se muestra la potencia media de RSCP medida. Con las tres células de U_1 funcionando, el valor medio es de -73 dBm frente a -75 dBm (3 dB es el doble de potencia), lo que supone mayor penetración de cobertura en interiores. En la Figura VII.7 se muestran los valores E_c/N_o . Se puede observar un pequeño aumento de 0,5 dB de la interferencia en la segunda gráfica.

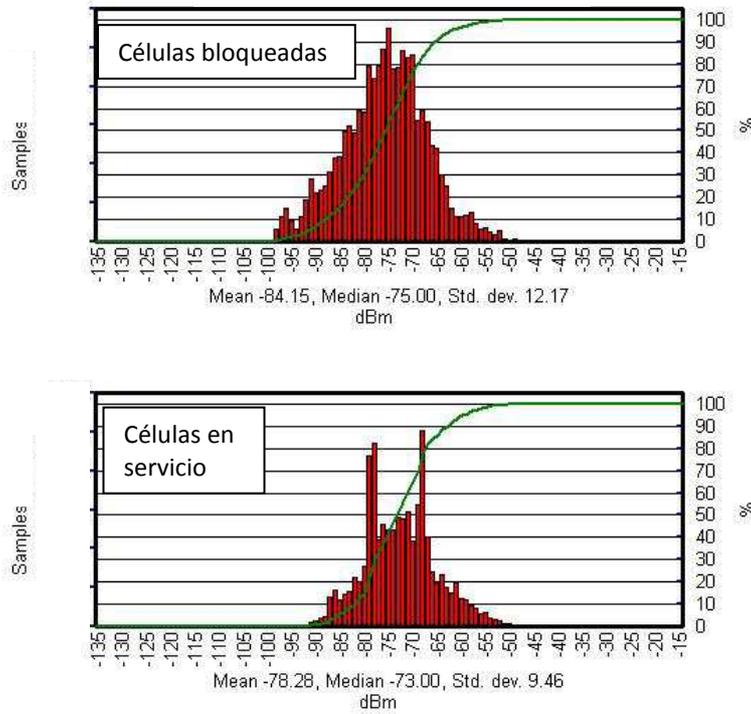


Figura VII. 6 Valor de RSCP (dBm) medido

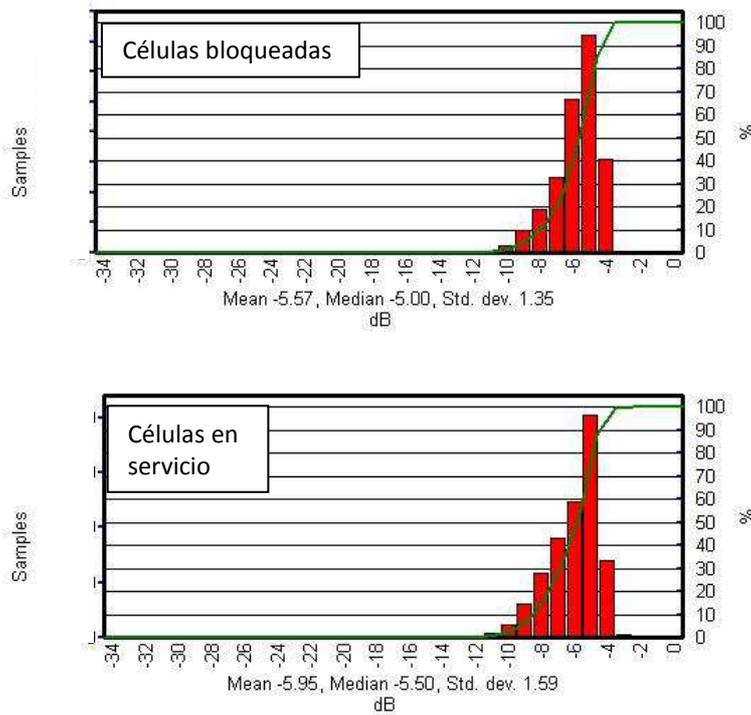


Figura VII. 7 Valor de RSCP (dB) medido

7.1.1.2 Optimización de sobrealcances

Una de las tareas más importantes en el proceso de planificación y optimización de redes celulares es la definición correcta de la inclinación de la antena y de sus colindancias. Este proceso es especialmente complejo para células con cierta dominancia si la orografía del terreno presenta diferencias grandes de altitud en poco espacio, como sucede en las Islas Canarias.

Para determinar el alcance de las células bajo estudio, se activa un trazo (apartado 4.4) en el que se registra en una base de datos de la OSS un evento específico, que se dispara cuando el móvil informa de una vecina que no tiene ninguna celda definida como colindante en su lista. Con eso, se obtiene información de las células que tienen solape, o lo que es lo mismo, que el móvil es capaz de medir simultáneamente. Analizando estos datos en un plano de ubicación de estaciones base, se puede detectar claramente cuándo se debe crear una nueva colindancia, o por el contrario se debe a un sobrealcance, el cual debe ser corregido con la debida modificación en la inclinación de las antenas.

En el ejemplo de la Figura VII.8 se muestra un plano de la zona norte de Tenerife. Los datos del trazo realizado en una célula instalada en el Sauzal, mostraban que los móviles que estaban enganchados a ésta, recibían con buenos niveles de RSCP a otras células colindantes del Puerto de la Cruz, lo cual evidencia un caso claro de sobrealcance, puesto que entre ambas zonas existen otras células que ofrecen la continuidad del servicio a los usuarios, mediante handovers.

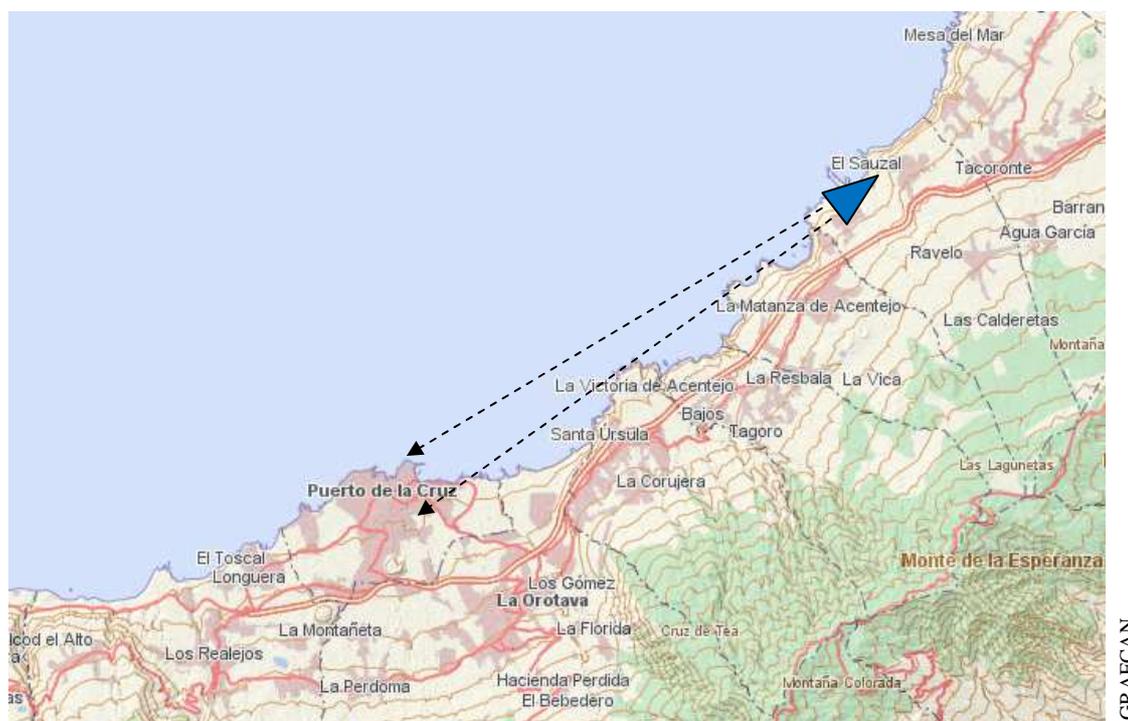


Figura VII. 8 Zona norte de Tenerife

En las Figuras VII.9 y VII.10 se muestra una vista panorámica desde el Sauzal en la dirección de la máxima propagación de la célula, donde destaca al fondo la población del Puerto de la Cruz donde llega el sobrealcance, por encontrarse en la misma línea de propagación de la población cercana que es objeto de cobertura por la célula.



Figura VII. 9 Panorámica del sobrealcance de la célula



Figura VII. 10 Población del Puerto de la Cruz donde llega el sobrealcance

Para corregir este problema se aumentó la inclinación eléctrica de la antena, pasando de 5° a 9° . La célula se encuentra a unos 400 metros sobre el nivel del mar, mientras que la mayoría del resto de células del Puerto de la Cruz están a menos de 100 metros de altura. Además, existe línea visual directa entre ellas. El resultado fue una mejora del porcentaje de llamadas caídas, que se muestra en la Figura VII.11.

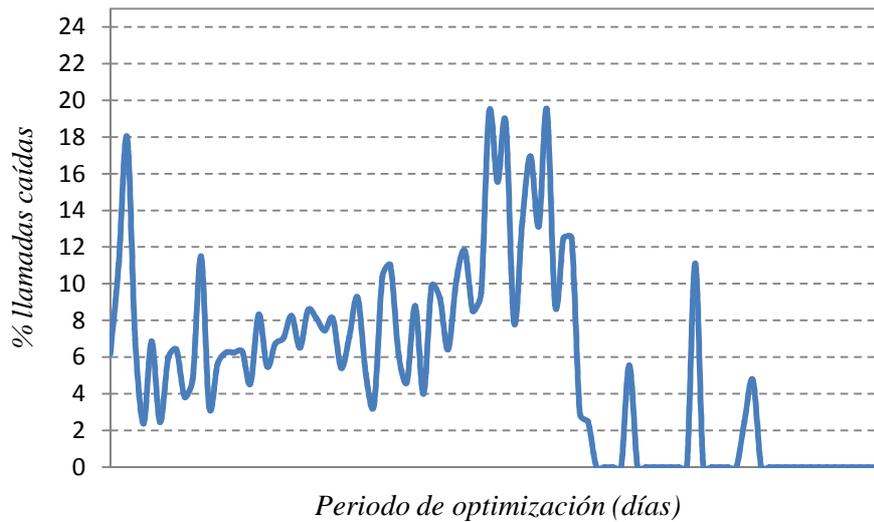


Figura VII. 11 Mejora del % de llamadas caídas

En otro escenario de pruebas en la zona de La Laguna (Figura VII.12), se comprobó que el trazo de una célula ubicada en Geneto, presentaba terminales que estaban siendo servidos por ésta y que recibían células cercanas que no estaban definidas en la lista de colindancias. En este caso se definieron las células recibidas como colindantes puesto que el solape es correcto dado que no existe en medio otras células que den continuidad al servicio. La mejora obtenida en el porcentaje de llamadas caídas se muestra en la Figura VII.13.

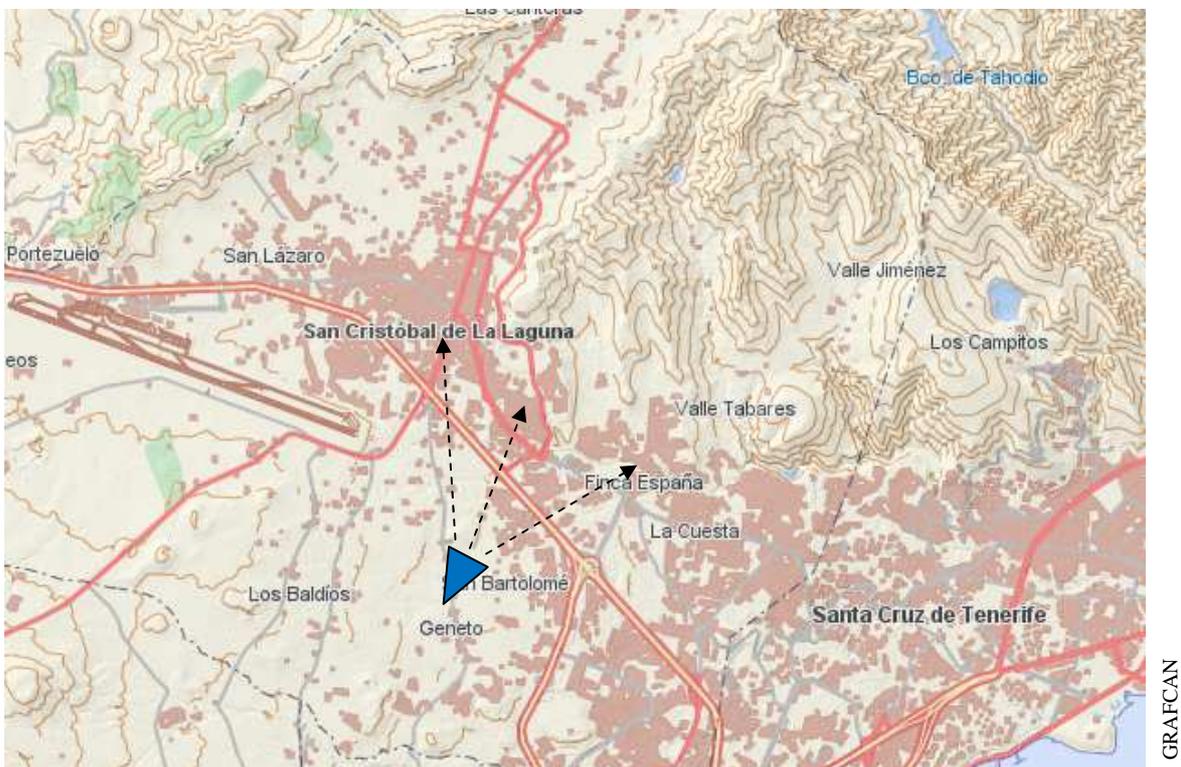


Figura VII. 12 Zona de La Laguna

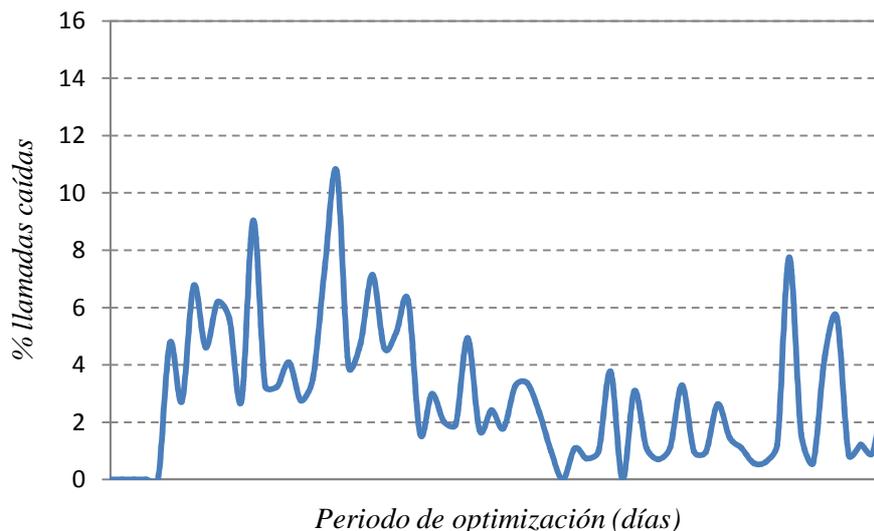


Figura VII. 13 Mejora del % de llamadas caídas

7.1.2 Usuarios en situación dominante

En este apartado se muestra el análisis de la red en dos situaciones concretas donde los usuarios están en una situación muy dominante sobre la red. Si bien el número de casos que se puedan dar es escaso, se ha considerado este estudio para conocer la calidad de servicio y la interferencia que pueden percibir. Tales situaciones son las siguientes:

- a) *edificios muy altos de viviendas*: se trata de edificios muy altos sobre el resto de la ciudad que presentan una gran dificultad y elevado coste para la instalación de microcélulas de interior, con las que se podría cubrir la mayoría de las dependencias. Es un caso distinto a un edificio de oficinas con grandes áreas diáfanas.
- b) *utilización en la aviación general deportiva*: es muy frecuente que los pilotos y pasajeros de la aviación general deportiva (aviones pequeños, ultraligeros, helicópteros para trabajos aéreos, parapentes, etc.) utilicen el móvil durante su vuelo.

7.1.2.1 Edificios altos

Para este análisis se ha elegido una de las dos torres más altas, con diferencia sobre los demás, de la ciudad de Santa Cruz de Tenerife. Se trata de un edificio con una gran recepción, 4 plantas de oficinas en la parte baja, y 32 plantas de viviendas. En la Figura VII.14 se muestra una foto aérea tomada antes de la construcción de la segunda torre, donde se observa claramente la diferencia de altura entre el edificio bajo estudio y los edificios colindantes.



Figura VII. 14 Situación del edificio bajo estudio

En la Figura VII.15 se puede ver una vista con Santa Cruz al fondo, donde se aprecia también la excesiva dominancia de las posibles personas que habitan las últimas plantas sobre el resto de la ciudad. Esto es especialmente crítico si se tiene en cuenta que las estaciones base se encuentran situadas en las azoteas de los edificios en línea visual directa, con lo cual el sobrealcance “*hacia arriba*” es considerable.



Figura VII. 15 Vista de la ciudad de Santa Cruz

En la Figura VII.16 se muestra un plano de la ciudad con la ubicación de las principales células.

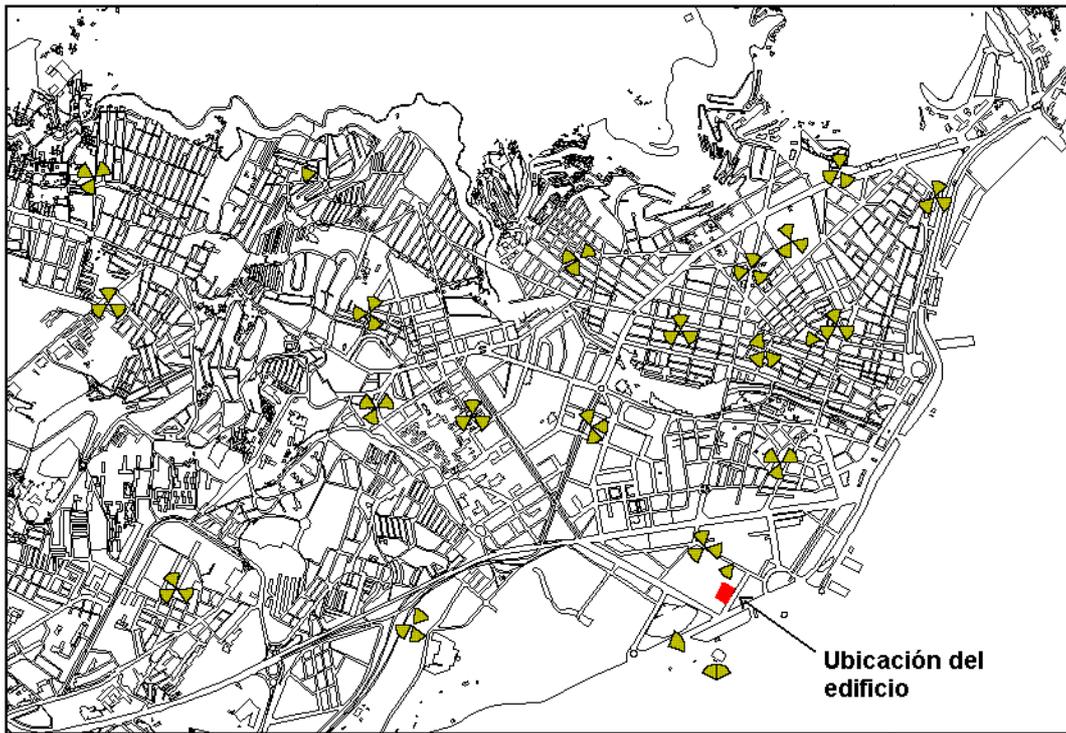


Figura VII. 16 Ubicación del edificio y de las células colindantes

Para cuantificar la degradación producida por el sobrealcance debido a la altura del edificio, se realizaron medidas en la última planta del edificio y en la recepción. En la Figura VII.17 se muestra la relación entre los valores medidos por el terminal de la interferencia E_c/N_o (dB) frente a la potencia del canal piloto RSCP (dBm). En el último piso se reciben niveles de potencia muy bajos con interferencia alta, mientras que en la planta baja se da la situación opuesta.

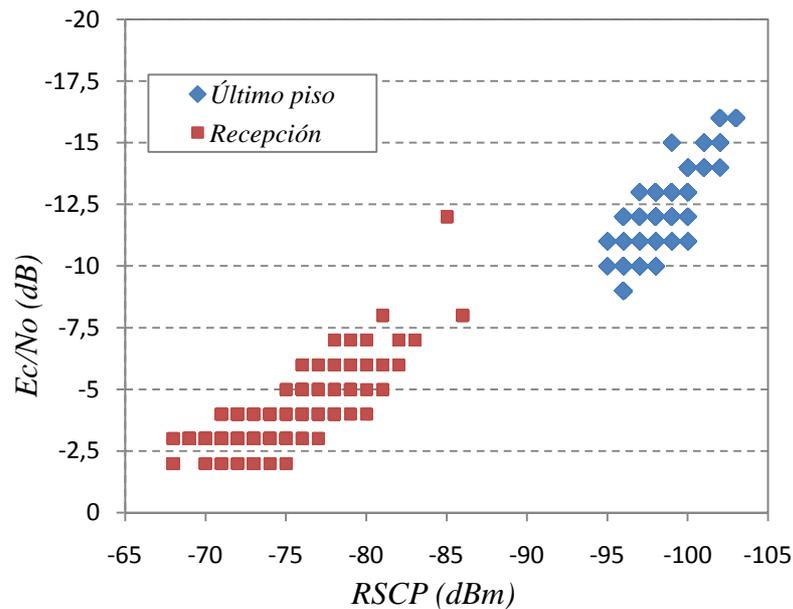


Figura VII. 17 Comparación entre RSCP y E_c/N_o

Este escenario obliga, como consecuencia, a que los terminales tengan que emitir mayor potencia de la necesaria en la planta alta para hacer poder hacer frente a la degradación del canal, como muestra la Figura VII.18. Los valores de potencia emitida por el terminal están en torno a 0 dBm (1 mw), mientras que en la recepción los niveles son notablemente menores. Como se puede observar, el comportamiento de la red se vuelve inestable, puesto que cuando se degrada el canal, la célula y el móvil emiten más potencia para poder mantener una CIR_{target} adecuada (apartado 4.1.1), pero este aumento produce más interferencia al resto de células. Para contrarrestar esa inestabilidad del sistema se dispone, entre otra, de la funcionalidad Control de Potencia (apartado 5.1).

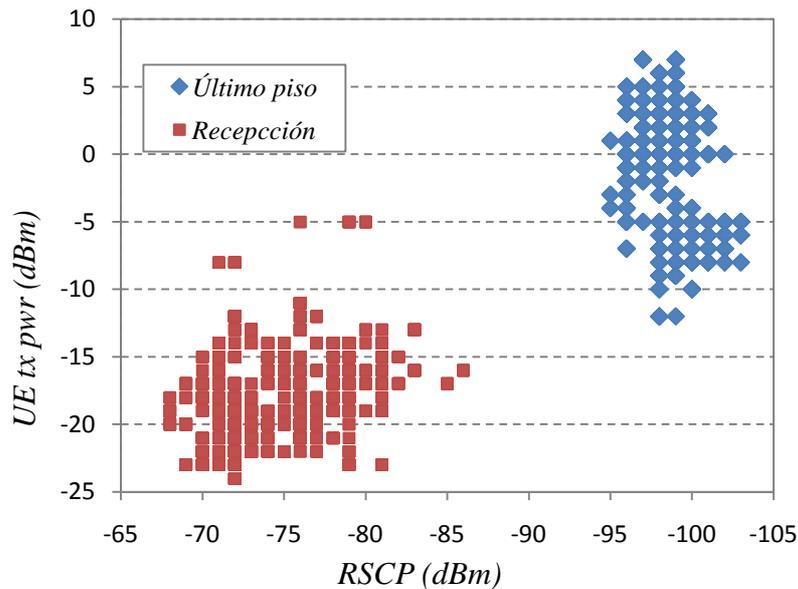


Figura VII. 18 Potencia de transmisión del móvil en función del RSCP

En la Figura VII.19 se muestra el porcentaje de muestras de medida en las que el terminal está recibiendo una, dos o tres células simultáneamente con los mejores niveles de RSCP. El grado de solapamiento es mayor en el último piso.

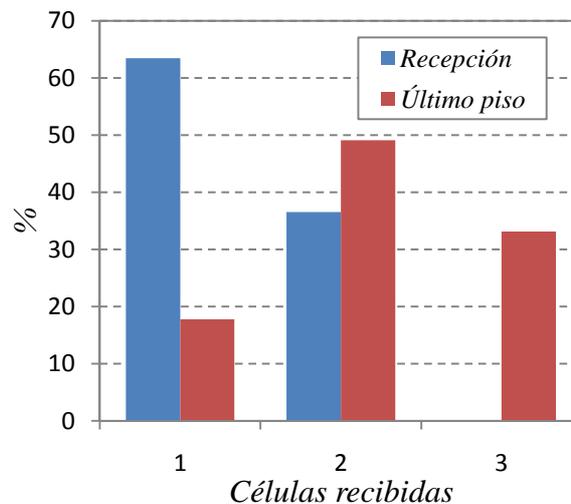


Figura VII. 19 Grado de solapamiento

7.1.2.2 Usuarios de la aviación general deportiva

El uso de la telefonía móvil en la aviación general es un hecho poco habitual. Si bien su repercusión en el funcionamiento de la red es pequeña por el número de llamadas que se generan en esta actividad, no por ello debe ser despreciado. Las pruebas que se muestran en este apartado servirán para evaluar el comportamiento de la red y la interferencia recibida en esta situación (Figura VII.20) [1].

Antes de entrar en detalle, es preciso explicar que la actividad aérea objeto de este estudio engloba a todos los vuelos que se realicen a poca altura y pequeña velocidad, de tal manera que sea posible la comunicación a través de la telefonía móvil.

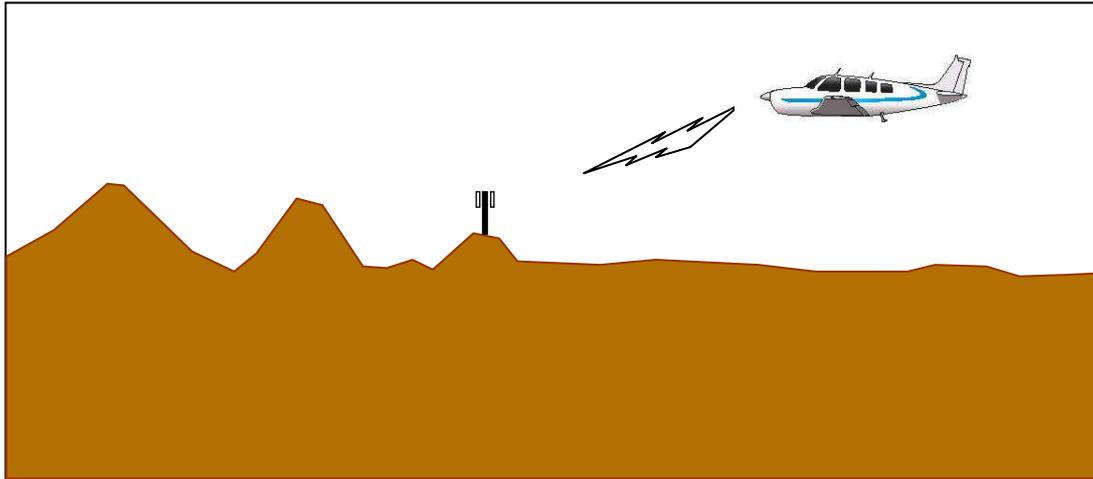


Figura VII. 20 Comunicaciones móviles en la aviación general

La aviación general se define en el Reglamento de Circulación Aérea (Real Decreto 57/2002 de 18 de enero) como operación de aeronave distinta de la de transporte aéreo comercial o de la de trabajos aéreos. Generalmente, las aeronaves que operan para este cometido son, en la mayoría de los casos, aviones ligeros de pequeña velocidad, esto es, lo que comúnmente se llama avioneta. La mayor parte de los propietarios de estas aeronaves son aeroclubs, escuelas y pequeños grupos de socios. La actividad que se realiza consiste generalmente en vuelos a baja altura para recreo, acrobacia, viajes particulares y otros. Fuera de la aviación general podemos encontrar el arrastre de cartel, fotografía aérea, fumigación de campos de cultivo y extinción de incendios. Para simplificar el ámbito de aplicación al que va destinado este estudio, en adelante se tomará el término de aviación general para referirse a los casos explicados en los párrafos anteriores. Existen ciertos deportes aéreos que podrían ser englobados en este concepto, si bien su repercusión es aún menor. Tales son los casos de los ultraligeros, parapentes y aeroestación (globos tripulados).

Los vuelos que se hacen en la aviación general se realizan en muchas ocasiones a baja altura, bien sea para disfrutar del paisaje, planear por un barranco o valle, realizar una pasada rasante por un determinado pueblo, fotografía, arrastre de cartel, etc. Todo ello sin contar por su puesto con las fases de despegue y aproximación al campo. Según esto se dan las siguientes circunstancias:

- a) la proximidad a las estaciones base es pequeña. El Reglamento de Circulación Aérea permite descender sobre el terreno hasta los 1000 pies (330 m) para zonas pobladas, y hasta los 500 pies (175 m) para zonas no pobladas,
- b) la comunicación se realiza en línea visual directa con la célula servidora,
- c) en la mayoría de los casos la aeronave está situada por encima de la estación base, y debido a la inclinación de las antenas, es probablemente el lóbulo posterior el que se recibe con mayor potencia respecto de las reflexiones de la radiación de la parte delantera,
- d) en otras ocasiones se da el caso de volar por debajo de las estaciones base paraguas instaladas en la cima de una montaña, recibiendo por tanto una señal con bastante potencia,
- e) debido a la altura del terminal móvil, se crea una interferencia elevada cuando se sobrevuela una zona con gran densidad de estaciones base, como en los entornos urbanos,
- f) la velocidad de crucero de muchas de las aeronaves empleadas en aviación general está entorno a los 100 nudos (aproximadamente 190 Km/h). La velocidad máxima de alejamiento o acercamiento a una célula determinada se alcanzaría volando en línea recta y en dirección a ella. Teniendo en cuenta que se han hecho pruebas satisfactorias de terminales UMTS en movimiento a velocidades de hasta 500 Km/h, la comunicación aún podría ser factible.

La zona elegida para realizar las pruebas es el aeropuerto de Tenerife Norte, sus alrededores, y las poblaciones cercanas a los puntos N, W y S del CTR del aeropuerto, según se puede ver en el plano del espacio aéreo mostrado en la Figura VII.21. Estas poblaciones se han elegido por ser de alto tráfico de aeronaves ligeras y por tener una densidad de estaciones base considerable, según se muestra en la Figura VII.22.

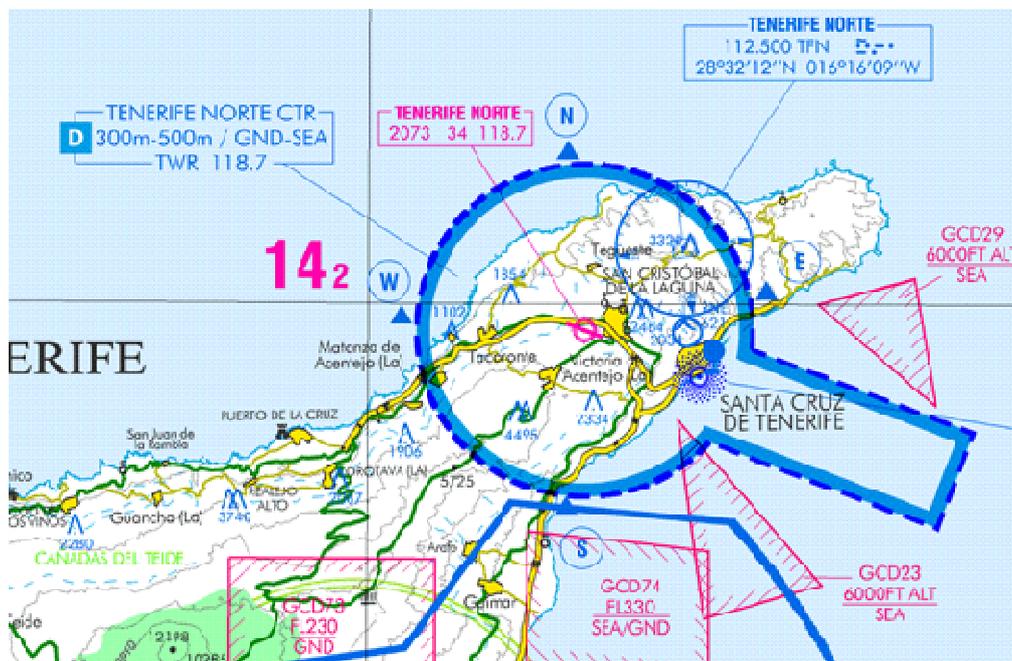


Figura VII. 21 Zona de medidas

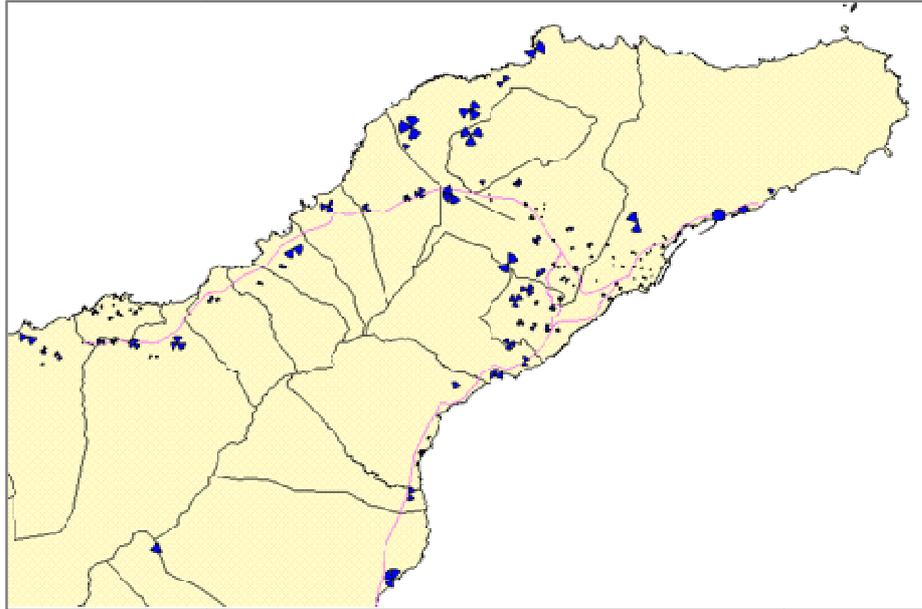


Figura VII. 22 Estaciones base en la zona de vuelo

Para realizar los vuelos se ha utilizado dos aeronaves del Real Aeroclub de Tenerife y equipos de medida. El primer vuelo se hizo por la zona norte de Tenerife con la Cessna 172 de matrícula EC-JGP mostrada en la Figura VII.23. Para la medida de la zona sur se utilizó la Piper Warrior de matrícula EC-DSD, del mismo Aeroclub.



Figura VII. 23 Cessna 172 EC-JGP

La maleta de medidas se puso en los asientos de los pasajeros y se sujetó con el cinturón de seguridad. Las antenas se fijaron a las ventanas con cinta adhesiva como muestra la Figura VII.24.



Figura VII. 24 Sujeción del equipo de medidas

Para que la puesta en marcha del equipo de medida no entorpeciera los procedimientos y maniobras de vuelo, estos fueron programados para que comenzaran a registrar datos a los 8 minutos de ser encendidos. Por experiencias anteriores se determinó este tiempo como el más adecuado entre que se obtiene permiso de torre para rodar y comienza la carrera de despegue. De esta manera, las medidas se empezaron a registrarse de forma autónoma sin desviar la atención del vuelo.

También se realizó un estudio de las interferencias que podría ocasionar la maleta de medidas sobre los sistemas eléctricos y electrónicos de los aviones empleados. El equipamiento consta básicamente de los siguientes sistemas: anemómetro, horizonte artificial, altímetro, coordinador de giro y bola, girodireccional, variómetro, ADF, CDI, cuenta revoluciones, brújula, indicadores de motor y combustible, sistema de audio, radio VHF/NAV/COM/ADF, transponder y GPS. Algunos de estos instrumentos son mecánicos o neumáticos, por lo que se descartó que pudieran ser interferidos. Por otro lado, como el vuelo se realizó en condiciones VFR (reglas de vuelo visual) los sistemas electrónicos de navegación no se utilizaron. Restaba por tanto los sistemas COM y transponder como los únicos que podrían afectar al vuelo en caso de verse interferidos.

Los resultados muestran datos como el de la Figura VII.25, donde los valores de E_c/No frente al RSCP son más altos (parte inferior izquierda de la gráfica) corresponden con el rodaje por la pista y la fase de despegue, y los valores más bajos (parte superior derecha) corresponden con la fase de crucero. Curiosamente, la forma de representar los datos y su tendencia sugieren la trayectoria del avión desde el despegue.

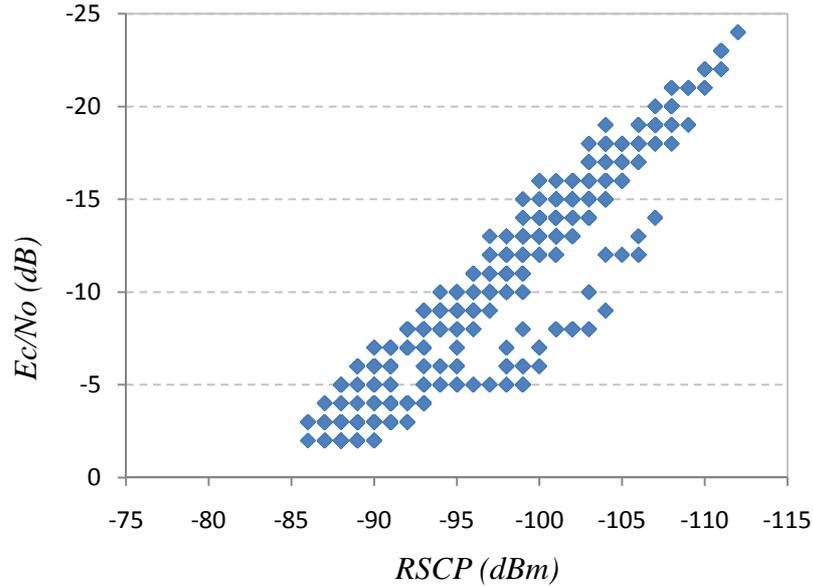


Figura VII. 25 Relación entre RSCP y Ec/No

Los valores de la potencia de transmisión del móvil están muy dispersos (Figura VII.26), pero superan ampliamente a los valores obtenidos en las pruebas realizadas en el último piso del ensayo anterior (Figura VII.17).

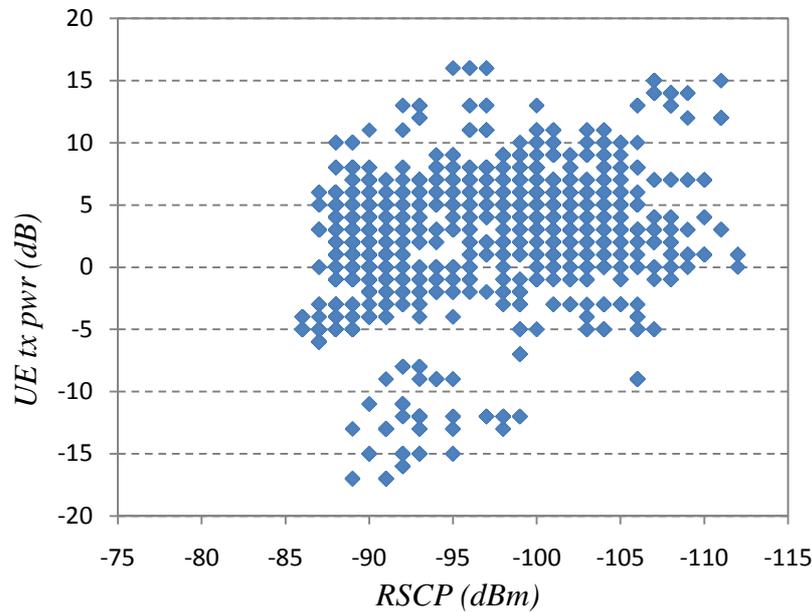


Figura VII. 26 Potencia de transmisión del móvil en función del RSCP

Debido a la gran dispersión de células recibidas, para determinar el grado de solapamiento entre ellas se comparó los valores de Ec/No (Figura VII.27) y de RSCP (Figura VII.28) para las tres células con mayores niveles recibidos, en dos situaciones: cuando el avión aún estaba en tierra rodando por la pista, y cuando estaba en vuelo.

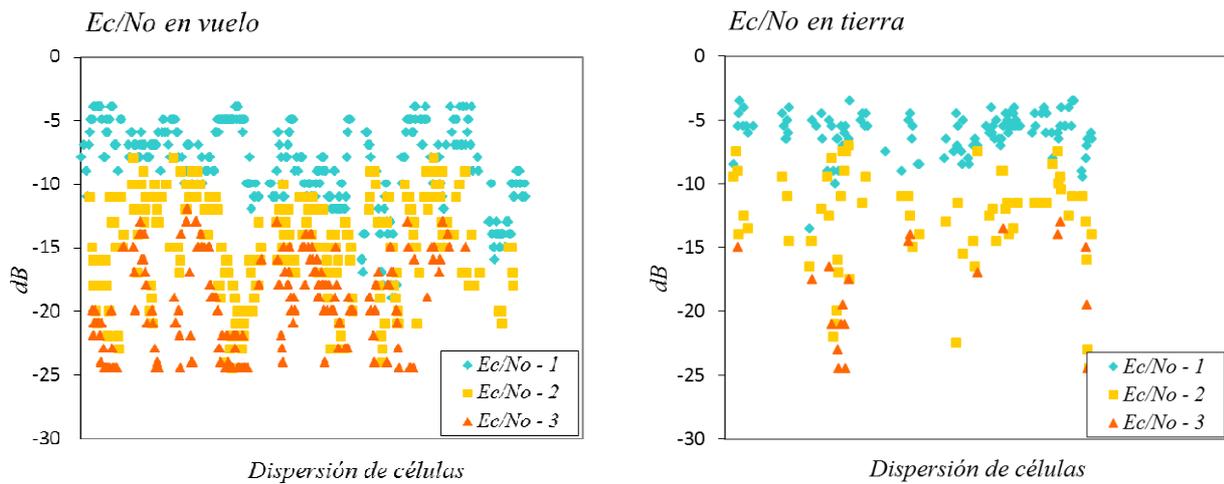


Figura VII. 27 Dispersión de valores de Ec/No

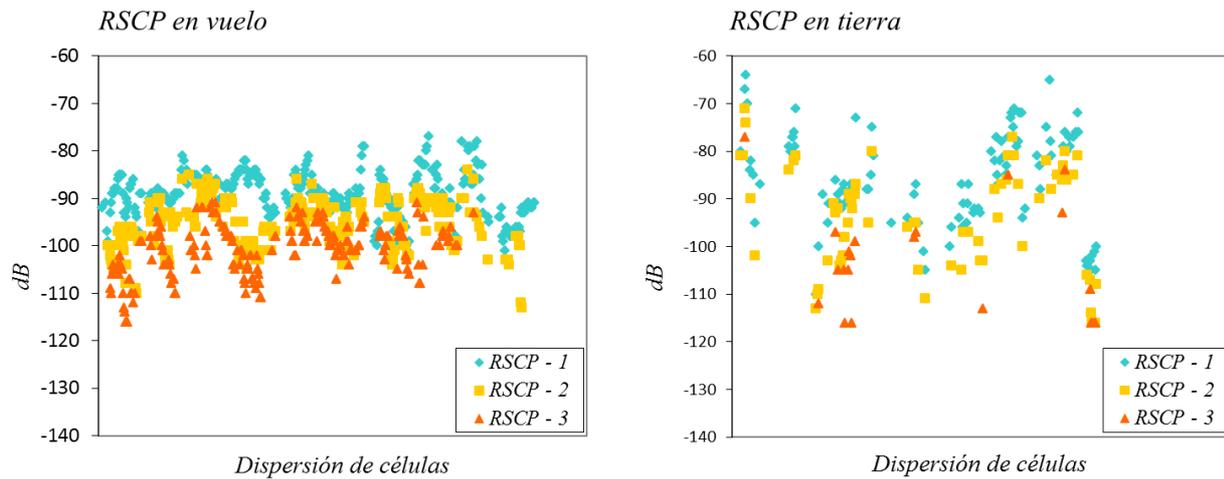


Figura VII. 28 Dispersión de valores de RSCP

En los datos mostrados en las Figuras VII.27 y VII.28 se puede ver que se reciben más cantidad de células a 1.000 pies (300 m) sobre el terreno, que a nivel de pista, siendo los niveles de potencia RSCP y de interferencia Ec/No muy dispersos. A pesar de que las antenas tienen la inclinación adecuada para que su lóbulo principal se dirija hacia la población, los lóbulos residuales y las reflexiones sobre diferentes superficies permitan que cierta cantidad de energía se pueda radiar hacia arriba.

El uso de la telefonía móvil en la aviación general tiene un efecto despreciable en el rendimiento de las redes, pero los resultados de estas pruebas se pueden extrapolar a escenarios opuestos a las células paraguas visto en el apartado 7.1.1.1. Es decir, en aquellas poblaciones con estaciones base al mismo nivel, que estén rodeadas de alguna población en lo alto de una ladera o de una montaña, se obtendrían niveles de interferencia similares. En este caso, el terminal a bordo de los aviones sería equivalente a los usuarios que estén en lo alto de una montaña próxima a una población densificada.

7.2 Análisis y aplicación de métodos convencionales de optimización

En este apartado se describen tres ejemplos de optimización convencionales realizados de forma manual, que tienen en común los siguientes procesos:

- identificación del problema
- toma de datos y análisis de medidas
- aplicación de cambios propuestos en los parámetros o sistemas radiantes
- análisis del resultado
- reinicio del proceso si los resultados no son satisfactorios

Este método de trabajo puede resultar eficaz para resolver problemas muy localizados en las redes de telefonía móvil, pero se vuelve tremendamente complejo y costoso cuando se trata de una zona con gran densidad de usuarios y con niveles altos de interferencia, en los que además es necesario tomar decisiones rápidamente. En este contexto cobra sentido las técnicas automáticas de optimización vistas en el Capítulo VI.

No obstante, las pruebas que aquí se muestran constituyen un camino natural previo para entender en qué consiste el problema de optimización de red móvil, y la dificultad que tiene cuando se extiende a una red mucho más amplia.

7.2.1 Optimización de células basada en la minimización de la ventana

Detected Network

En UMTS es posible que un terminal esté conectado simultáneamente a más de una célula. Este tipo de handover se denomina soft-handover (soft-HO: cuando las células pertenecen a emplazamientos diferentes) o softer-HO (cuando las células pertenecen al mismo emplazamiento). El móvil es capaz de medir la calidad (E_c/N_o) o potencial de la señal (RSCP) del CPICH de las células que le rodean. El conjunto de células que forman parte del soft-HO se denomina AS (Active Set). Cuando el piloto de una célula circundante se detecta por encima de un umbral, definido como una ventana respecto a la mejor servidora denominada ventana de soft-HO, se debe incluir esta nueva célula dentro del AS. Si el AS está lleno, puede ser necesario eliminar primero una célula ya existente antes de introducir una nueva. El tamaño de la ventana AS es 3 para la mayoría de las redes 3G [2].

El resto de células colindantes que se están midiendo, pero que están fuera de la ventana de AS, se encuentran en la ventana MS (Monitored Set). Pero en algunas ocasiones, hay células que se están recibiendo con niveles similares a las del AS o MS que no fueron definidas como colindantes en la OSS. Estas células se agrupan dentro de la ventana DN (Detected Network) y generalmente se deben a sobrealcances o a una incorrecta definición de colindancias.

En el caso de que una célula del DN tenga un nivel de RSCP superior a una célula del AS más un cierto umbral, se produce la desconexión de la llamada. Este umbral es un parámetro definido por el operador, siendo un valor típico en los inicios del despliegue de 9dB (este valor fue tomando valores distintos posteriormente).

Para minimizar la ventana DN con el objeto de reducir el índice de llamadas caídas, se debe estudiar en detalle las células que la componen. En algunos casos puede ser necesario aumentar la inclinación de la antena para reducir el sobrealcance. Pero en otros, puede ser necesaria la definición de la colindancia [3]. Mediante simulaciones [4] es posible realizar varios cálculos de cobertura y capacidad de la red, modificando en cada paso de iteración diferentes parámetros de antenas o de distribución de tráfico. De esta manera, es posible ajustar el diseño inicial y llegar a una solución para vaciar la ventana DN. Dada la importante relación entre cobertura y capacidad en un sistema 3G, se hace imprescindible llevar a cabo una estimación de la distribución de tráfico que soportará el sistema. En el contexto de simulaciones de sistema de redes móviles, los mapas de tráfico son matrices que determinan de forma probabilística las posibles ubicaciones de los usuarios en la zona bajo estudio.

En este apartado se muestra el proceso de optimización descrito y los resultados obtenidos en la red UMTS de Telefónica en un escenario urbano en Tenerife. Para clasificar las células que más llamadas caídas tienen por la ventana DN, se activó un trazo de célula y se analizaron unos eventos específicos que se disparan cuando el móvil informa de una vecina que no tiene ninguna celda del Active Set definida como colindante. Con eso, se obtiene una lista de células que están en la ventana DN.

El escenario de pruebas elegido se encuentra en la isla de Tenerife (Figura VII.29). El objetivo era optimizar el porcentaje de llamadas caídas de las tres células de una estación base nueva que comenzaba a dar servicio, y que partía con una configuración elemental de parámetros, listas de colindancias y sistema radiante. Del primer análisis se obtuvo un elevado porcentaje de caídas por DN.

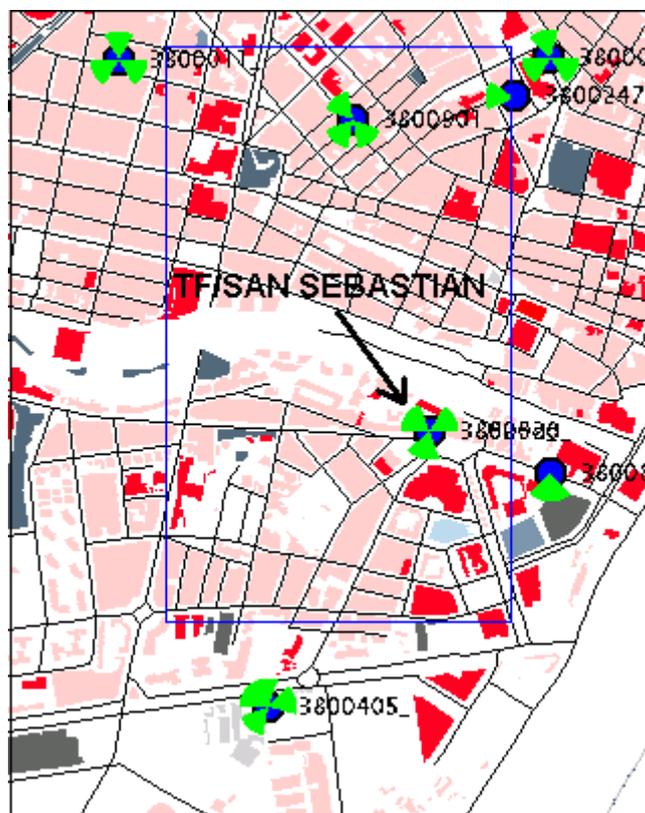


Figura VII. 29 Escenario de pruebas

El objetivo de las simulaciones consiste en analizar la evolución de la capacidad de la red en función de un posible crecimiento de tráfico, comparando la configuración actual de la estación base (con cierta dominancia sobre las demás) con otra de menor alcance. Para determinar cuál debe ser el área de cobertura de la célula, se realizaron dos grupos de simulaciones. Para el primer grupo se consideró la configuración de downtilt de antena actual. Para el segundo grupo se aumentó el downtilt.

Las simulaciones se realizaron con una herramienta desarrollada por Telefónica I+D, se utilizó el modelo de propagación COST-231 y se basaron en mapas de tráfico a partir de estadísticas de tráfico real. Los mapas de tráfico son matrices que determinan de forma probabilística las posibles ubicaciones de los usuarios en la zona bajo estudio. Esta información es requerida para la simulación de la red, dado que condicionan los niveles de interferencia, recursos utilizados en las células, y en definitiva, la prestación de un servicio de calidad.

El mapa de tráfico es una matriz bidimensional de pesos que se utiliza para calcular las posiciones de los usuarios de en la red, tal y como se ilustra en la Figura VII.30.

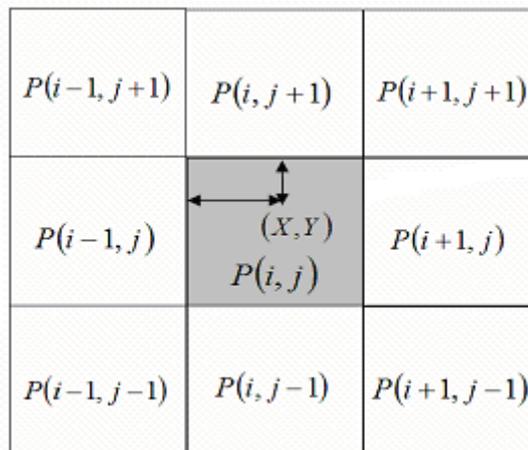


Figura VII. 30 Matriz para determinar la posición de los usuarios

Se define una probabilidad de que un usuario esté en un píxel (probabilidad de píxel), según la relación de pesos entre ese píxel y todo el mapa, y dentro de dicho píxel la posición del usuario se elige de forma aleatoria, según la siguiente ecuación, de este modo, la herramienta trabaja con mapas de tráfico con valores de usuarios (pesos) por píxel, según la siguiente expresión:

$$p_{ij} = \frac{P(j, j)}{\sum_{m, n} P(m, n)}$$

Para llevar a cabo las simulaciones de la red 3G en los escenarios definidos en la aplicación, es necesario definir los valores de tráfico asociados a los mapas de distribución de tráfico creados a partir de la matriz de posición. Los valores almacenados en el fichero de distribución de tráfico son interpretados como pesos

relativos por el núcleo de simulación, es decir, que el tráfico total ofrecido en cada punto del mapa se calcula según la siguiente ecuación:

$$trafico_i = \frac{valor_i}{\sum_j valor_j} Tf$$

Esto significa que el valor (peso) del punto en cuestión es dividido entre la suma de los pesos de todo el mapa multiplicado por el tráfico total (T) ofrecido en el mapa y a su vez multiplicado por el factor de escala (f), asociado a los parámetros de entrada de la simulación. Para llevar a cabo este dimensionamiento, se define, en una determinada zona de simulación, los servicios locales que se cursarán. Para estos servicios locales, implementados a partir de los servicios globales diseñados en la herramienta, es para los que se incluyen los valores de tráfico o usuarios que se considerarán en el escenario y que determinarán los valores de partida de las simulaciones 3G.

Para estimar la degradación de la capacidad de ofrecer servicio conforme aumenta su demanda, se realizaron dos simulaciones con diferentes densidades de usuarios. La Figura VII.31 representa el número de muestras o lugares de la célula, en función de la probabilidad de que dicha célula pueda ofrecer servicio a los terminales, para el downlink y con una inclinación pequeña de antena de 2°. Se puede observar que, para una densidad de usuarios alta, disminuye el número de muestras donde existe un 100% de probabilidad, debido a un aumento de la interferencia intercelular entre las células. En la Figura VII.32 se muestran los valores de E_c/N_0 en la simulación.

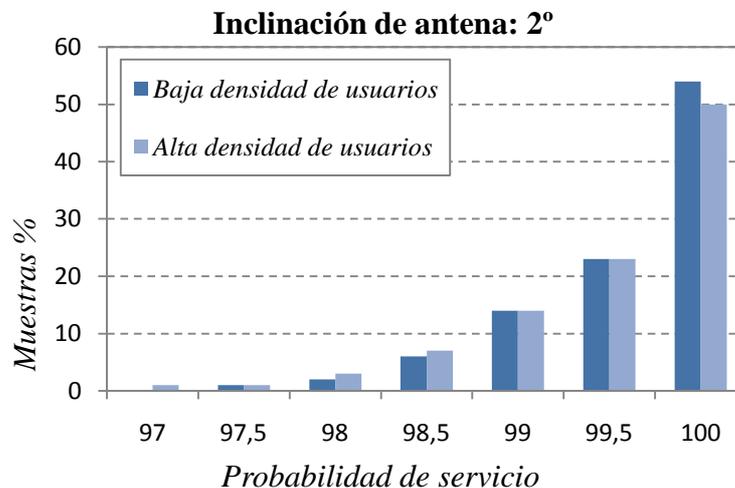


Figura VII. 31 Probabilidad de servicio para 2° de inclinación de antena

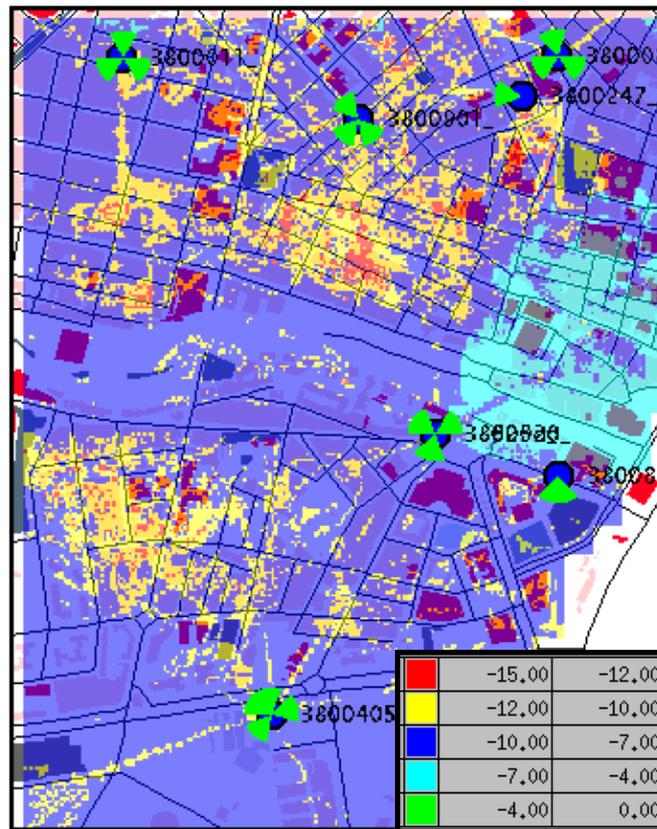


Figura VII. 32 Simulación de Ec/No para 2° de inclinación de antena

La siguiente prueba se realizó con un aumento de la inclinación de la antena hasta los 10°, con lo que se reduce el alcance de las tres células de la estación. Con esta configuración, el número de muestras para el 100 % de probabilidad de que la célula pueda ofrecer servicio se mantiene igual, según la Figura VII.33. El mapa de Ec/No para una alta densidad de tráfico se muestra en la Figura VII.34.

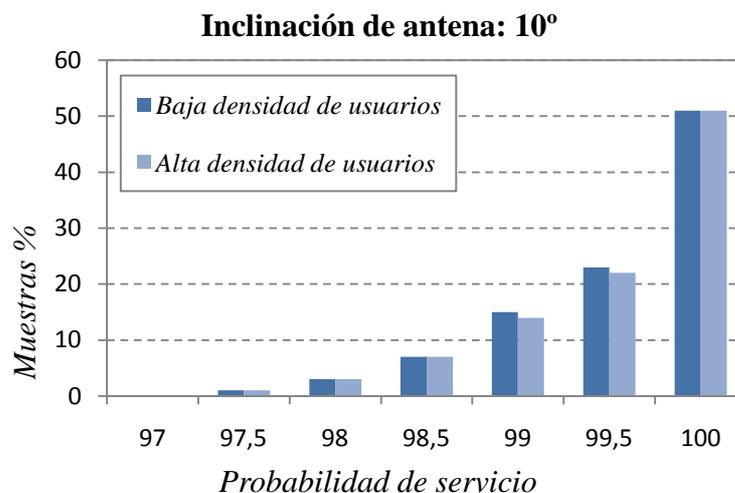


Figura VII. 33 Probabilidad de servicio para 10° de inclinación de antena

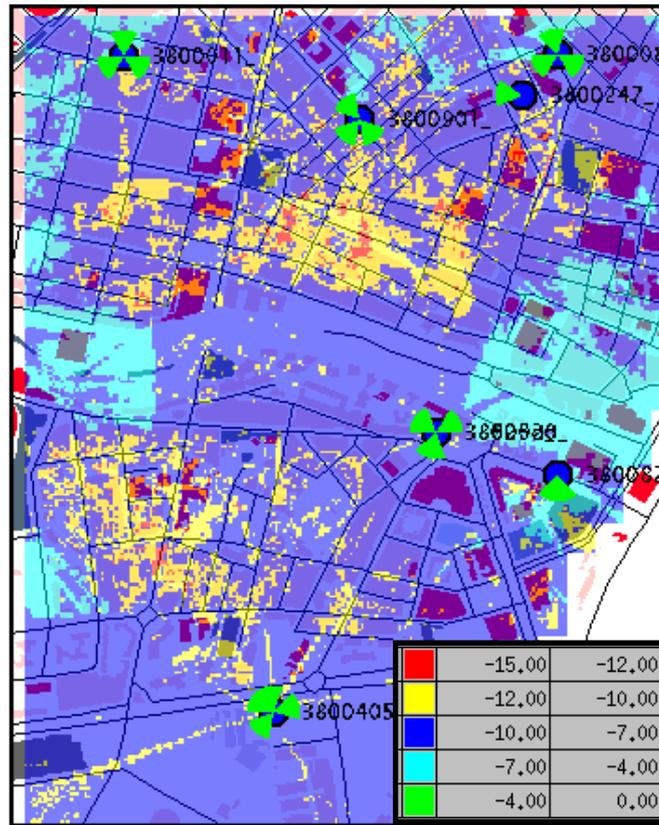


Figura VII. 34 Simulación de Ec/No para 2° de inclinación de antena

La conclusión que se obtiene es que la célula disminuye su capacidad de ofrecer servicio cuando aumenta la densidad de usuarios en el caso de que esta tenga un alcance mayor (inclinación 2° frente a 10°). Es decir, que la probabilidad de que todos los usuarios sean servidos (100 %) es variable si existe mayor solapamiento con las células colindantes, debido a su interferencia mutua. En base a estos resultados, se concluye que para minimizar las llamadas caídas por Detected Network, es mejor reducir el alcance de las células, inclinando las antenas hasta los 10°, que mantener el sobrealcance y definir nuevas colindancias.

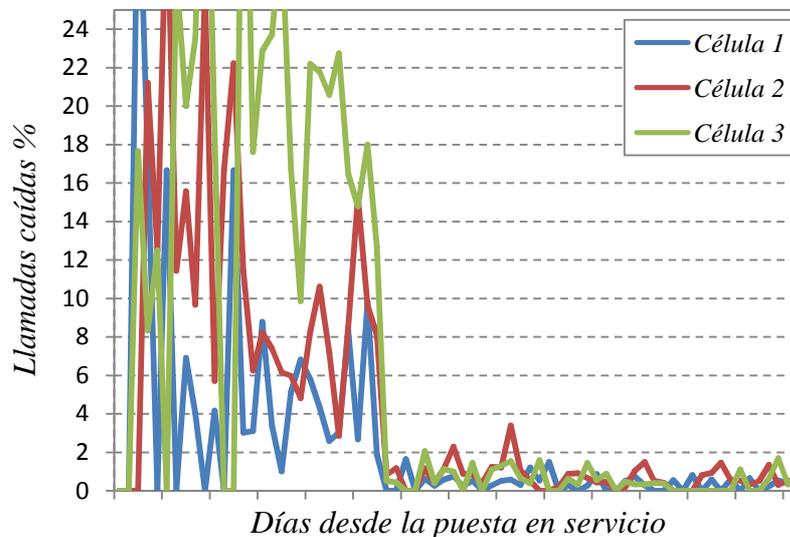


Figura VII. 35 Evolución del porcentaje de llamadas caídas

En la Figura VII.35 se muestra la evolución de las llamadas caídas para las tres células optimizadas, desde la primera puesta en servicio tras su instalación. La mejora es notable a partir del cambio de configuración de antenas.

7.2.2 Optimización de la capacidad de un clúster de células mediante la inclinación de antenas

En el apartado anterior se mostró la optimización de tres células aisladas de una estación base que entró en servicio por primera vez, sin analizar el efecto que produce en las células colindantes. Debido a la interferencia mutua entre todas las estaciones base que se encuentran en una zona o clúster y a que el cambio de configuración de una célula tiene efectos en las que le rodea, se llevaron a cabo las pruebas que se muestran en este apartado, donde se optimizó de forma conjunta la capacidad de una zona.

El escenario bajo estudio es el polígono industrial San Jerónimo y la zona comercial de la Villa de la Orotava (Tenerife), indicada con el contorno amarillo en la Figura VII.36. En el exterior hay una estación base dominante (D), otra en el polígono (P), otra más en la zona comercial (C) y una en el exterior en el pueblo de la Vera (V).

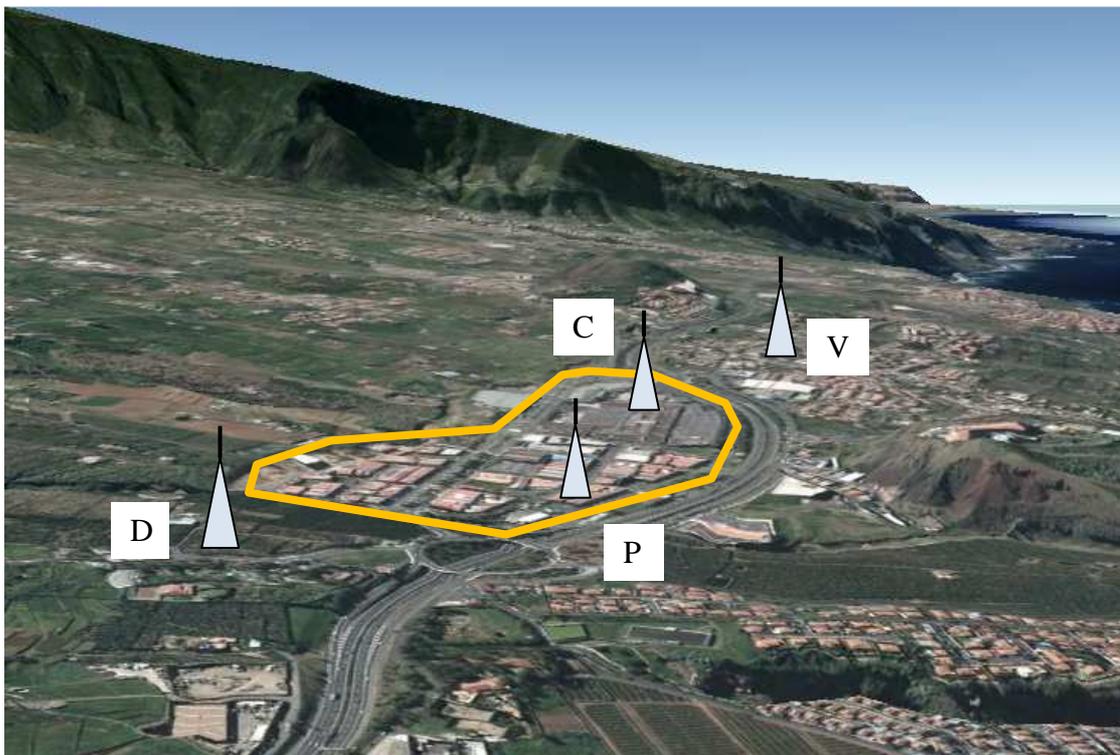


Figura VII. 36 Ubicación de las estaciones base en la zona de estudio

La estación base D tiene tres células de las cuales D1 cubre un área muy amplia debido a que se encuentra sobre una torre y a una cota mayor sobre el terreno respecto del resto. La estación base P tiene dos células P1 y P2, mientras que C tiene tres células C1, C2 y C3, y V que tiene tres células de las que V1 está orientada hacia la zona comercial. En la Figura VII.37 se muestra la configuración descrita.

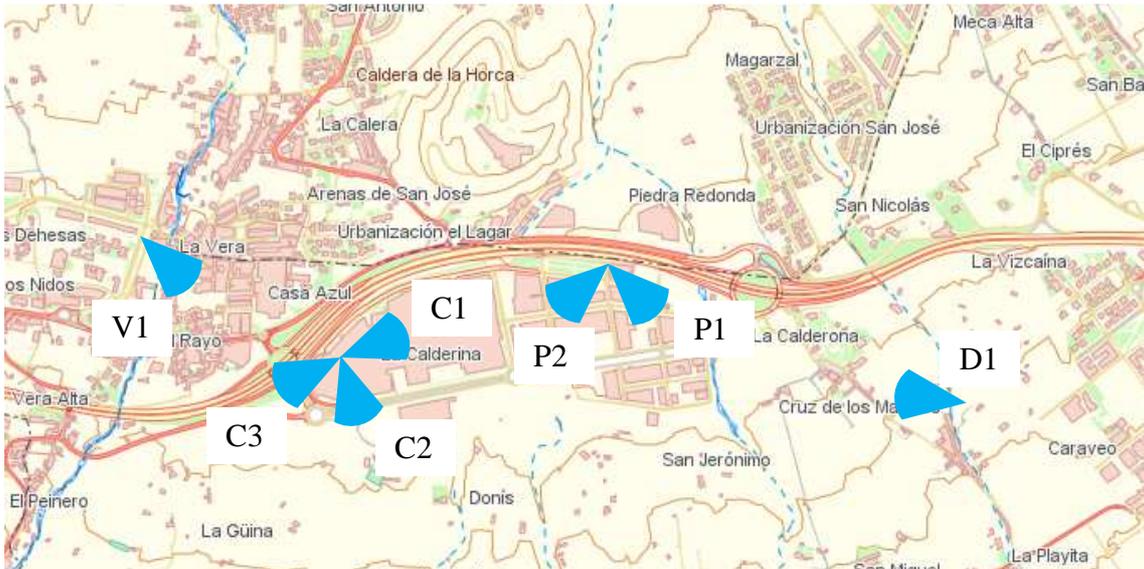


Figura VII. 37 Configuración de las células del escenario

El análisis de los KPIs de la célula D1 mostraron un elevado nivel de tráfico de voz y datos, así como algunos momentos al día con saturación. Una estimación inicial hacía prever que la causa era la elevada cota y dominancia de D1 sobre el resto de células como se puede ver en la fotografía de la Figura VII.38 tomada a pie de torre, por lo que el estudio comenzó con una medida de campo de la zona siguiendo la ruta de la Figura VII.39.



Figura VII. 38 Vista del escenario desde D1 a pie de torre



Figura VII. 39 Ruta de medida

Para una primera inspección visual de la medida realizada, se representó gráficamente en la aplicación con el carácter **I** el valor de la Ec/No, con el carácter **R** el valor de RSCP, y con **▲** el número de células en Soft Handover, es decir, que están en la ventana de Active Set como se explicó en el apartado 7.2.1. El aspecto que se obtiene se muestra en el ejemplo de la Figura VII.40, donde se puede ver que el móvil está midiendo un valor de Ec/No entre -8 y -15 dB, un valor de RSCP entre -85 y -100 dBm, y tiene en el Active Set tres células a la vez. Las líneas rojas representan para cada muestra de medida, la o las células de mayor potencia que está recibiendo en ese momento.

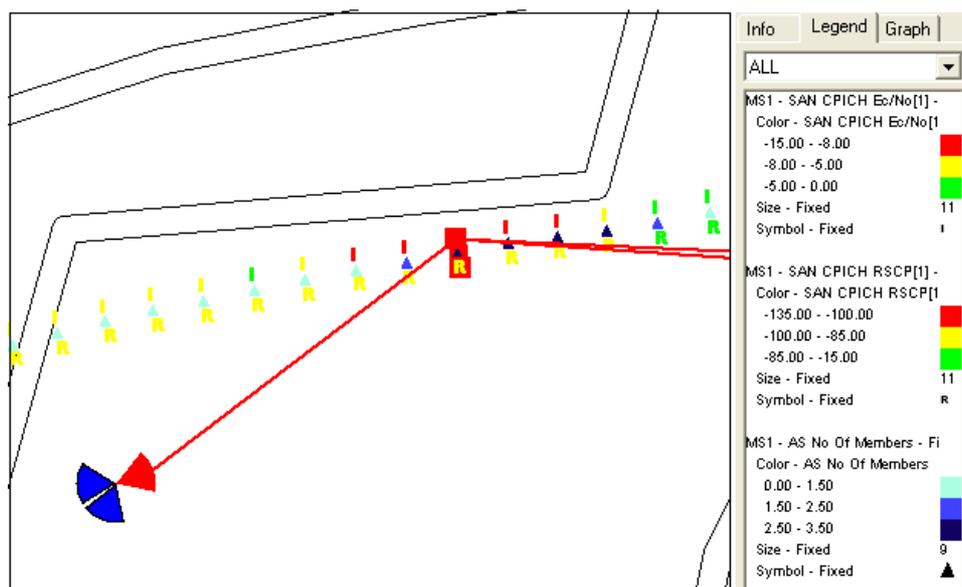


Figura VII. 40 Ejemplo de medida en un punto

La medida inicial se muestra en la Figura VII.41, donde se ha marcado las áreas donde existe solape con la célula dominante D1 detectadas tras un primer análisis.



Figura VII. 41 Resultado de la medida inicial

En la Figura VII.42 se representa el porcentaje del número de muestras en las que el terminal de medidas recibe con mayor potencia a cada una de las células del escenario bajo estudio. En esta gráfica se ve con mayor claridad la dominancia que tiene D1 sobre el resto.

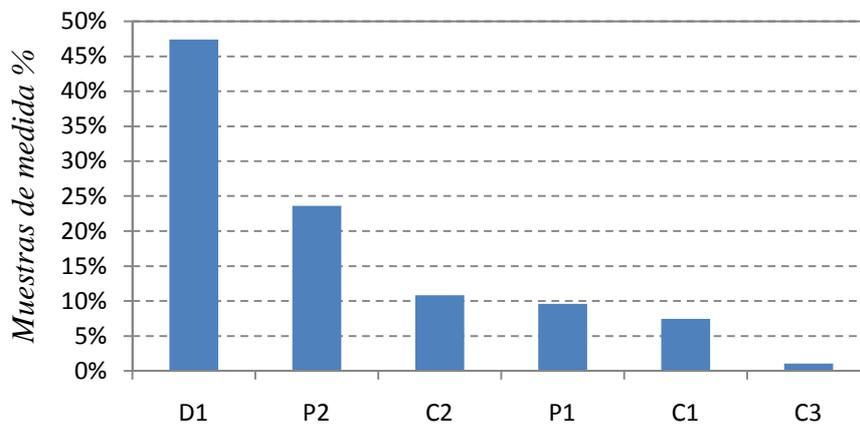


Figura VII. 42 Distribución de células con mayor potencia

El proceso natural de despliegue de una red comienza con unas pocas células que proporcionan grandes áreas de cobertura. Según se va densificando la red y entra en servicio nuevas células, es necesario reducir el área de cobertura de las más dominantes para formar una estructura celular adecuada. En este caso, la estación base D fue la primera en entrar en servicio en la zona. La situación actual del escenario bajo estudio presenta dos nuevas estaciones base P y C que se encuentran solapadas por D según se ha demostrado. La siguiente fase consiste por tanto en delimitar el área de servicio de D1 mediante la inclinación de antenas. El resultado de la medida se muestra en las

figuras VII.43 y VII.44, donde se observa un menor solapamiento de D1 sobre las demás, pasando



Figura VII. 43 Resultado de la medida tras la inclinación de la antenna D1

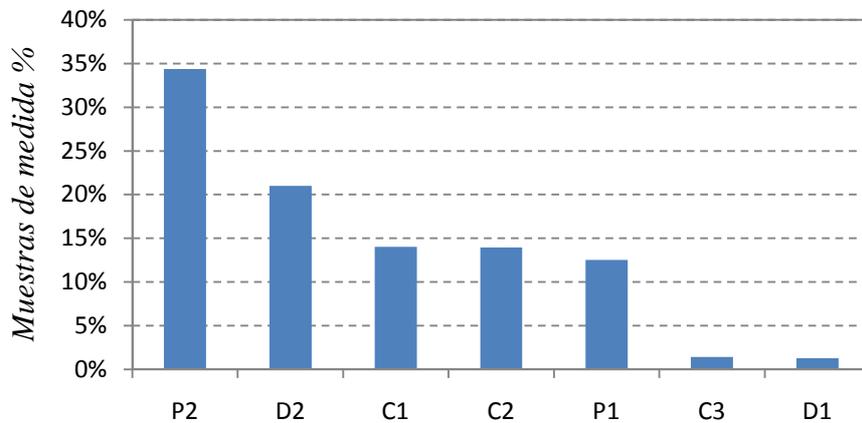


Figura VII. 44 Distribución de células con mayor potencia tras la inclinación de la antenna D1

El resultado muestra que D1 ha dejado de ser dominante sobre la zona, pasando a ser las células de las estaciones base P y C como las que mayor servicio ofrecen. Como efecto indeseable aparece el sector D2, que aumenta su presencia en la medida. La causa es que la antenna instalada no permite la inclinación eléctrica, sino mecánica, por lo que los lóbulos laterales y traseros están radiando con mayor potencia que la antenna D1 (ver Capítulo III), y a la elevada altura sobre el terreno que tiene. En la Figura VII.45 se muestra la presencia que tiene D2 sobre la medida.

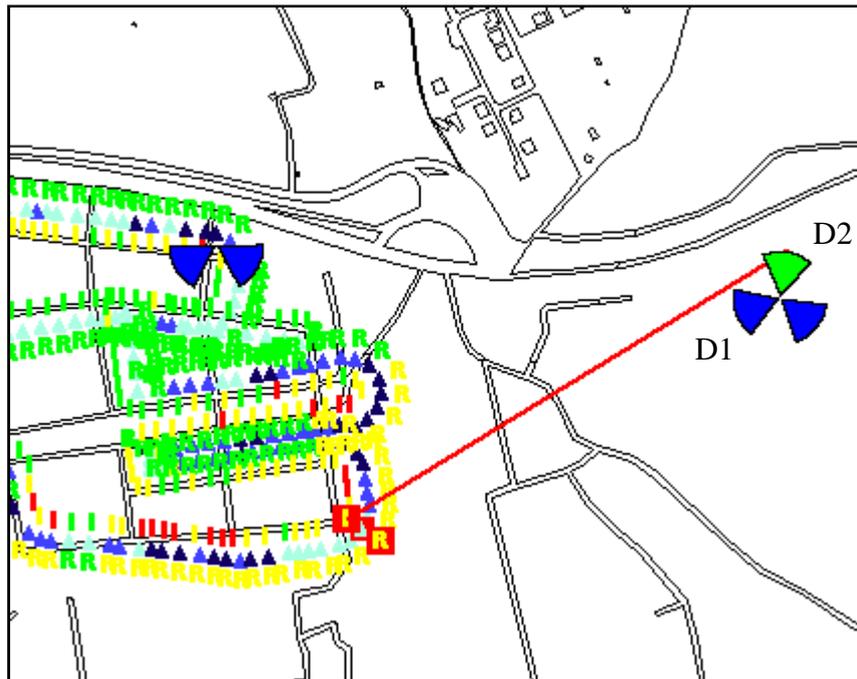


Figura VII. 45 Presencia de la célula D2

Este efecto es un ejemplo más de relación e interferencia mutua que se produce en las redes celulares, donde la modificación de un parámetro o sistema radiante tiene relación directa, en proporción altamente no lineal, en el resto de células colindantes. No obstante, se ha logrado reducir la presencia de D1, que tenía elevado tráfico, sobre la zona de optimización, como se muestra en la Figura VII.46. El resultado es que se ha aumentado las áreas del escenario que ahora son servidas por las estaciones base P y C como primeras células con mayor potencia, que además fueron construidas con este fin.

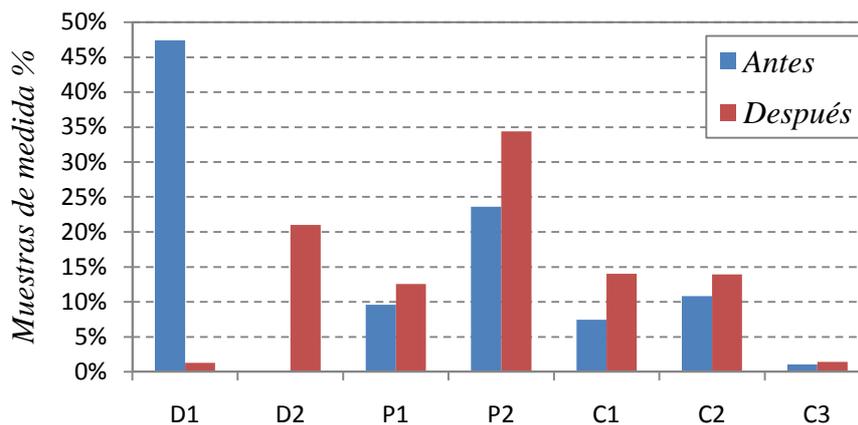


Figura VII. 46 Reducción de D1 y aumento de P y C

Los valores de RSCP obtenidos se muestran en la Figura VII.47. Como se puede observar, se produce un poco de dispersión tras la optimización, pero se alcanzan mejores valores de señal recibida por el terminal (-40 dBm) en algunas zonas.

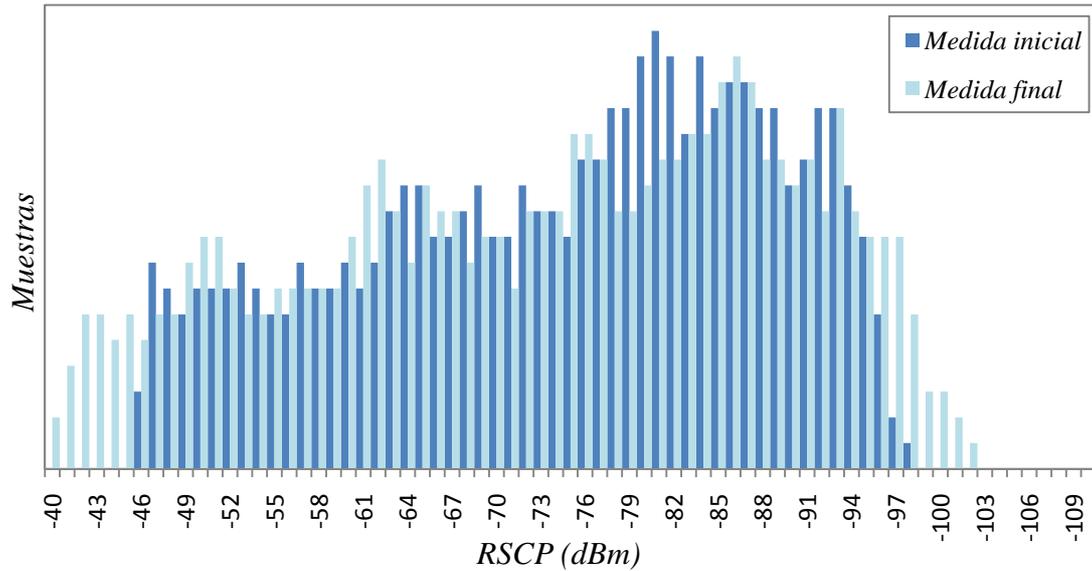


Figura VII. 47 Dispersión de valores RSCP medidos

Los valores de interferencia E_c/N_0 también mejoran para los valores entre -3,0 dB y -5,5 dB, como se muestra en la Figura VII.48.

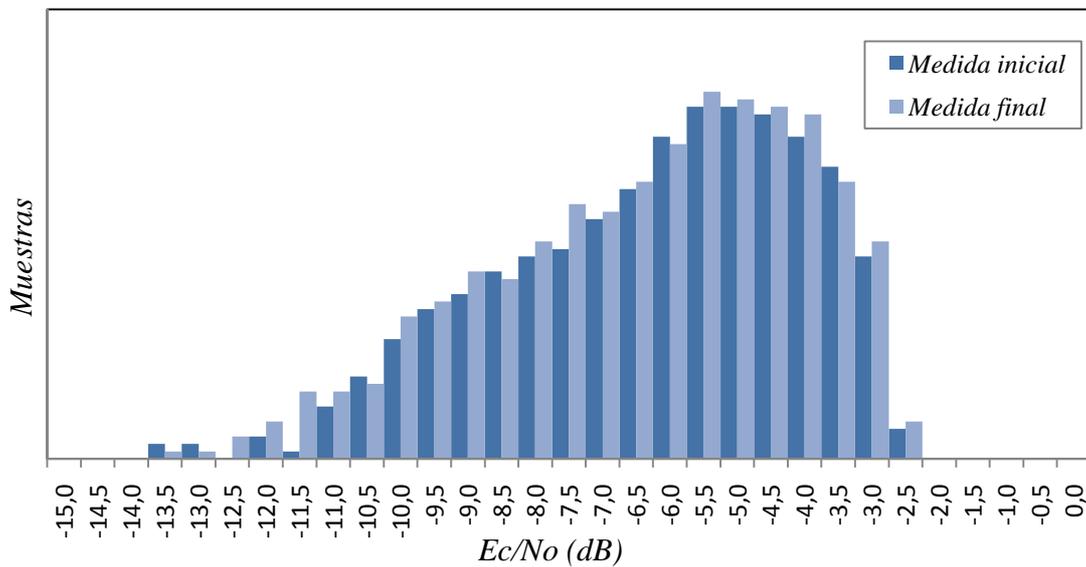


Figura VII. 48 Dispersión de valores E_c/N_0 medidos

La optimización llevada a cabo supuso una disminución de tráfico de voz de la célula D1 de un 30 % (Figura VII.49), y una disminución del tráfico de datos del 47 % (Figura VII.50), por lo que se logró una mejora en la capacidad de la célula.

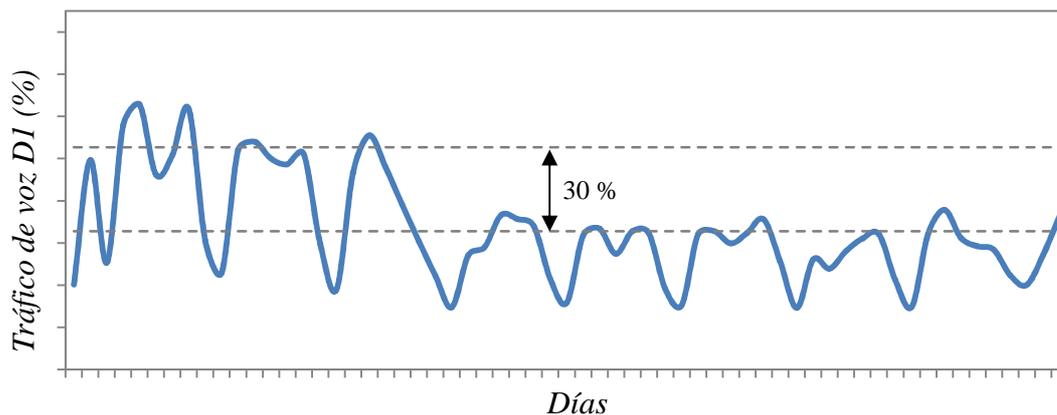


Figura VII. 49 Disminución del tráfico de voz de D1

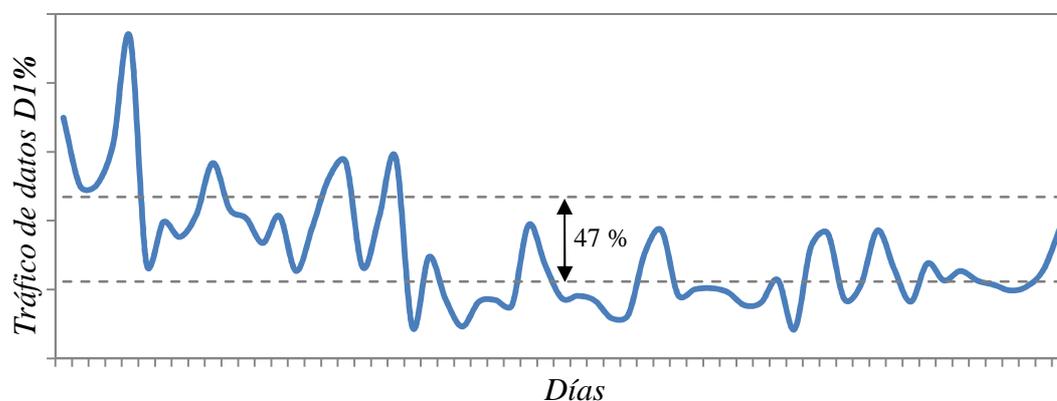


Figura VII. 50 Disminución del tráfico de datos de D1

7.2.3 Optimización de la capacidad de un clúster de células mediante la variación de la potencia del canal piloto CPICH

La degradación de la relación portadora a interferente, que implica una disminución de la capacidad del sistema, se corrige normalmente con el análisis de los KPIs y con el estudio de las medidas de campo (drive-test) para detectar sobrealcances, como hemos visto en los ejemplos anteriores de este capítulo. El resultado suele ser un programa de cambio de inclinaciones y azimut de las antenas para adecuar las áreas de cobertura a las necesidades de los clientes, con un coste asociado al desplazamiento y actuación en las antenas por personal cualificado. En otras ocasiones se optimiza el mecanismo de Soft Handover y la configuración de células colindantes mediante diferentes técnicas.

El archipiélago canario ofrece ciertas dificultades orográficas y de densidad de usuarios para las redes de telefonía móvil, en las que los procesos de optimización comentados han llegado prácticamente a su límite, donde es muy difícil ya mejorar los KPIs de forma significativa. Del estudio teórico de los trabajos publicados por otros autores (comentados en el Capítulo II), se propone hacer una evaluación en la red real de la capacidad y la cobertura en función del CPICH, en aquellas zonas con alta carga de usuarios, con el objeto de conocer su efecto en los KPIs.

En este apartado se muestra la evaluación realizada en la red en función de los cambios de CPICH. Los escenarios en los que se realizará la evaluación contienen al menos una estación base con alta carga, por lo que previamente a su elección se analizaron los KPI. Luego se procedió a validar los cambios propuestos mediante simulaciones que serán evaluados en la red real, presentando al final del capítulo los resultados.

7.2.3.1 Definición de KPIs y elección de escenarios

La capacidad de una red UMTS depende, entre otros, de la disponibilidad de los siguientes recursos radio, los cuales están reflejados en los KPIs:

- a) *Códigos*: existe un número limitado de códigos por cada SF (Spreading Factor).
- b) *Potencia consumida en el downlink (DL)*: el nodo B dispone de una potencia que debe repartir entre todos los móviles conectados a esa célula.
- c) *Interferencia en DL y UL*: el WCDMA es un sistema limitado por interferencia, cada móvil introduce un ruido adicional al resto de móviles, el sistema se vuelve inestable si este ruido supera un cierto umbral de carga.
- d) *Usuarios de High Speed Data Paquet Acces (HSDPA) y Enhanced Up Link (EUL) con RAB asignado*: existe un límite de usuarios por software y capacidad por hardware.

Cada usuario conectado a una célula realiza un consumo diferente de recursos radio en función del tipo de tráfico o RAB (*Radio Acces Bearer*, tipo de enlace radio entre dos puntos), carga de la red y entorno radio. Además, su consumo puede variar a lo largo del tiempo en función de las condiciones del canal radio o del uso del canal de tráfico. Cuando un móvil pide un servicio a la red, no es posible saber a priori la interferencia exacta que va a introducir en uplink o en downlink. El sistema, en base a medidas y simulaciones, asigna un nivel de interferencia medio a cada tipo de conexión. Esta interferencia se mide en ASE (Air interface Speech Equivalent, para Ericsson). Este valor se entiende como el incremento de interferencia que añadiría una conexión de voz (sin incluir la señalización asociada). Es proporcional a la velocidad de transmisión de la información en el enlace radio.

Un problema de falta de recursos se va a traducir en una mala calidad percibida por el usuario. Esta mala calidad se refleja tanto en la capacidad del usuario en poder establecer la conexión, como en la calidad de la misma (bajo throughput) o en la capacidad de mantener la llamada, por ejemplo porque no se puede hacer un HO, no hay potencia suficiente para mantener la llamada, o esta se debe terminar por el control de congestión. Previamente a esta situación extrema, el control de congestión tratará de bajar la tasa binaria de la comunicación establecida (llamado *Down-switch*).

Hay tres posibles causas por las que una célula UMTS puede tener alta carga radio, según se dé en el uso de códigos, por la potencia y por el uso de HSDPA. Se analizan dos periodos consecutivos de 14 días (de lunes a domingo). Cada una de las causas por las que puede haber congestión tiene una condición, que si se cumple entre 5 y 9 días de cada periodo, hace que la célula tenga un nivel medio de congestión, y si se cumple en 9 ó más días el nivel es elevado. Para analizar si un nodo B está congestionado se estudia el uso de hardware, teniendo en cuenta el uso de elementos de canal en uplink y en downlink. Se estudia, para cada nodo B, dos periodos consecutivos de 14 días (de lunes a domingo). Si la carga de hardware supera el umbral

correspondiente entre 5 y 9 días de 14, para cada uno de los periodos, el nodo tiene un nivel medio de congestión, y si lo supera en 9 ó más días de 14, en dos periodos consecutivos, entonces tiene nivel elevado. Analizando los KPI anteriores en las células de la isla de Tenerife, se determinan los siguientes escenarios sobre los que hacer la evaluación.

Escenario A: zona baja de Santa Cruz de Tenerife

Este escenario se ha elegido por tener tres células con niveles de interferencia en Uplink superior al resto de células que le rodean, superando -100 dBm, como se muestra en la Figura VII.51 (denominadas A, B y C).

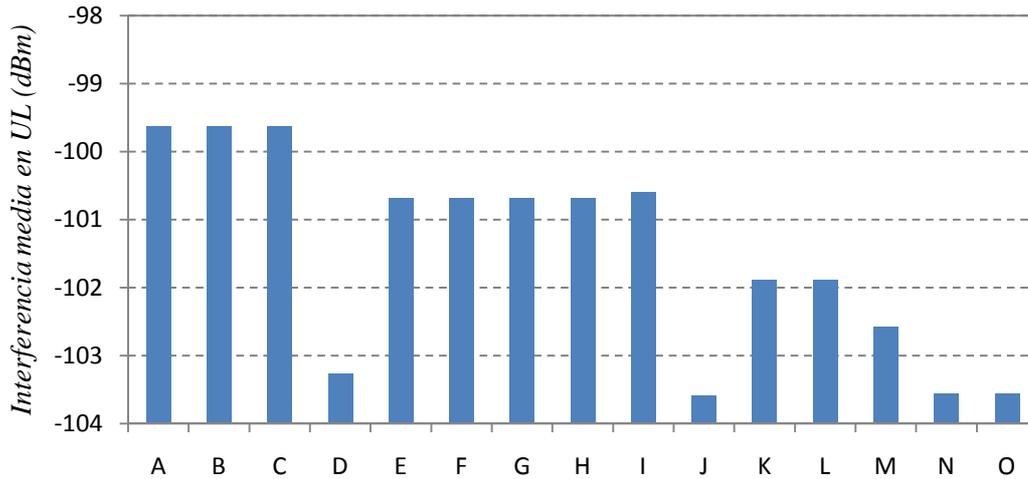


Figura VII. 51 Interferencia media en Uplink en A (dBm)

El escenario corresponde con la zona baja de Santa Cruz de Tenerife, con elevada densidad de tráfico y de células. El terreno tiene una pendiente constante en dirección hacia la Cuesta, con un grupo elevado de usuarios en posición dominante en el barrio de Ifara, La Salud y Barrio Nuevo, como se muestra en la Figura VII.52.

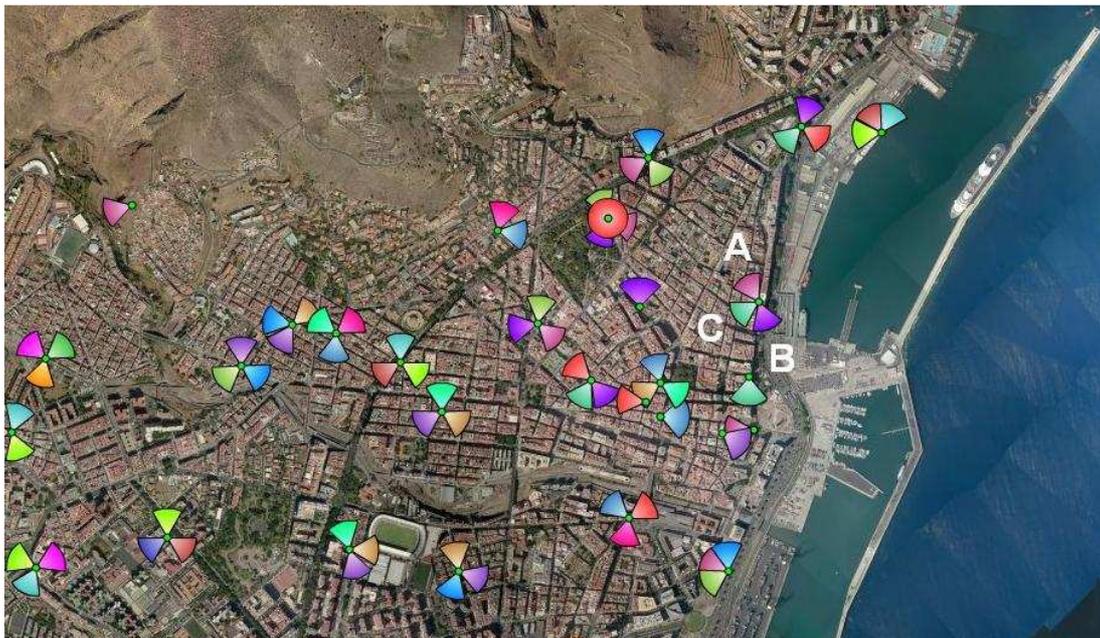


Figura VII. 52 Escenario A: parte baja de Santa Cruz.

Escenario B: centro de La Laguna

En este escenario hay varias células con alta carga. Como se ve en la Figura VII.53, las células D, E, H y O destacan por el elevado número de Down-switch ejecutados por el control de congestión. El número de ASEs también es elevado para las células D y E, como muestra la Figura VII.54. Y la potencia media en Downlink también es superior para las células F, G y H (pertenecientes al mismo Nodo B) y para N y O, como muestra la Figura VII.55.

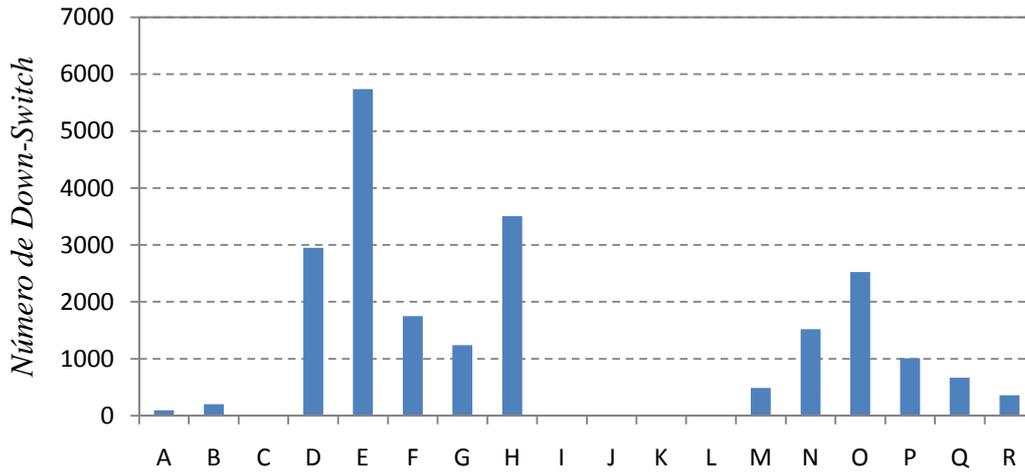


Figura VII. 53 Número de Down-Switches en el escenario B

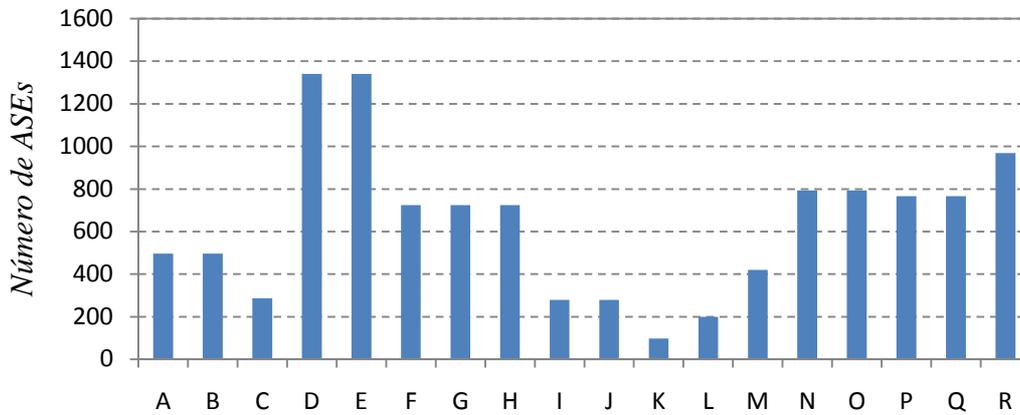


Figura VII. 54 Número de ASEs en el Escenario B

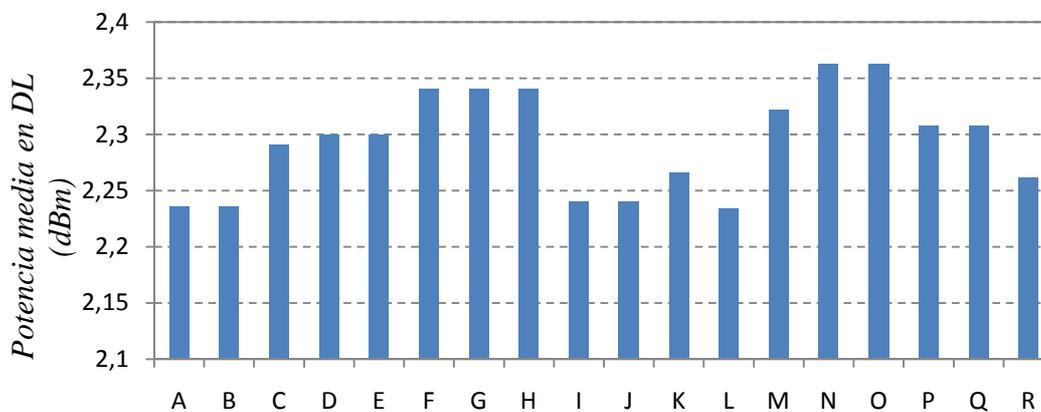


Figura VII. 55 Potencia media en Downlink (dBm)

El escenario corresponde con el centro de La Laguna, que tiene gran densidad de usuarios, pero menos células que en Santa Cruz de Tfe., como se ve en la Figura VII.56.



Figura VII. 56 Escenario B: casco urbano de La Laguna

Escenario C: la Orotava

En este caso destacan las células E y F en el número de Downswitch y ASEs, como se muestran en las figuras VII.57 y VII.58 respectivamente.

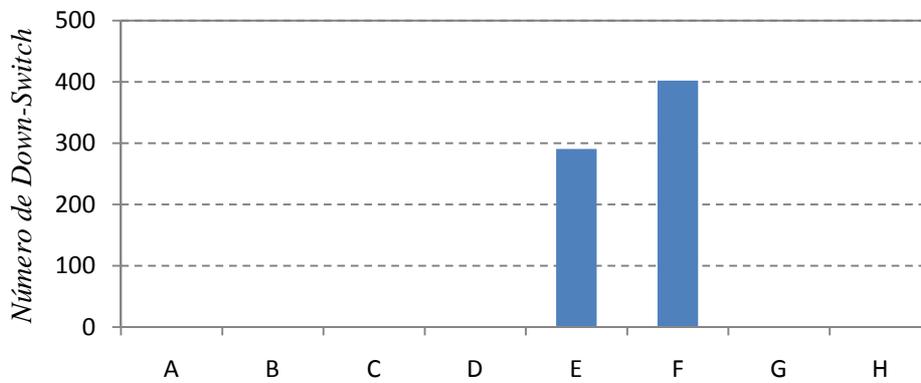


Figura VII. 57 Número de Down-Switchs en el escenario C

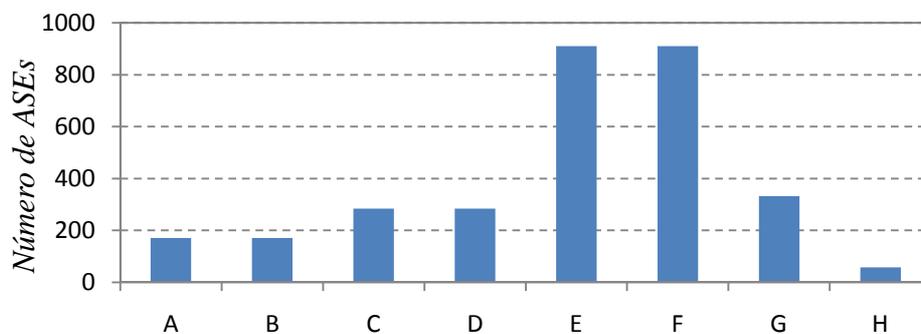


Figura VII. 58 Número de ASEs en el Escenario C

El escenario se caracteriza por una elevada altitud de las células y gran densidad de usuarios en el Puerto de la Cruz y Los Realejos (Figura VII.59).



Figura VII. 59 Escenario C: centro de La Orotava

7.2.3.2 Validación de escenarios

Para validar los escenarios elegidos se realizó una simulación de cada uno de ellos con la herramienta X-ACP de Optimi, con el objeto de conocer si las variaciones propuestas en el CPICH tendrán efecto en la carga de la red. El primer paso consiste en cargar la cartografía del terreno. En el segundo paso se carga toda la información física de las células, entre las que destacan el tipo de antena, sus patrones de radiación, azimut, inclinación, altura de antena, y potencia de emisión. Luego se importa la capa del Clutter, que representa la distribución de los usuarios en función del peso que se asigna a cada pixel. El conocimiento de la zona por parte del ingeniero de red es importante para esta asignación.

Con la información cargada, se procede a calcular las pérdidas de propagación en vacío mediante el modelo Lee para entornos urbanos, resultando un mapa como el de la Figura VII.60 para el escenario A. Posteriormente, para calcular la carga de la red, se distribuye la información de tráfico de cada célula importada del OSS, en función de estas pérdidas y del Clutter de tráfico.

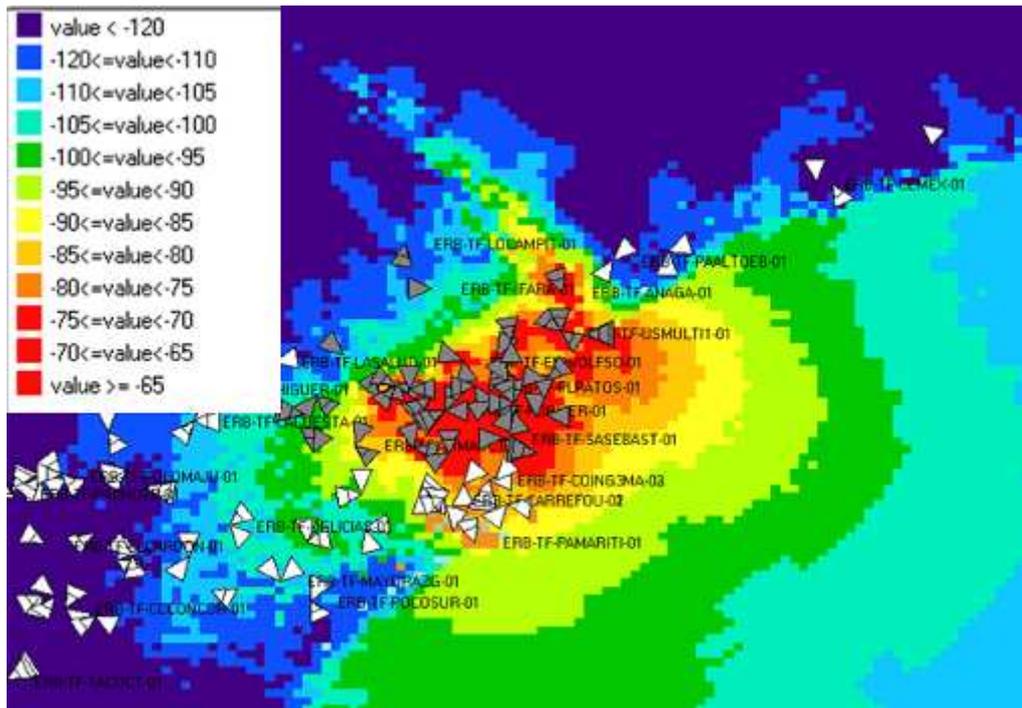


Figura VII. 60 Valores estimados de señal en dBm para el Escenario A

Estos pasos se repitieron cambiando los valores de CPICH de las células elegidas, a los valores 31 dBm, 30 dBm y 29 dBm. Los resultados son los siguientes.

Simulación del escenario A

En la Figura VII.61 se muestra el histograma del valor del RSCP, en la Figura VII.62 el valor de E_c/N_0 y en la Figura VII.63 se muestra el número de células servidoras solapadas que corresponde con la probabilidad de hacer Soft Handover (SHO).

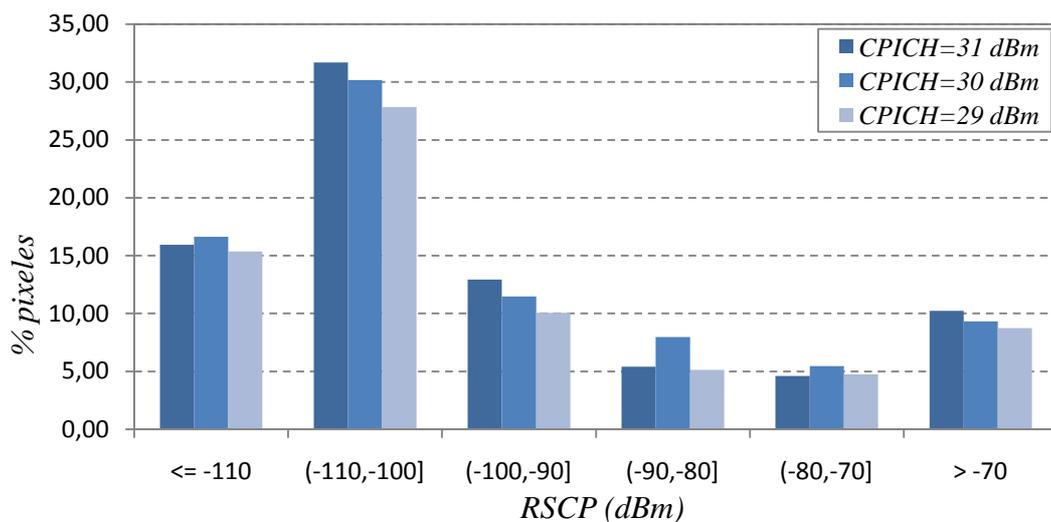


Figura VII. 61 Valores de RSCP para el Escenario A

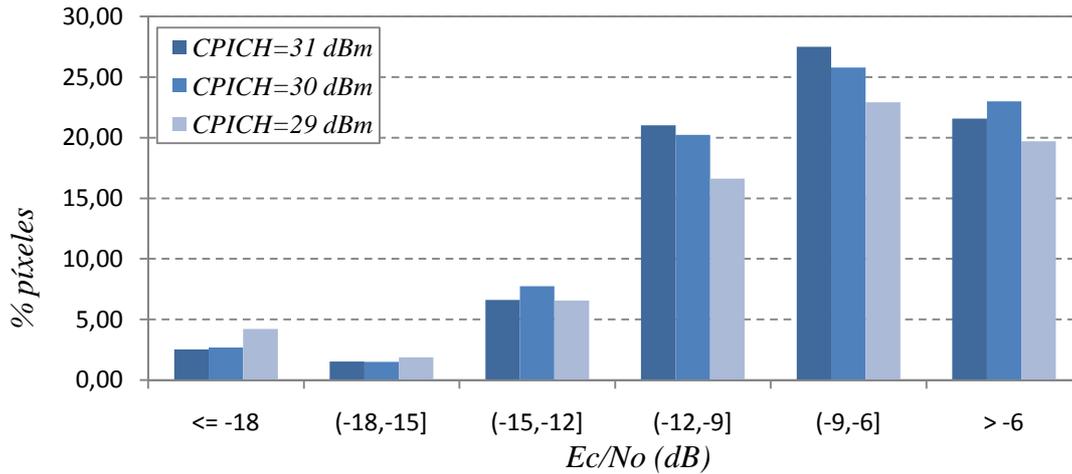


Figura VII. 62 Valores de Ec/No para el Escenario A

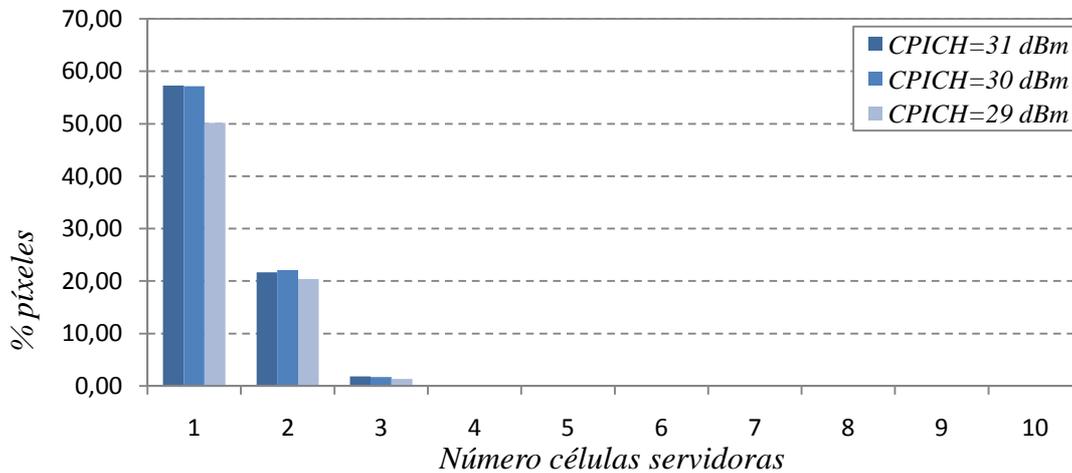


Figura VII. 63 Número de servidores para el Escenario A

Se observa que para con el CPICH emitiendo a 31 dBm, se obtienen valores altos de RSCP pero también niveles de interferencia Ec/No peores. Con el CPICH a 30 dBm se dan los mejor resultados. La Figura VII.63 muestra escaso solape entre células.

Simulación del escenario B

En las figuras VII.64, VII.65 y VII.66 se muestran los histogramas de los valores de RSCP, Ec/No y número de células Servidoras, respectivamente. En este caso también se obtiene el valor de CPICH = 30 dBm como el mejor de todos en su conjunto. Pero los valores de RSCP superiores a -89 dBm se dan en menos zonas, lo que significa una peor “cobertura” por la menor densidad de células respecto del escenario A. También hay valores peores de Ec/No dado que hay más usuarios en cada célula. El número de servidores mostrados en la Figura VII.66 se debe probablemente al poco downtilt de antena para suplir la menor densidad de células por área, lo que genera mayor solapamiento.

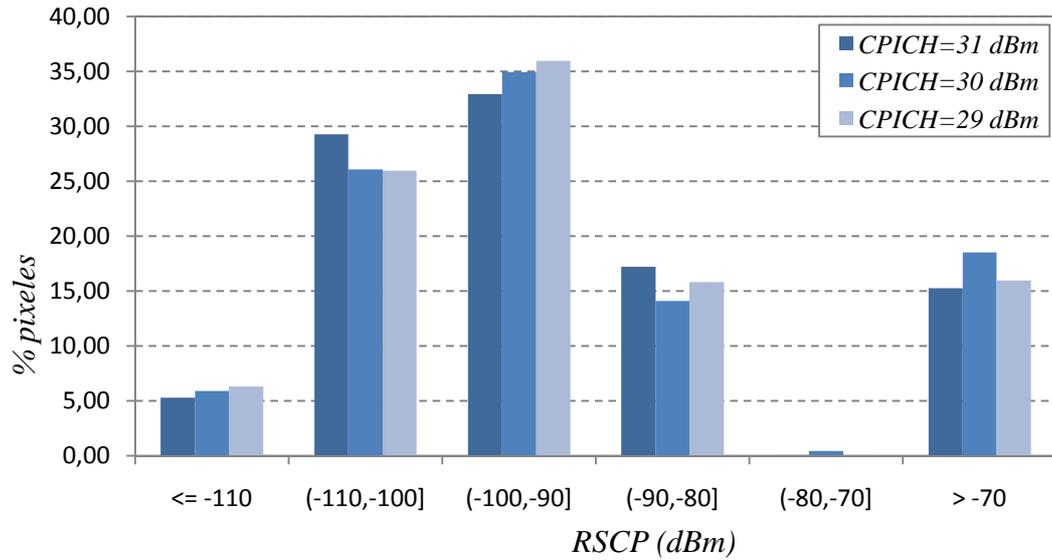


Figura VII. 64 Valores de RSCP para el Escenario B

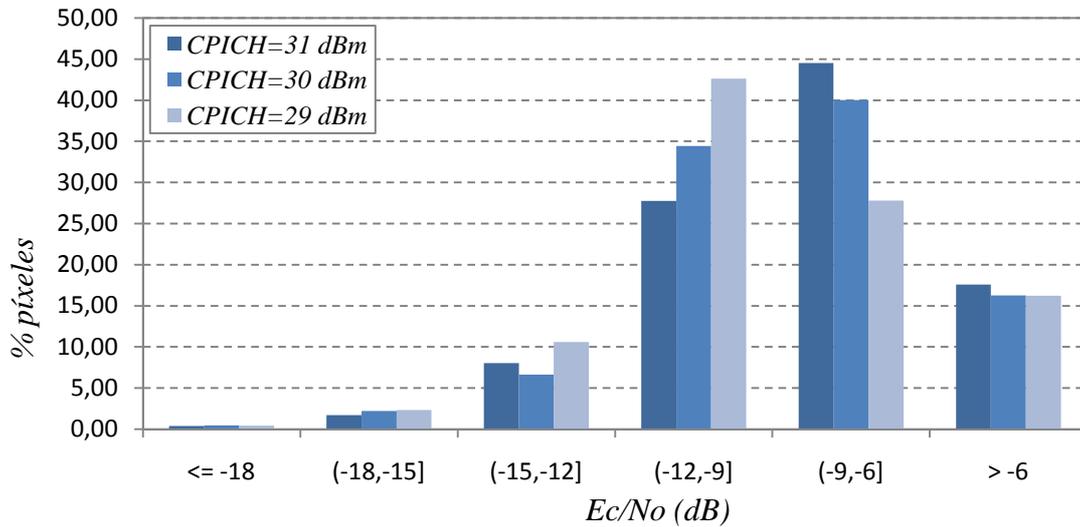


Figura VII. 65 Valores de Ec/No para el Escenario B

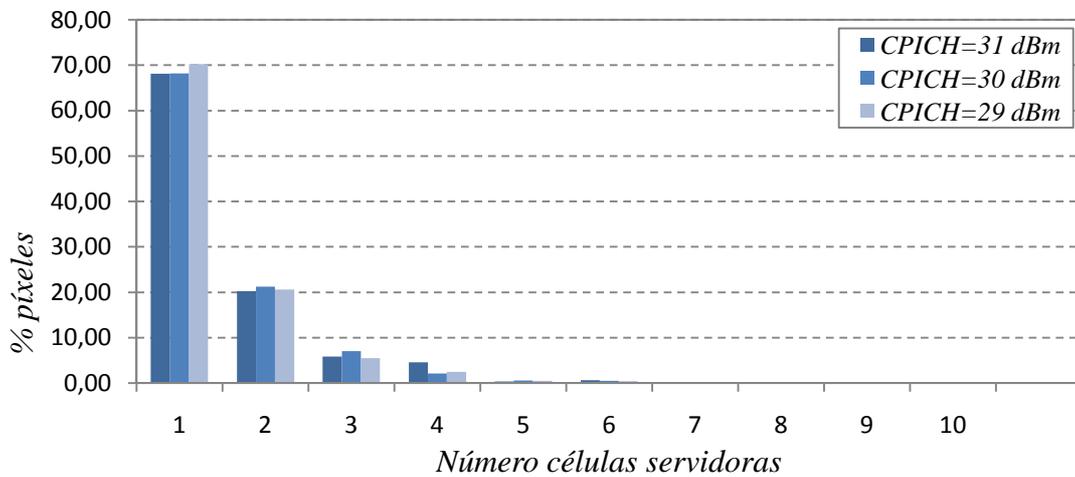


Figura VII. 66 Número de servidores para el Escenario B

Simulación del escenario C

En los resultados de esta simulación se observa algunas diferencias respecto de los escenarios A y B. En este caso, la situación dominante de La Orotava dentro del valle hace que las células tengan bastante más sobrealcance que en un escenario algo más llano.

La Figura VII.67 muestra muchas zonas de mala cobertura (valores inferiores a -89 dBm). La Figura VII.68 muestra una peor relación Portadora a Interferencia. Y en la Figura VII.69 se puede comprobar que hay más polución de pilotos, o mayor área de solape, que en los escenarios anteriores. Este comportamiento es típico de zonas con densidades grandes de usuarios y muy distribuidas, en un terreno con pendiente elevada.

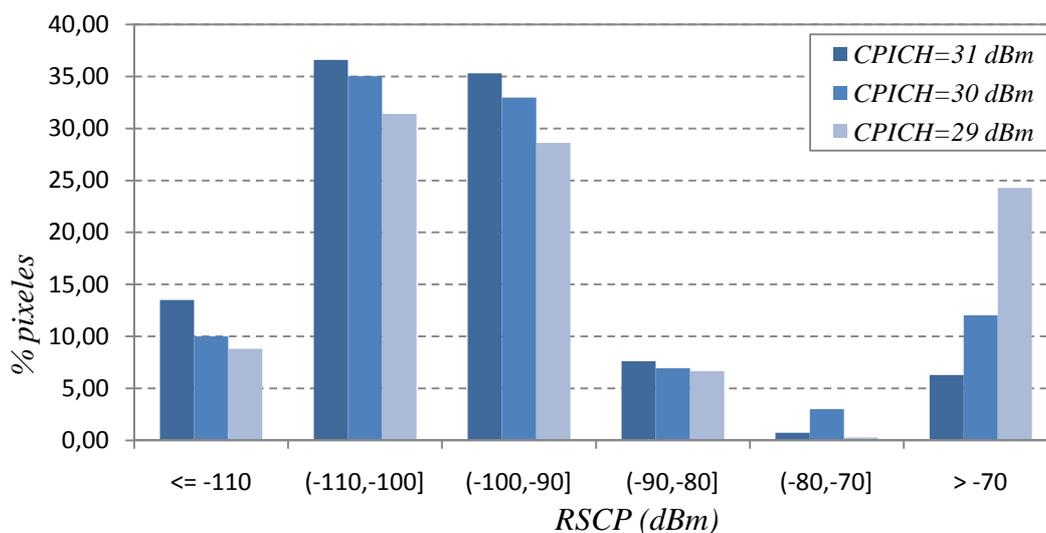


Figura VII. 67 Valores de RSCP para el Escenario C

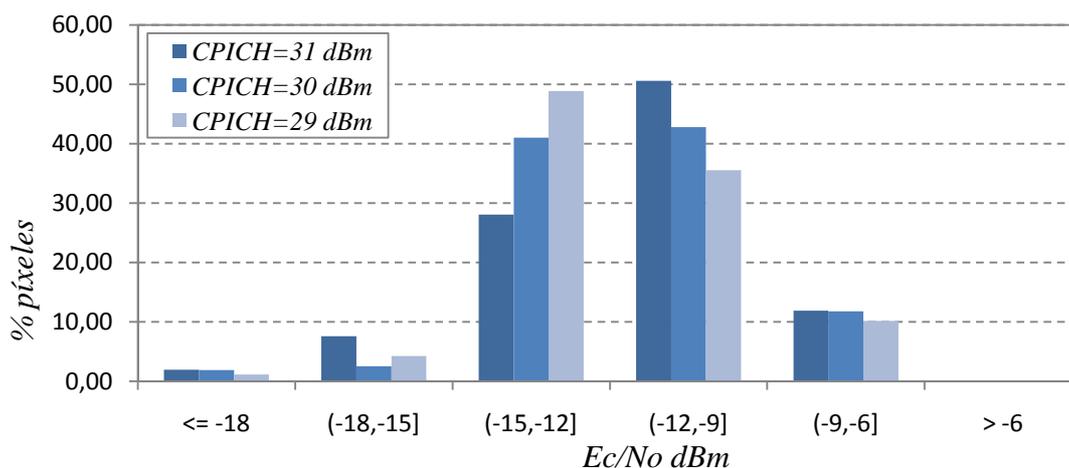


Figura VII. 68 Valores de Ec/No para el Escenario C

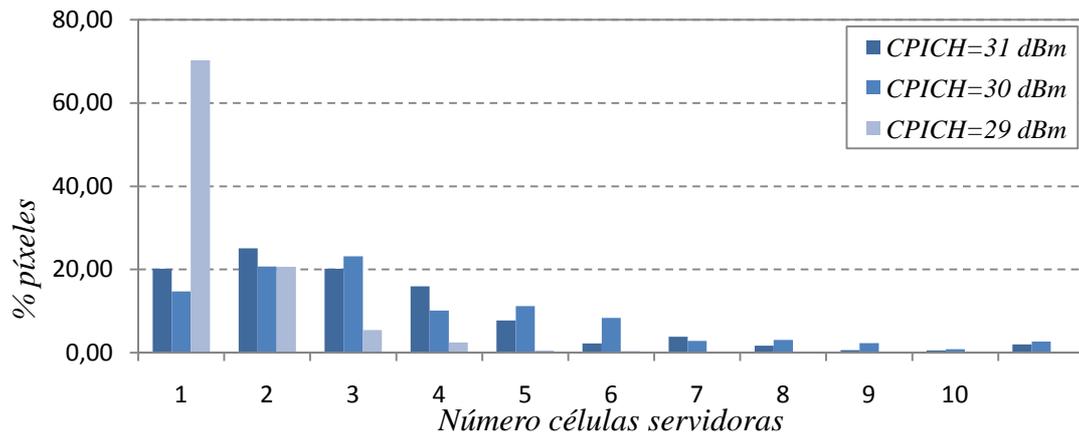


Figura VII. 69 Número de servidores para el Escenario C

7.2.3.3 Resultados de la evaluación de los escenarios reales

Las pruebas realizadas en los tres escenarios reales consistieron en bajar 0,5 dB la potencia del CPICH de las células bajo estudio, partiendo de 32 dBm hasta los 30 dBm con un intervalo de una semana e incluyendo el periodo de bajo tráfico de Semana Santa. Las gráficas que se muestran a continuación tienen la forma de la Figura VII.70. Los datos de se representan en escala lineal, siendo lo importante su variación.

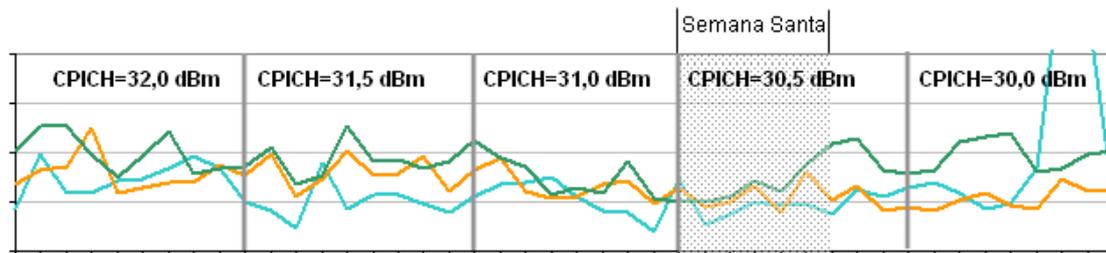


Figura VII. 70 Intervalos de CPICH

Resultados en el escenario A

En la Figura VII.71 se muestra la evolución de los principales KPIs para las células A, B y C.

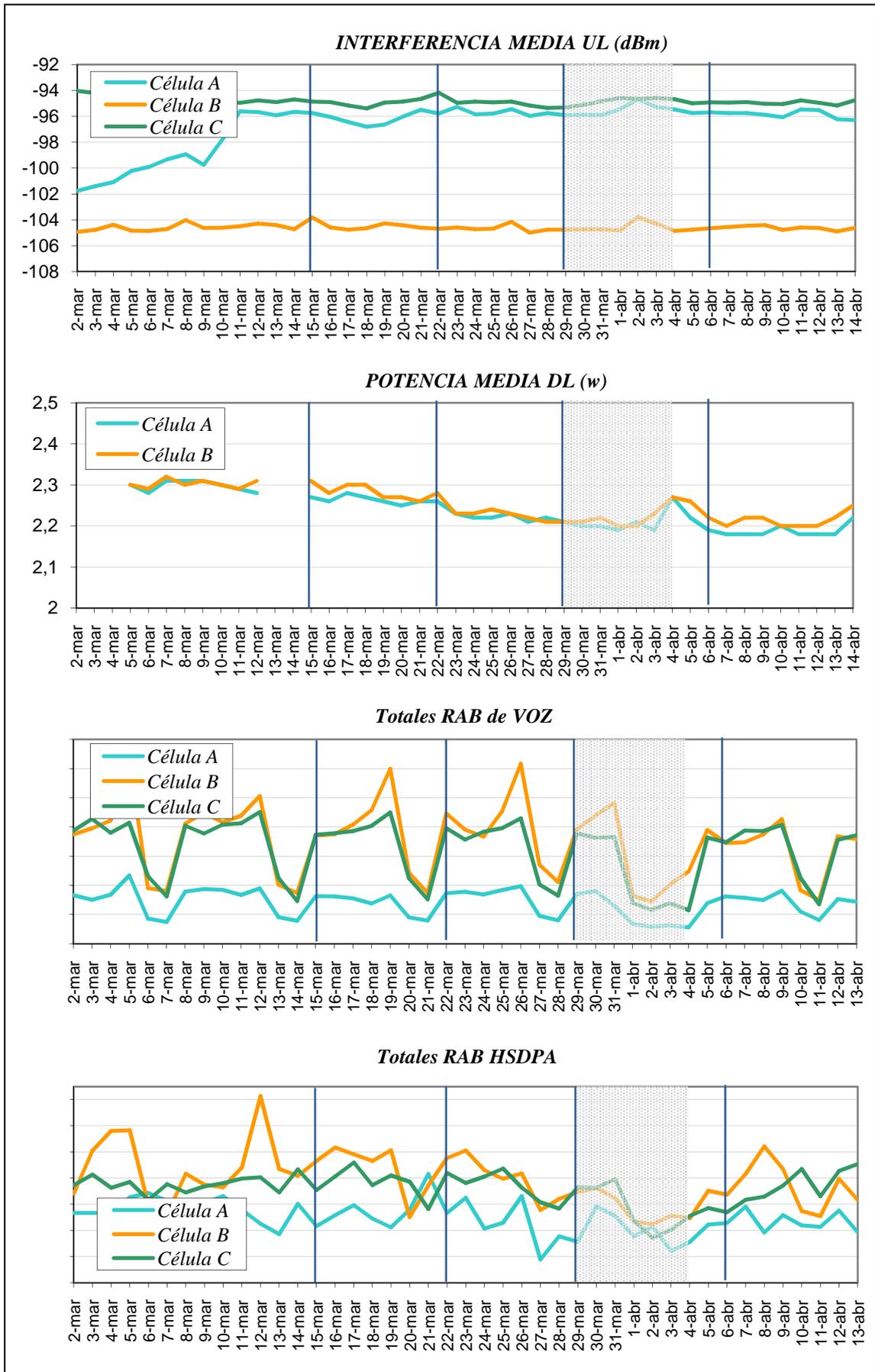


Figura VII. 71 Resultados de los KPIs para las células A, B y C

En la Figura VII.71 se muestra una bajada en todos los KPIs salvo en la interferencia media en UL (*Up Link*), que se mantiene igual puesto que este valor registra el nivel de potencia que emiten todos los terminales que están bajo su área de cobertura, incluyendo los que están solapados con el resto de células. Para conocer la influencia de estos cambios en el conjunto de la red colindante, se ha extraído el agregado de los indicadores mostrados para todas las células que se solapan con las que están bajo estudio. Los resultados se muestran en la Figura VII.72. Se puede observar una disminución de la interferencia media y del volumen de datos, pero se mantienen los RAB o número de llamadas de voz.

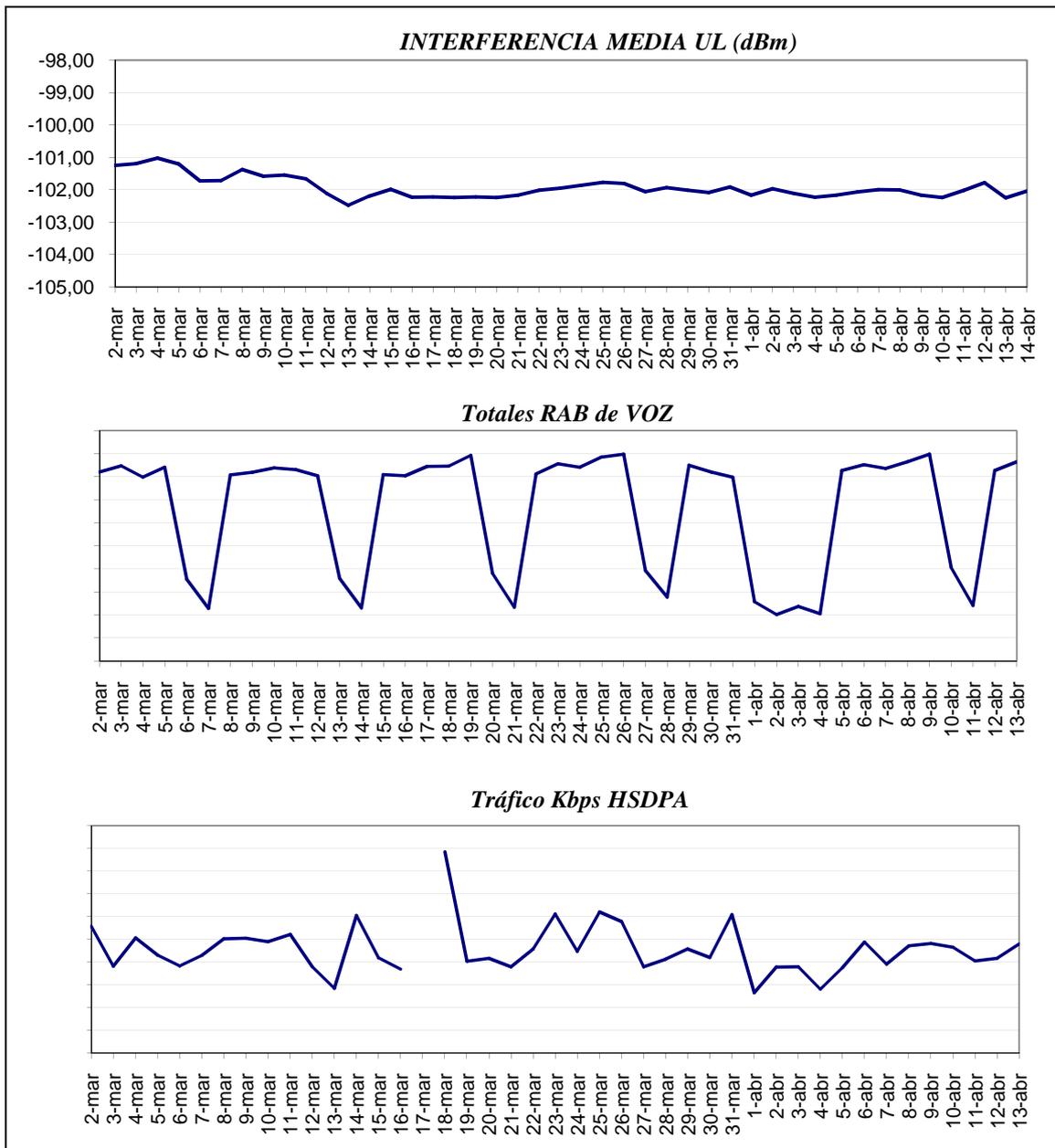


Figura VII. 72 KPIs del conjunto de células del escenario A

Resultados en el escenario B

En la Figura VII.73 se muestra la evolución de los principales KPIs para las células N y O. Para simplificar este documento, se muestra sólo las gráficas con los cambios más significativos.

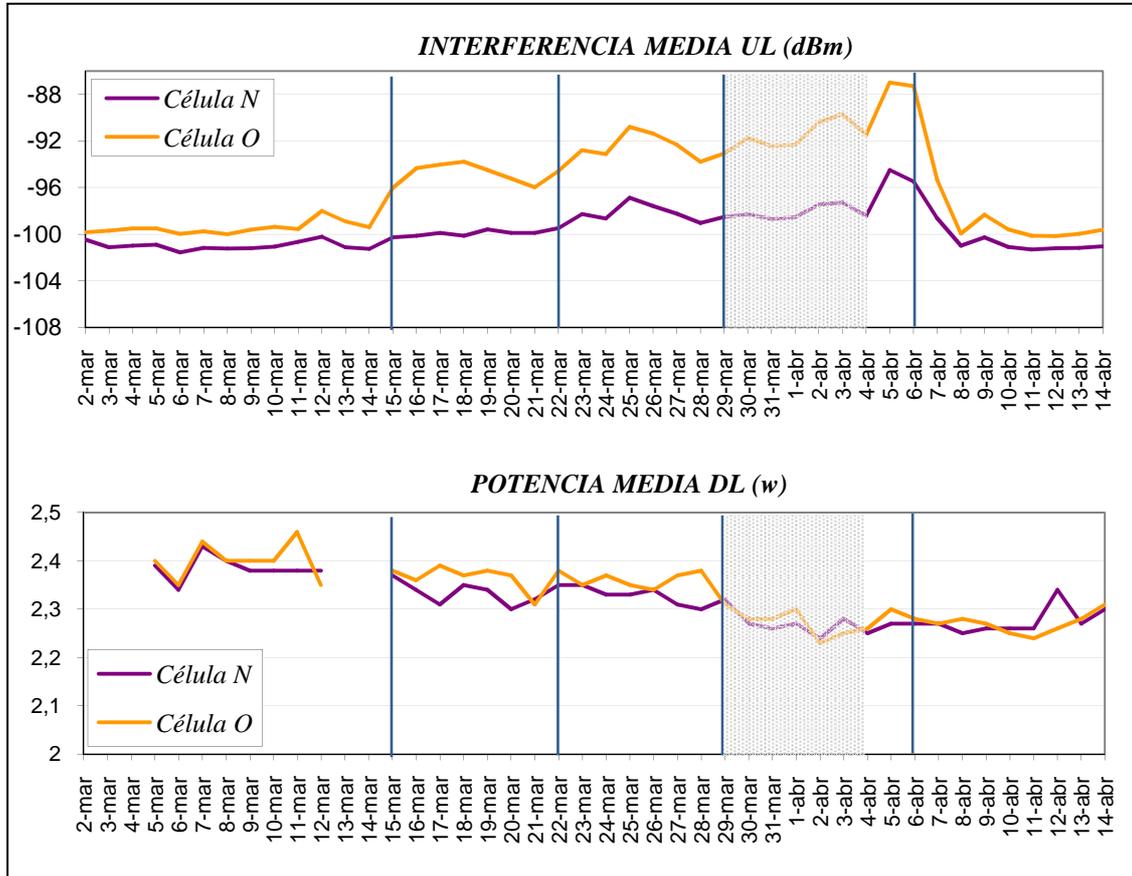


Figura VII. 73 Resultados de los KPIs para las células N y O

El incremento de la interferencia en UL fue debido a causas externas producidas durante el periodo de medida.

El tráfico agregado de todas las células del escenario B ha bajado ligeramente, situación que no se dio en el escenario A, puesto que este tiene mayor densidad de estaciones base que pueden atender mejor la demanda de usuarios. En las Figura VII.74 se muestra los RABs de Voz y los de HSDPA (en vez de los Kbps, por resultar más representativo en este caso) para el escenario B, con el descenso comentado.

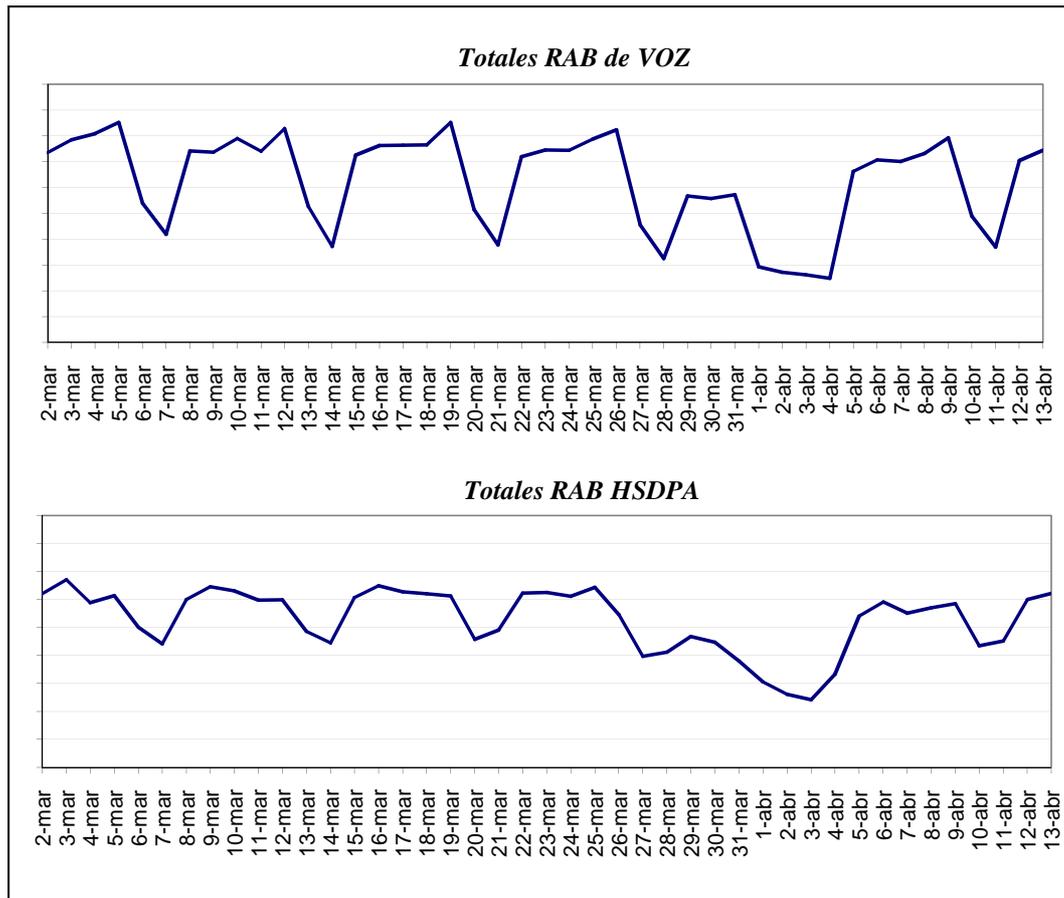


Figura VII. 74 KPIs del conjunto de células del escenario B

Resultados en el escenario C

Para el escenario C se mostrarán sólo las gráficas con cambios significativos en la Figura VII.75. En los RAB de Voz y de HSDPA se observa un efecto típico de escenarios dominantes como este, que ya se comentó en el apartado 7.2.3.2 de Validación.

En la Figura VII.59 del Valle de la Orotava, se puede observar como la célula E tiene más dominancia hacia la parte oeste del Puerto de la Cruz y a la zona de costa de Los Realejos. Sin embargo, la célula F está más confinada con la cordillera que parte de la curva de Santa Úrsula y el mirador de Humbolt hacia el Teide. Esto ha provocado el descenso en el número de accesos a la célula E, y un pequeño incremento para la célula F de aquellos usuarios que están en zona de solape entre ambas células.

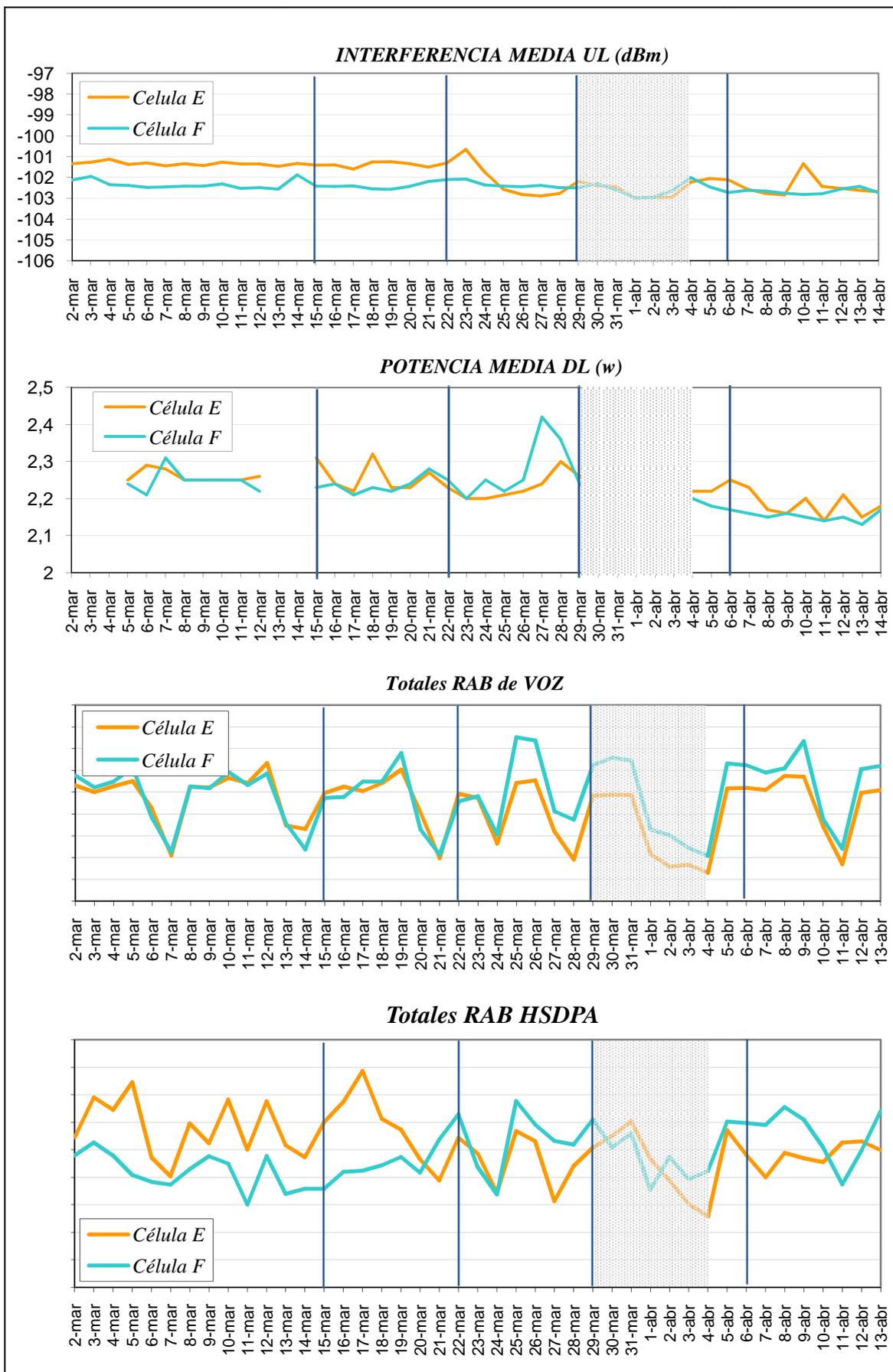


Figura VII. 75 Resultados de los KPIs para las células E y O

El tráfico agregado de las células colindantes ha bajado para los RABs de Voz, pero ha subido para los de HSDPA (Figura VII.76). El sistema UMTS en el momento de la prueba, estaba configurado para que los recursos de radio tengan que destinarse primero a la Voz y en segundo lugar a los datos. Esta técnica de asignación de prioridades se llama Best Effort. La explicación para el caso de las células colindantes, es que, al reducir solapes y sobrealcances con la célula E, se obtiene mayor disponibilidad de recursos para el HSDPA.

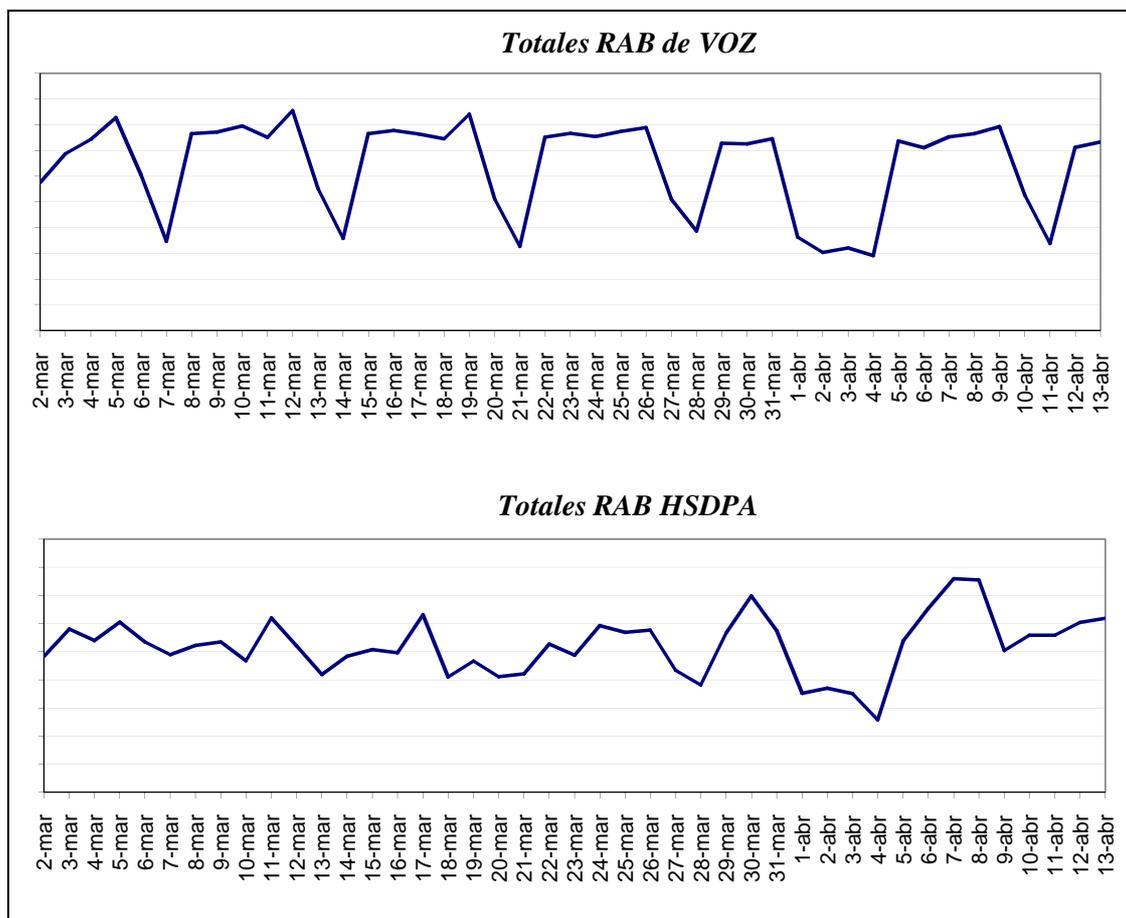


Figura VII. 76 KPIs del conjunto de células del escenario C

Como conclusión a las pruebas realizadas en los tres escenarios se comprueba que para el menor valor de CPICH de 30 dBm, el número de RABs de voz y datos apenas tienen variación en la mayoría de los casos. En el escenario de Santa Cruz, el nivel de interferencia en UL se mantiene igual puesto que no hay sobrealcance. Sin embargo, en la Orotava, debido a la diferencia de altura entre las poblaciones del valle, se consigue una disminución de la interferencia en UL para la célula que tiene sobrealcance.

7.3 Diseño y evaluación de un algoritmo ANR de optimización automática

El término *optimización automática* puede tener significados diferentes o hacer referencia a distintos procesos que tienen como objetivo mejorar el rendimiento de las redes de telefonía móvil. En función del nivel de automatización, la red puede tomar decisiones por sí sola ante un evento y auto-configurarse para adaptarse a una situación inesperada de los usuarios, o bien se propone una configuración de parámetros o colindancias que el operador puede aplicar a conveniencia. En cualquiera de los casos, la optimización automática lleva implícita el procesamiento de gran cantidad de datos y la búsqueda de uno o varios objetivos mediante la ejecución de algoritmos, con el fin de evitar la intervención humana en tareas de optimización altamente complejas cuyas soluciones no aparentan ser tan sencillas o previsibles como las vistas en este capítulo.

El algoritmo que se presenta a continuación pertenece al tipo ANR dentro de las técnicas SON vistas en el Capítulo VI y tiene por objetivo proponer listas de relaciones de colindancias en escenarios con elevada interferencia y sobrealcance, donde no hay una relación directa entre los valores del nivel de potencia del canal piloto recibido por el terminal (RSCP), la interferencia mutua entre dichos pilotos (E_c/N_0) y la distancia a la que se producen.

7.3.1 Análisis del escenario de pruebas

Los resultados mostrados en las Figuras VII.71, VII.73 y VII.75 del apartado anterior, muestran una reducción notable de la interferencia en el uplink en el escenario C de La Orotava tras bajar el nivel de potencia que emite el canal CPICH, respecto de los escenarios A de Santa Cruz y B de La Laguna. Por tanto, se elige el escenario C del Valle de La Orotava en Tenerife para evaluar en algoritmo ANR.

Este valle incluye los municipios de La Orotava, Los Realejos y Puerto de la Cruz. Está bien delimitado por dos cordilleras, con elevada densidad de usuarios en estos tres núcleos principales, y población dispersa en pequeños pueblos, barrios y carreteras de acceso al Parque Nacional del Teide. Debido a la gran diferencia de altitud entre todos estos núcleos, existe mucha probabilidad de que algunos terminales se enganchen a células que están a gran distancia, es decir, con elevados niveles de sobrealcance e interferencia mutua.

En la Figura VII.76 se muestra una vista de la parte alta del Valle, en la Figura VII.77 se ve un plano del escenario, y en la Figura VII.78 el perfil entre el Puerto de la Cruz y La Orotava.

Los escenarios como este provocan situaciones muy complejas para redes de acceso radio, como se muestra en la Figura VII.79. Esto quiere decir que una célula sobre un edificio del Puerto de la Cruz (parte baja), tendrá usuarios a pocas decenas de metros con canales N-LOS (No Light Of Sight) debido a obstáculos cercanos provocados por los propios edificios, mientras que habrá otro grupo de usuarios en la Orotava (parte alta) con canales LOS (Light Of Sight), muy distantes entre sí.

Las pérdidas de propagación entre canales LOS y N-LOS son muy diferentes debido a las bandas de frecuencia usadas en telefonía móvil (como se vio en el Capítulo

III), por lo que existe la probabilidad de que un usuario del Puerto de la Cruz tenga menor potencia de la señal recibida de su célula cercana, que otro en la Orotava a mayor distancia enganchado a la misma célula. Esta situación provoca sobrealcances, y produce un escenario muy caótico, donde no existe una relación directa entre distancias y potencias recibidas. Además, la dificultad de crear áreas de cobertura confinadas, permite que las señales de muchas células distantes entre sí, lleguen a un mismo usuario, generando altos niveles de interferencia.



Figura VII. 76 Panorámica de este a oeste de la parte alta del Valle de la Orotava



GRAFSCAN

Figura VII. 77 Plano del Valle de la Orotava

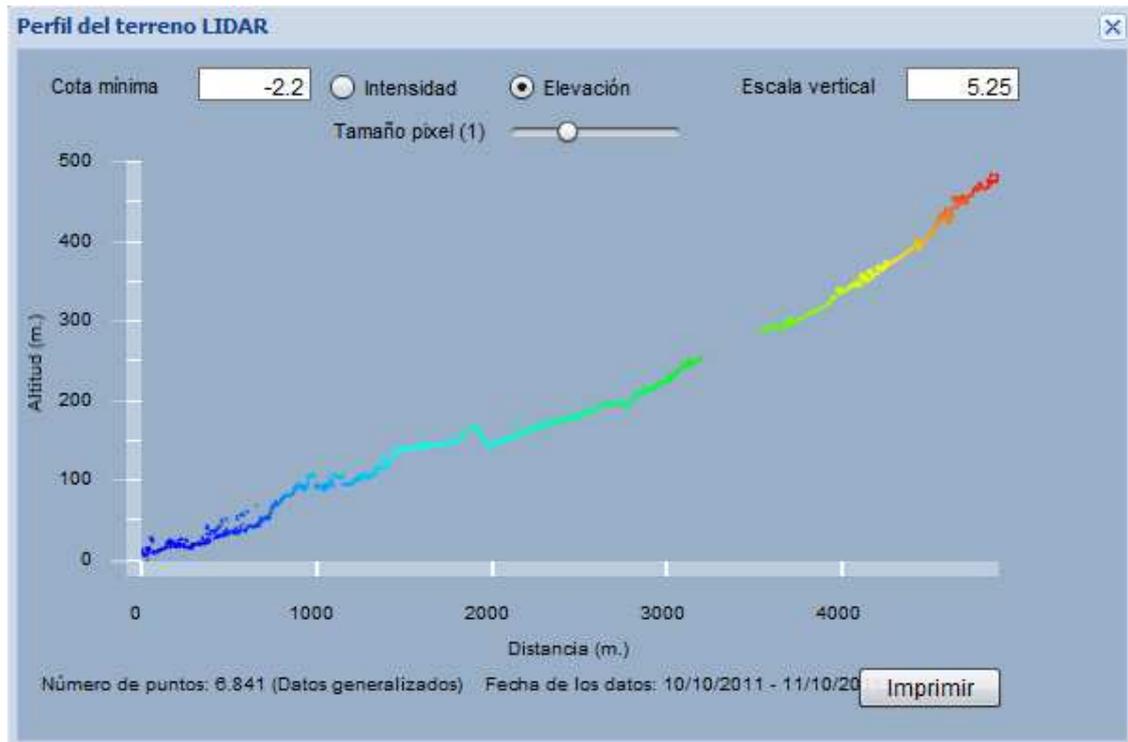


Figura VII. 78 Perfil de altitudes entre el Puerto de la Cruz y la Orotava

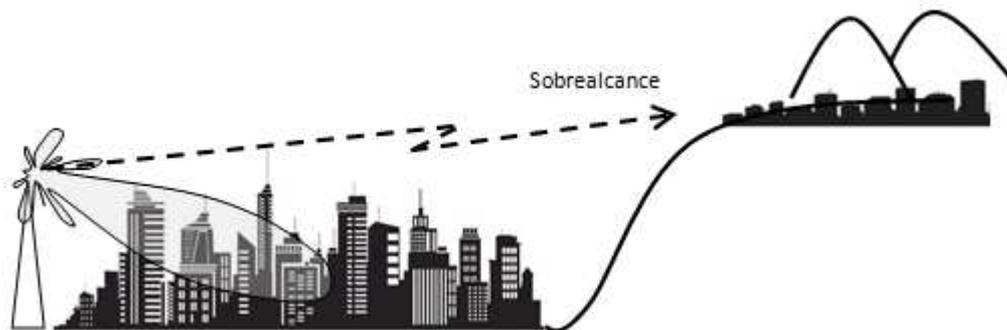


Figura VII. 79 Propagación característica en este escenario

Para analizar el comportamiento de la red, se realizó un trazo, que dio el siguiente resultado. La Figura VII.80 muestra la relación entre el RSCP y el E_c/N_0 , mientras que en la Figura VII.81 se representan ambos términos en función de la distancia. En el apartado 7.3.3 se explicará en qué consiste el trazo y el tipo de información que ofrece.

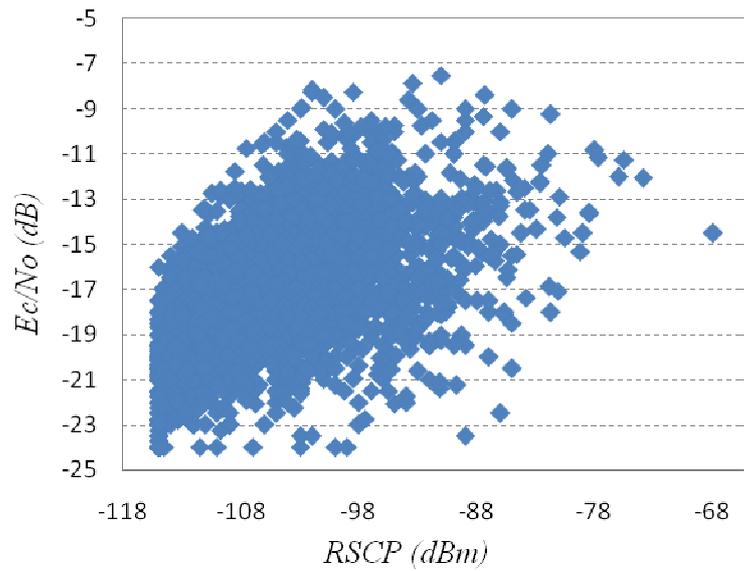


Figura VII. 80 Relación entre RSCP y Ec/No

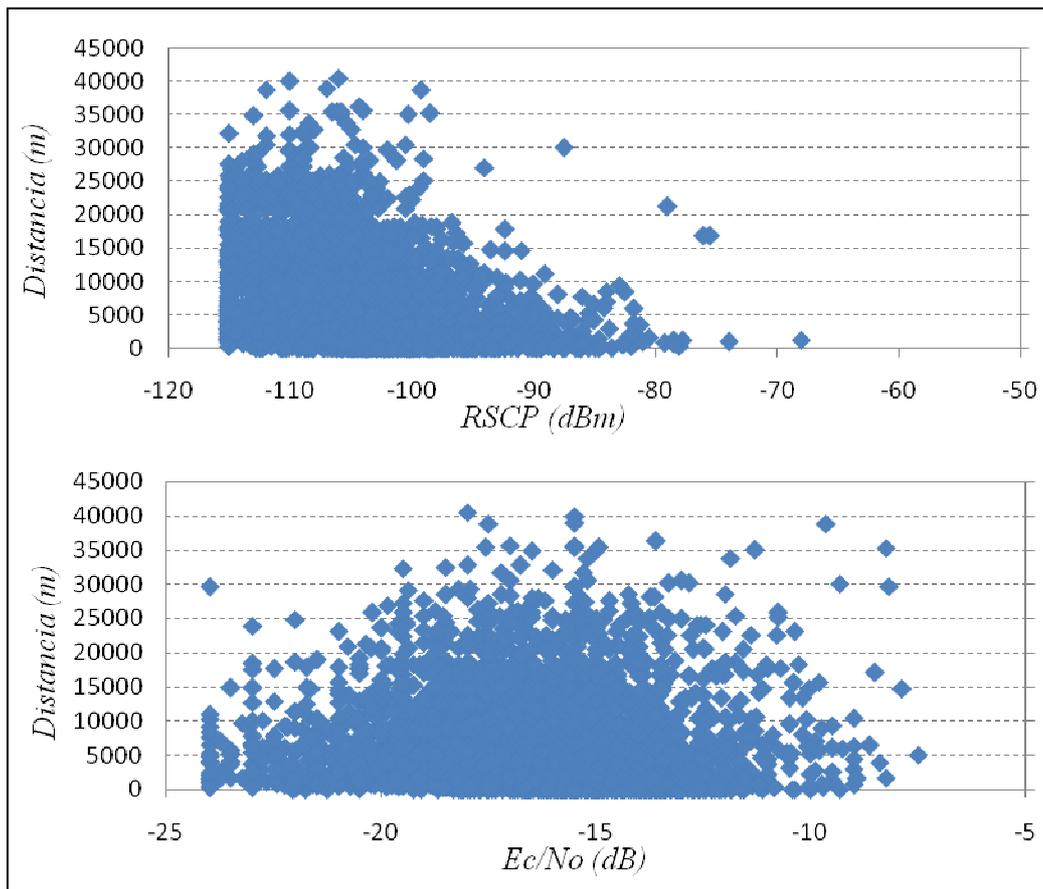


Figura VII. 81 RSCP y Ec/No en función de la distancia

Otra forma de ver el sobrealcance es mediante la realización de medidas de campo o drive test y representarlas mediante la herramienta Actix One. En la Figura VII.82 se puede ver un instante de medida donde el terminal está enganchado a su célula

servidora, y a la vez recibe con buenos niveles células distantes de la parte baja del valle.

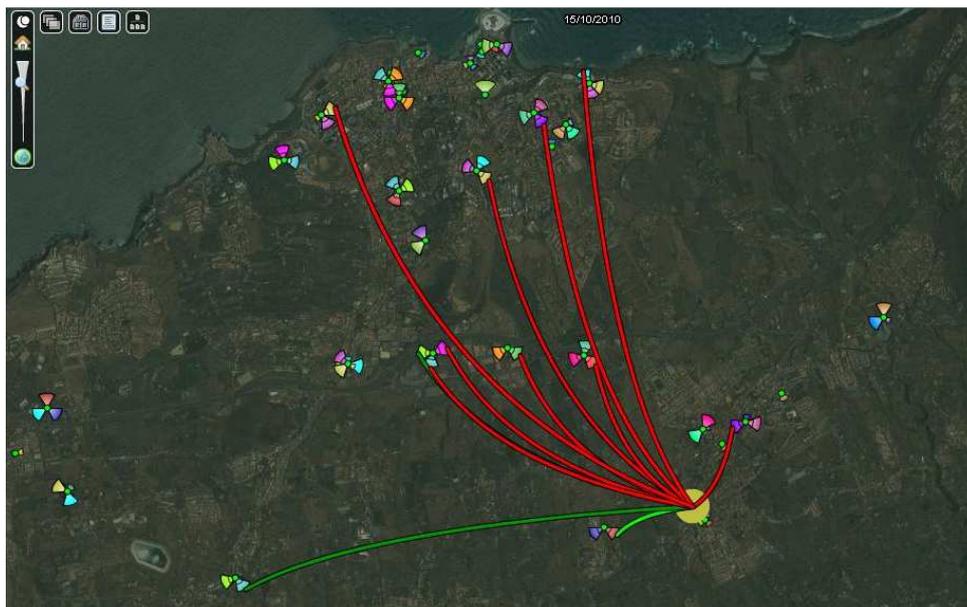


Figura VII. 82 Instante de la medida con sobrealcance

Para asegurar la continuidad de la llamada es necesario que cada célula tenga configurada como colindantes una lista de hasta 31 células (por restricción del sistema) con buenos niveles de potencia e interferencia, así como las que se encuentran más cerca por la movilidad de los usuarios. Sin embargo, según lo mostrado en las Figuras VII.80 y VII.81, no resulta tan obvio decidir qué células son las más adecuadas, pues nos encontramos con las siguientes opciones:

- valores buenos de potencia e interferencia
- valores buenos de potencia pero malos de interferencia
- valores buenos de interferencia pero malos de potencia
- valores malos de potencia e interferencia pero a poca distancia

La configuración de partida del escenario bajo estudio posee una relación de colindancias definida mediante el estudio aislado de sus células, apoyada en medidas de campo, estadísticas de funcionamiento de red, por selección de las vecinas que mayor número de veces se recibe, y por proximidad física (a partir de regiones de Voronoi), tal y como se explicará en el siguiente apartado.

La idea que se propone consiste en un método diseñado para evaluar la mejor opción considerando todos los casos posibles.

7.3.2 Métodos convencionales de definición de colindancias

Cuando se instala una nueva estación base en la red, se define una primera relación de colindancias con las células más cercanas, siguiendo un diagrama de Voronoi, o bien estableciendo un límite de distancia y ángulo entre la célula origen y sus posibles colindantes más cercanas [5], como se muestra en la Figura VII.83.

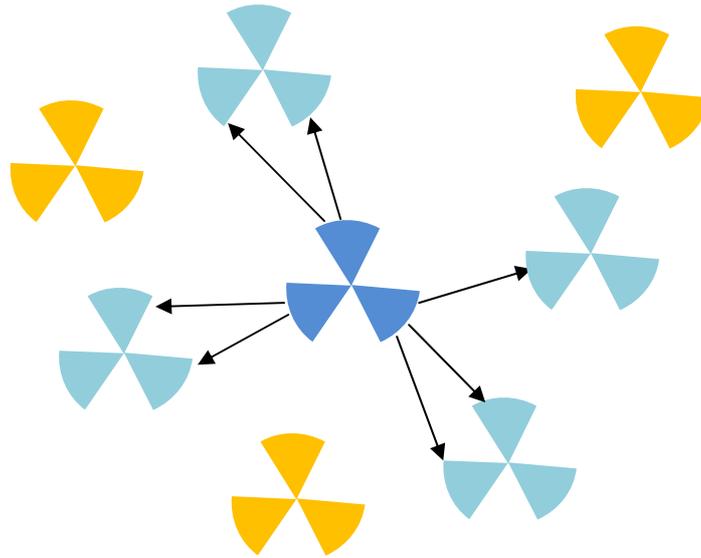


Figura VII. 83 Configuración inicial de colindancias por cercanía y ángulo

Si se dispone de un buen conjunto de cartografías urbanas y digitalizaciones del terreno que proporcionen simulaciones de cobertura aceptables, se puede estimar el alcance de las nuevas células y su posible solape con las que ya están en servicio, lo que ayuda a complementar la primera lista manual de colindancias.

Luego, una vez comienza a radiar la nueva estación base, se deberá analizar los KPIs para conocer cómo interactúa cada nuevo elemento con la red existente. Un buen método consiste en analizar, para cada pareja de células, el número de intentos de handover y los que realmente se realizan. Los traceos por distancia de la célula permitirán además saber la distribución de usuarios en el espacio en función del retardo de propagación en uplink (convertida en metros) para cada grupo de terminales, lo que ayudará a estimar las células destino en caso de que sea necesario realizar un handover si estos usuarios se desplazan. En la Figura VII. 84 se muestra el resultado de un trazo por distancia realizado en dos células, donde el número de usuarios no disminuye linealmente con la distancia a estas células (dependerá probablemente de la población).

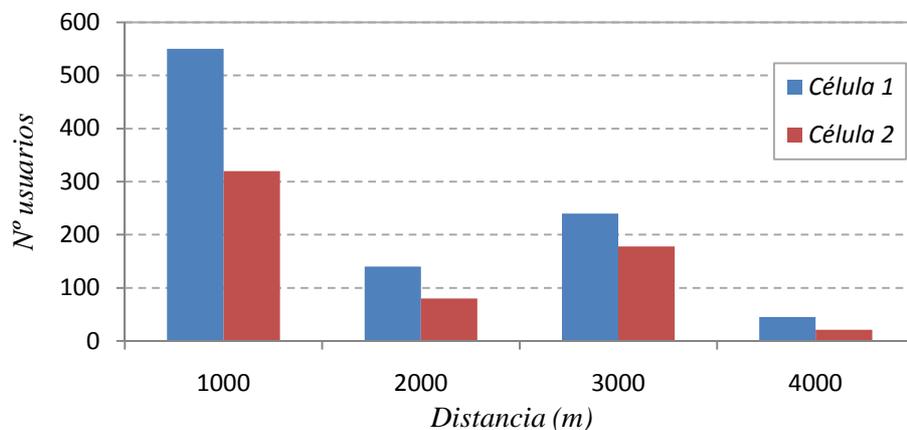


Figura VII. 84 Distribución de usuarios, por distancia, enganchados a dos células

Los datos obtenidos no dan información de acimut. No obstante, si se representa en un plano esta distribución (Figura VII.85), se puede estimar la necesidad de añadir una colindancia entre las dos células cuya dirección de máxima propagación coincida con una concentración alta de usuarios, que en este ejemplo son 240 terminales.

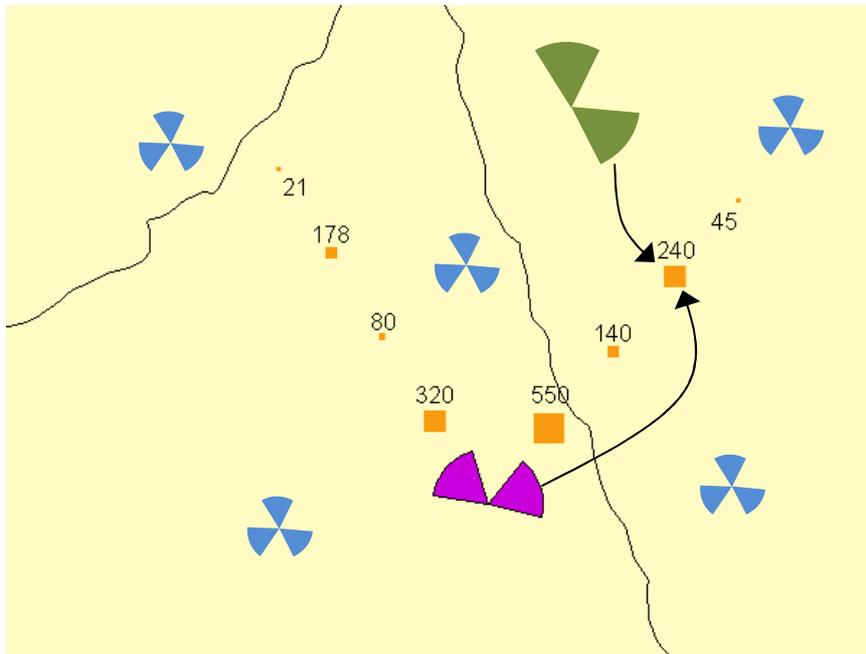


Figura VII. 85 Definición de colindancias por concentración de usuarios

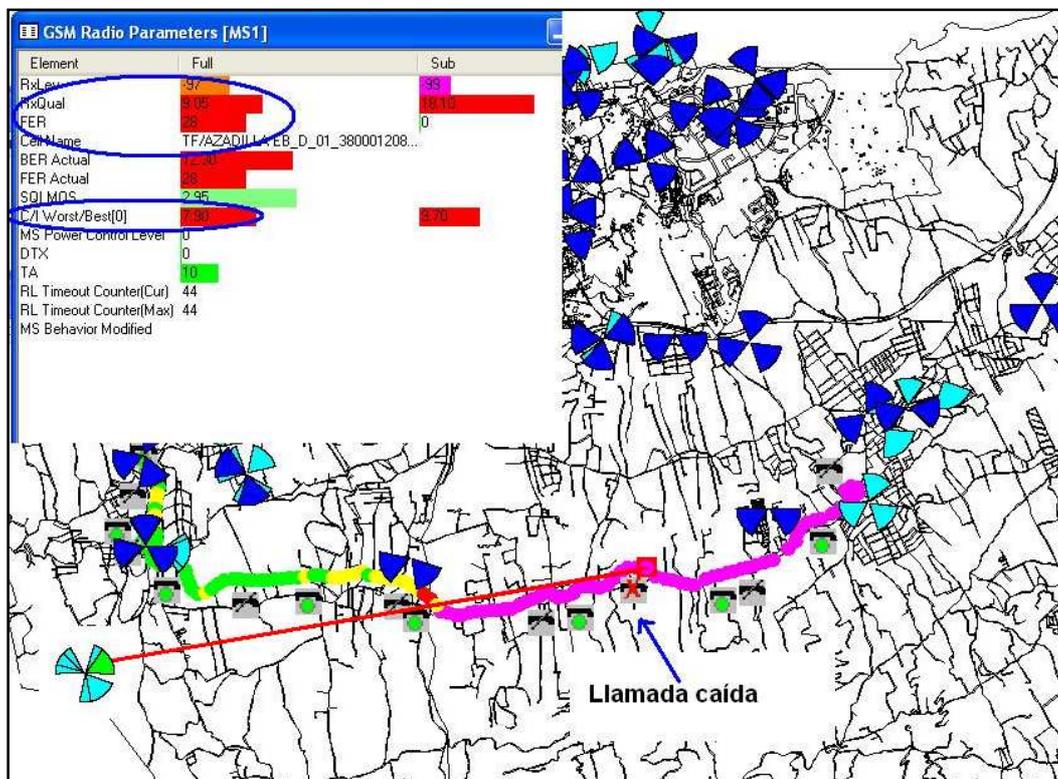


Figura VII. 86 Definición de colindancias mediante medidas de campo

Otro método para definir colindancias consiste en la utilización de herramientas de análisis de medidas de campo o drive test, que proponen listas de células vecinas en función de la evolución de las llamadas que realiza en terminal de prueba mientras se desplaza. En el ejemplo de la Figura VII. 86 se muestra el entorno gráfico de la herramienta TEMS de Ericsson, donde se marca el momento en el que se interrumpe una llamada y la célula a la que estaba enganchada. A través de varias ventanas informativas de parámetros que ofrece la aplicación se puede determinar las causas por las que se produjo la pérdida del enlace radio, lo que permite aplicar en muchos casos la acción correctora.

Existen otros métodos de definición de colindancias similares a los comentados, pero en general todos tienen deficiencias del conocimiento y distribución de usuarios que permita la obtención de una lista óptima de relaciones de vecindades entre cada par de células.

La novedad que se propone en este trabajo de Tesis consiste en realizar un trazo a cada terminal de la zona bajo estudio, de tal manera que proporcione para cada instante, los valores de potencia e interferencia de la señal de cada una de las células que es capaz de recibir, durante el tiempo suficiente para tener un volumen aceptable de datos. Esta información será procesada posteriormente mediante un algoritmo ANR diseñado para evaluar la mejor combinación de potencia, interferencia distancia y número de medidas tomadas entre cada par de células.

7.3.3 Trazo de célula

El trazo consiste en extraer y almacenar, mediante la OSS, todos los *Measurement Report* que ofrece la capa de Control de Recursos Radio. En la Figura VII. 87 el terminal está enganchado a la célula de color azul a través de la cual envía los mensajes de las medidas que está recibiendo de cada una de las células amarillas.

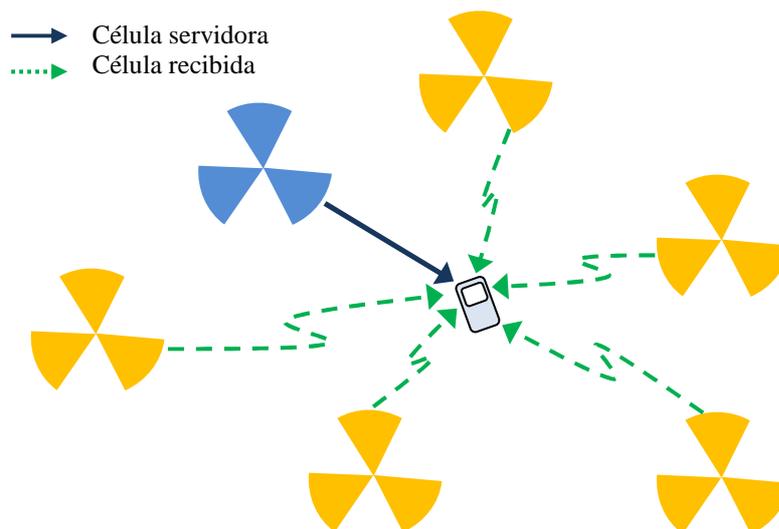


Figura VII. 87 Trazo de células colindantes

Este método tendrá mayor fiabilidad si se elige una hora del día con mayor concurrencia de terminales activos, que habitualmente suele coincidir con las primeras horas de una jornada laboral. De esta manera, el volumen de información y de células traceadas será el mayor posible, salvo que claramente estén identificadas algunas zonas de mayor actividad nocturna. Es posible que se necesite conocer el comportamiento de la red en determinadas circunstancias de gran concentración de clientes, como un evento deportivo de gran relevancia o una fiesta popular.

En cualquiera de los casos, la OSS devuelve un fichero de varias decenas de miles de muestras, donde cada célula servidora, identificada por su SC (*Scrambling Code*) tiene un número elevado de valores de potencia e interferencia recibida de las células vecinas, identificadas también por su SC. Puesto que se dispone de las coordenadas geográficas de cada célula, se puede saber también la distancia a la que se encuentra cada una de ellas. Mediante el correcto procesado de todos estos datos, se puede ordenar la información con la estructura que se muestra en la Tabla VII.2.

SC Célula servidora	SC Célula vecina	Potencia media recibida de la célula vecina	Interferencia media recibida de la célula vecina	Nº de veces que la célula servidora recibe a la vecina	Distancia entre serv. y vecina
---------------------	------------------	---	--	--	--------------------------------

Tabla VII. 2 Estructura de las muestra de medidas

7.3.4 Selección de colindancias por criterios

Para definir la relación de colindancias del escenario bajo pruebas se ha diseñado un método de clasificación que tiene como restricciones de partida los valores traceados de Potencia, Interferencia, el número de veces que se sucede esta combinación y la distancia entre células [7]. Este método propone la colindancia si cualquiera de estos valores está por encima de la restricción inicial. Por ejemplo, si un terminal enganchado a una servidora, recibe a la vecina con un valor de -83 dBm, y hemos puesto como restricción que debe ser mayor que -90 dBm, entonces la colindancia será propuesta. Con el objeto de evaluar su comportamiento se ha supuesto un terminal que se desplaza por la autopista TF-5 entre los dos puntos indicados en la Figura VII. 88.



Figura VII. 88 Trayecto bajo prueba

En el punto de inicio se encuentra una estación base con tres células con (SC:240, 248 y 256). En el punto final hay una célula con SC: 22.

Para la evaluación de este escenario se ha probado los valores de RSCP > -85 , > -90 , > -95 , > -100 y > -105 dBm, y distancias entre células < 1.500 m y < 4.000 m. La probabilidad de conseguir un handover con éxito y que tras éste la llamada no se interrumpa, será mayor, si la célula destino tiene mejores niveles de RSCP y E_c/N_0 . La distancia también influye pero se comporta de forma desigual con estos dos valores tal y como se pudo ver en la Figura VII.81. Los resultados se muestran a continuación.

Primera prueba

Las primeras restricciones impuestas al algoritmo son las siguientes:

- RSCP > -85 dBm y $d < 1500$ m
- RSCP > -85 dBm y $d < 4000$ m
- RSCP > -90 dBm y $d < 1500$ m
- RSCP > -90 dBm y $d < 4000$ m
- RSCP > -95 dBm y $d < 1500$ m
- RSCP > -95 dBm y $d < 4000$ m

Todas han dado la misma configuración de colindancias, no siendo posible el traspaso entre la las células del punto inicial con el final, como se muestra en la Figura VII.89.

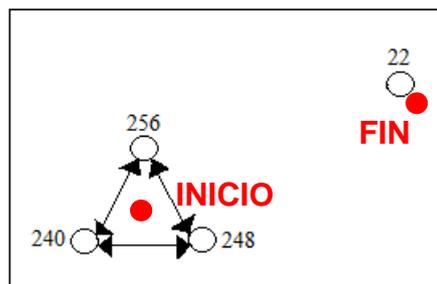


Figura VII. 89 Configuración de colindancias con las primeras restricciones

Segunda prueba

La segunda restricción dada al algoritmo permitirá definir colindancias con valores de RSCP > -100 dBm y $d < 1500$ m. Con este valor de potencia recibida menos restrictivo es posible definir nuevas relaciones de vecindad con tres estaciones base, pero aún no se puede mantener la continuidad en entre los dos puntos del trayecto, como se muestra en la Figura VII. 90.

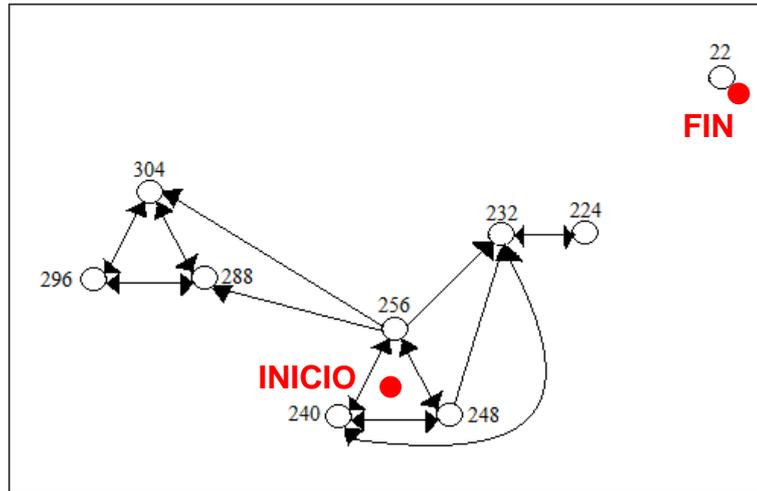


Figura VII. 90 Configuración de colindancias para RSCP > -100 dBm y d < 1500 m

Tercera prueba

En este caso se mantiene RSCP > -100 dBm pero se aumenta la distancia hasta un valor $d < 4000$ m, resultando el esquema de la Figura VII.91. Aún no es posible proporcionar continuidad entre ambos puntos.

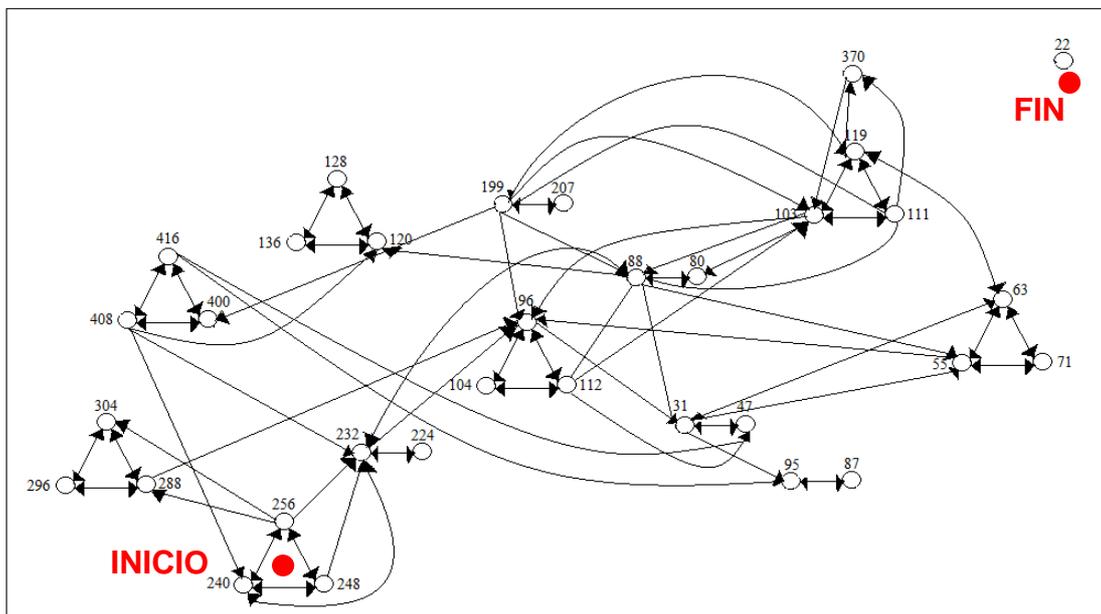


Figura VII. 91 Configuración de colindancias para RSCP > -100 dBm y d < 4000 m

Cuarta prueba

Para esta prueba se restringe la potencia a $RSCP > -105$ dBm y la distancia a un valor $d < 1500$ m. El resultado es una configuración que tampoco permite la continuidad entre ambos puntos, como muestra la Figura VII.92.

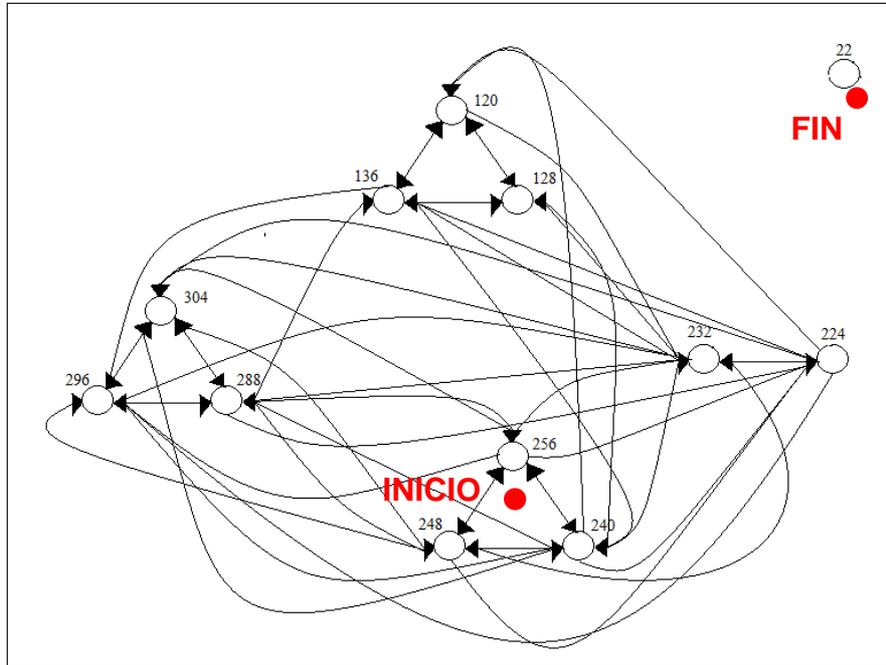


Figura VII. 92 Configuración de colindancias para $RSCP > -105$ dBm y $d < 1500$ m

Quinta prueba

Las restricciones para este caso son $RSCP > -105$ dBm y $d < 4000$ m. La configuración de colindancias resultante permite finalmente dar continuidad para llegar de un extremo a otro del trayecto, como se muestra en la Figura VII.93.

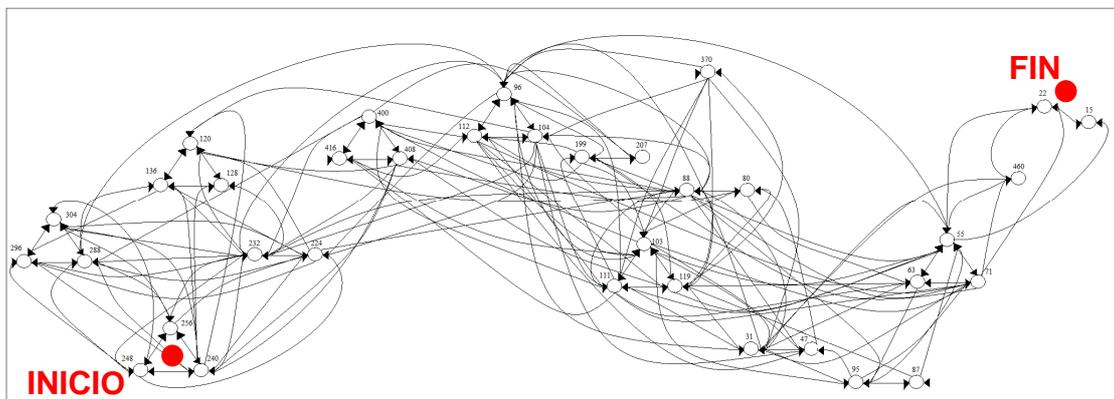


Figura VII. 93 Configuración de colindancias para $RSCP > -105$ dBm y $d < 4000$ m

La configuración propuesta define colindancias entre parejas de células de estaciones base que se encuentran en torno al trayecto de partida mostrado en la Figura VII. 88. La distribución de éstas se representa en la Figura VII.94.



Figura VII. 94 Ubicación de Estaciones Base para dar continuidad al trayecto

7.3.5 Diseño de un algoritmo ANR de selección de colindancias

El método mostrado en el apartado anterior clasificaba las colindancias según las restricciones de partida, pero sin mantener una relación o dependencia entre dichas restricciones. Además, el estudio estaba dedicado a mantener la continuidad en un trayecto concreto. Si esta continuidad se conseguía, el modelo se aceptaba. En estos casos se consideró inicialmente utilizar algoritmos de optimización de redes, como el de ruta más corta o flujo máximo [6], pero se desestimaron puesto que en una red densa existen múltiples caminos y puntos de origen y destino que un terminal puede recorrer. Incluso permaneciendo en el mismo lugar se pueden producir handover forzados por algoritmos de gestión de capacidad, o por pérdida de servicio repentina producida por una avería en una célula.

Debido a estas limitaciones resulta necesario por tanto definir un algoritmo que relacione las condiciones de partida entre ellas, y que pueda ser utilizado en todo el escenario independientemente del trayecto que los terminales puedan realizar. La eficacia de este nuevo método será evaluada aplicándola a la red de Telefónica y analizando los KPIs. El algoritmo diseñado [8] toma como datos de inicio los valores de RSCP y E_c/N_0 medidos por el terminal de todas las células que recibe mediante un trazo, y tiene como objetivo la elaboración de una lista de 31 colindancias según los siguientes criterios:

- siempre se selecciona la célula cosectorial (la que pertenece a la misma estación base) independientemente de los valores de potencia e interferencia recibida
- el algoritmo se ejecuta con los siguientes límites de distancia como primera restricción: 5 km, 10 km, 15 km y 20 km

- para cada distancia se elige la célula según las dos siguientes opciones:
 - *opción 1*: se selecciona la célula que mayor número de veces es recibida por el terminal, y en caso de empate con otras células, se elige la que tenga una potencia superior a -90 dBm y una interferencia mayor que -9 dB¹
 - *opción 2*: se elige la célula que tenga una potencia superior a -90 dBm y una interferencia mayor que -9 dB, y en caso de empate con otras células, se selecciona la que mayor número de veces es recibida por el terminal

Matemáticamente, el algoritmo se expresa de la siguiente manera:

$$\text{lex max} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}, \left| x_{ij}: \begin{cases} x_{ij} = 1 \\ y \\ P_{ij} > -90 \text{ ó } I_{ij} > -9 \end{cases} \right| \right)$$

sujeto a:

$$\sum_{\substack{1 \leq j \leq n \\ i \neq j}} x_{ij} \leq n_i, \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

$$\begin{aligned} \text{dist}_{ij} x_{ij} < \text{Radio}, & \quad \forall i, j \in \{1, \dots, n\}, i \neq j \\ x_{ij} \in \{0,1\}, & \quad \forall i, j \in \{1, \dots, n\} \end{aligned}$$

donde:

n : número de células

$x_{ij} = 1$ si la relación de colindancia entre i y j es definida
 0 en otro caso

dist_{ij} : distancia entre las células i y j

d_{ij} : número de veces que el terminal enganchado a la célula i , recibe a j

Radio : radio que limita el establecimiento de colindancias

P_{ij} : potencia recibida (dBm) por el terminal de la célula j
 mientras está enganchado a i

I_{ij} : interferencia recibida (dB) por el terminal de la célula j
 mientras está enganchado a i

El algoritmo se ha desarrollado en lenguaje C, y se muestra en el Anexo II.

El trazo se ha realizado sobre las 69 células del escenario bajo estudio, y en otras 45 más que son colindantes a la zona. Se ha elegido 30 minutos de máximo tráfico o presencia de usuarios en un día. Este periodo ofrece un compromiso entre número de muestras obtenidas y la capacidad de procesamiento posterior de los datos.

¹ Los valores de pot.= -90 dBm e interf.= -9 dB proceden de condiciones iniciales de diseño de red, se han obtenido de [9] como referencia.

En función de las distancias seleccionadas de 5, 10, 15 y 20 km, y de las dos opciones, el algoritmo genera 8 posibles cambios de colindancias, de los cuales 3 de ellos son idénticos, con lo que resultan 5 cambios de relación de colindancias. La recolección de datos comienza una semana antes para poder comparar los resultados. Cada configuración de colindancias fue aplicada en las fechas que indica la Tabla VII.3, dejando una semana de separación para tener en cuenta la bajada de tráfico del fin de semana, con la excepción del cambio realizado el 4/11/13, que dio resultados muy malos, por lo que el siguiente cambio fue adelantado al 8/11/13.

Distancia	Criterio	Fecha	Configuración
Comienzo recogida de datos		14/10/2013	0
5 km	opción 1	21/10/2013	1
5 km	opción 2	mismo resultado no se aplica	
10 km	opción 1	28/10/2013	2
10 km	opción 2	04/11/2013	3
15 km	opción 1	08/11/2013	4
15 km	opción 2	mismo resultado no se aplica	
20 km	opción 1	18/11/2013	5
20 km	opción 2	mismo resultado no se aplica	

Tabla VII. 3 Fechas de recolección de datos

7.3.6 Análisis de los resultados

Los datos que se muestran a continuación corresponden con el grupo de 69 células del valle de la Orotava bajo estudio. En la Figura VII.95 se muestra las llamadas correctas (que han sido finalizadas por el usuario) y el porcentaje de llamadas caídas. Se puede ver claramente la bajada de tráfico del sábado y domingo.

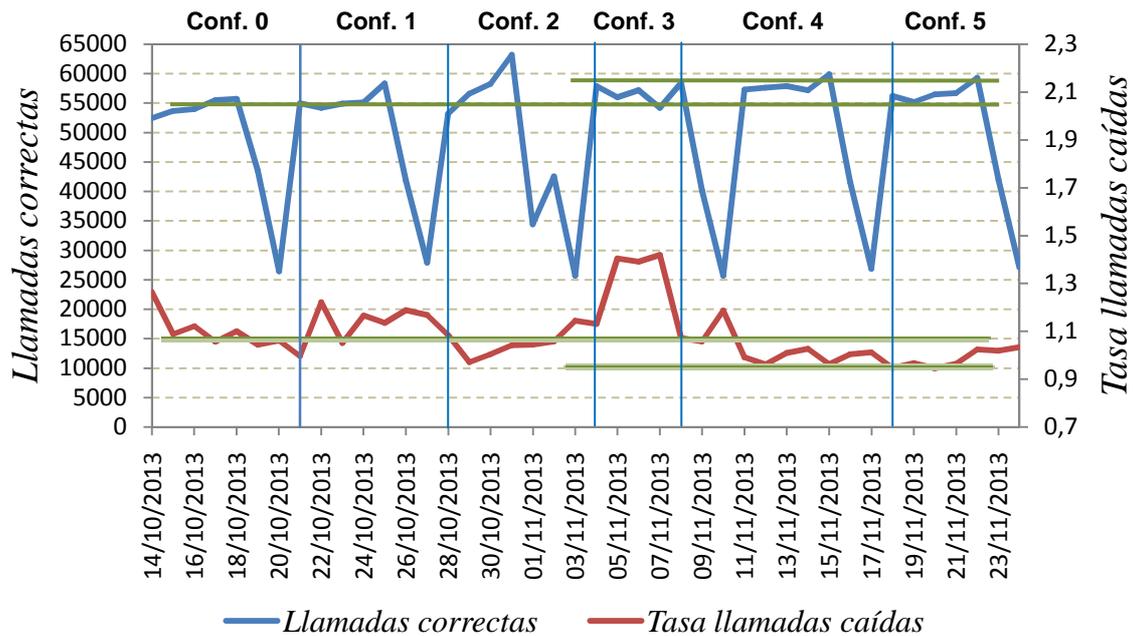


Figura VII. 95 Evolución de las llamadas correctas y caídas

El porcentaje de llamadas caídas parte de un valor mayor de 1,1% la semana antes de los cambios, hasta un valor cercano al 1,0 %, pasando por un empeoramiento de la calidad entre el 5 y el 8 de noviembre. La mejora lograda al final entorno al 0,1% tiene un valor significativo porque además ha supuesto un aumento (los viernes) de unas 55.000 llamadas correctas a unas 59.000 llamadas. Es decir, que no solo se ofrece más continuidad a la llamada, sino que aumenta también el número de llamadas originadas puesto que mejora la disponibilidad de la red. Se determina por tanto que los mejores resultados se obtienen con las configuraciones 4 y 5, y la peor con la configuración 3.

La configuración de colindancias previa a la aplicación del algoritmo ANR, como se explicó en el apartado 7.3.2, se había realizado manualmente teniendo en cuenta las células cercanas, mediante traceos simples para determinar las colindancias que más veces se realizaban de las ya definidas, o analizando las medidas de campo, con la desventaja de que solo se tenía información de los lugares por donde pasaba el vehículo con el equipo de medida. Mediante ajustes localizados y de forma recursiva se iban ajustando las listas de colindancias.

En cambio, el algoritmo ANR parte de un traceo de todas las medidas del terminal, con lo cual se dispone de información de todas las células que éste es capaz de medir independientemente de si el sistema las tiene definidas como colindantes o no. Cada instante de medida es almacenado en una base de datos, y forma un conjunto de decenas de miles de muestras en tan solo 15 minutos, con lo cual se pueden realizar análisis estadísticos del que se obtendrán resultados fiables.

Para distinguir los efectos de la nueva configuración en el sobre-alcance de las células, se analiza por cada una de ellas (representada por su Código de Scrambling) la media de la distancia a la que se encuentran los terminales enganchados (o terminales a los que da servicio), resultando el gráfico de la Figura VII.96. De este análisis se obtiene un grupo de seis células lejanas, es decir, de células que dan servicio a terminales que están a mayor distancia de la zona bajo estudio, y otro grupo de células que dan servicio a terminales que están cerca.

En la Figura VII.97 se muestra la evolución de las llamadas correctas para ambos grupos de células y en la Figura VII.98 para las llamadas caídas.

En estas gráficas se muestra una mejora en el total de llamadas correctas (es decir, no interrumpidas), con mayor incremento en las células cercanas. También se observa una disminución en la tasa de llamadas caídas debido a que la relación de colindancias se ha optimizado para los sobrealcances del escenario.

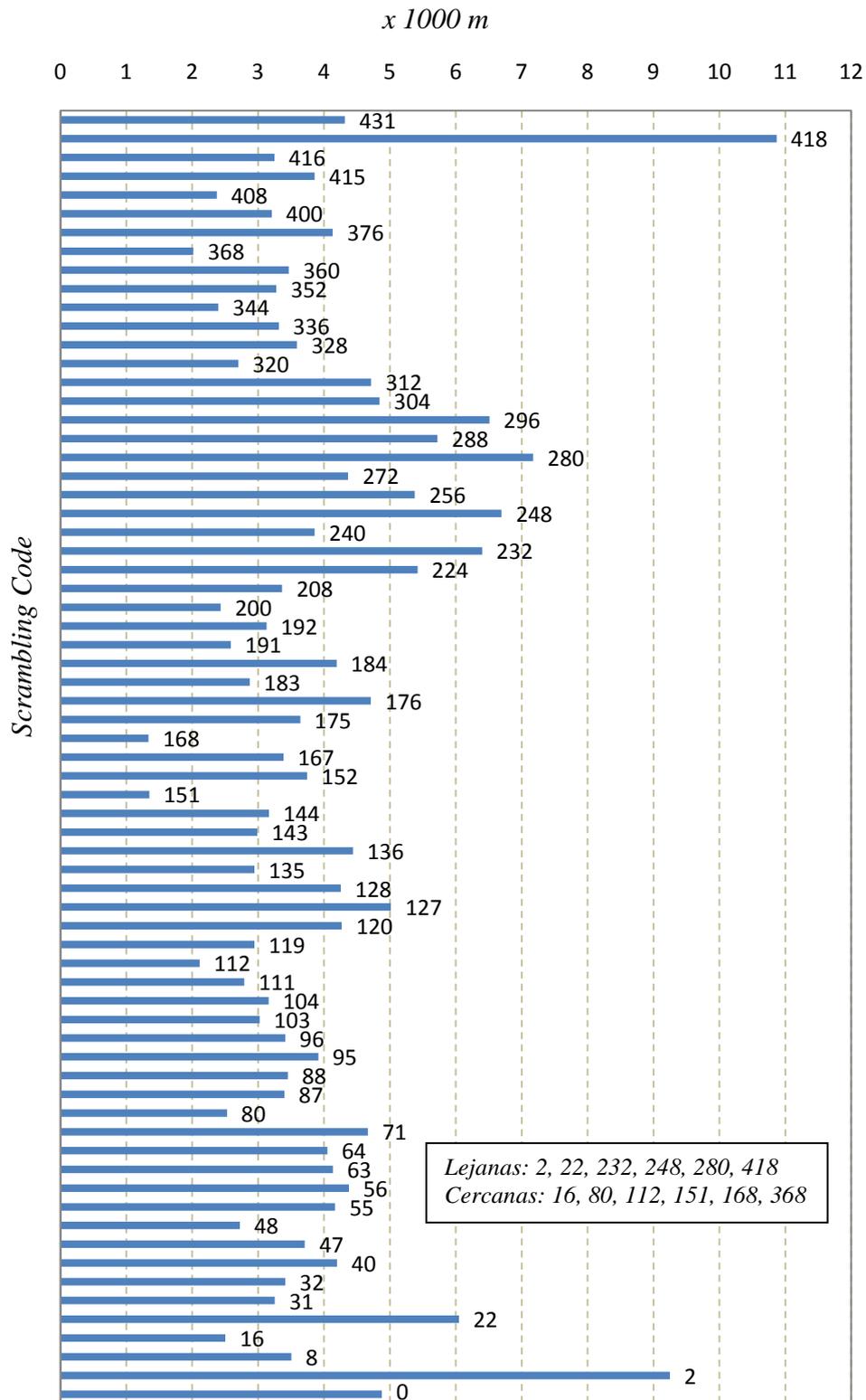


Figura VII. 96 Distancia media de las muestras

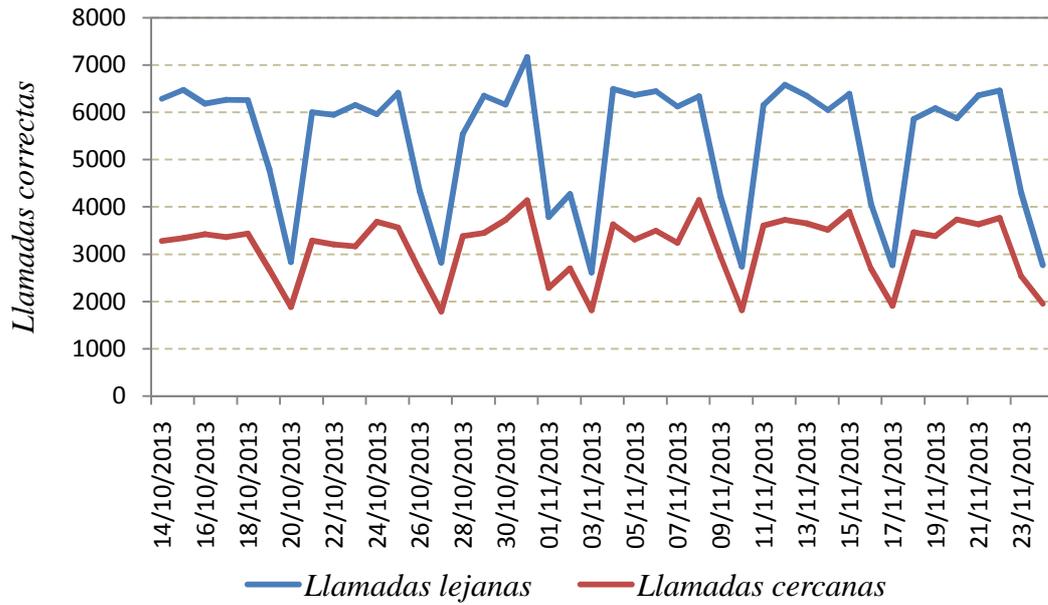


Figura VII. 97 Evolución de las llamadas correctas

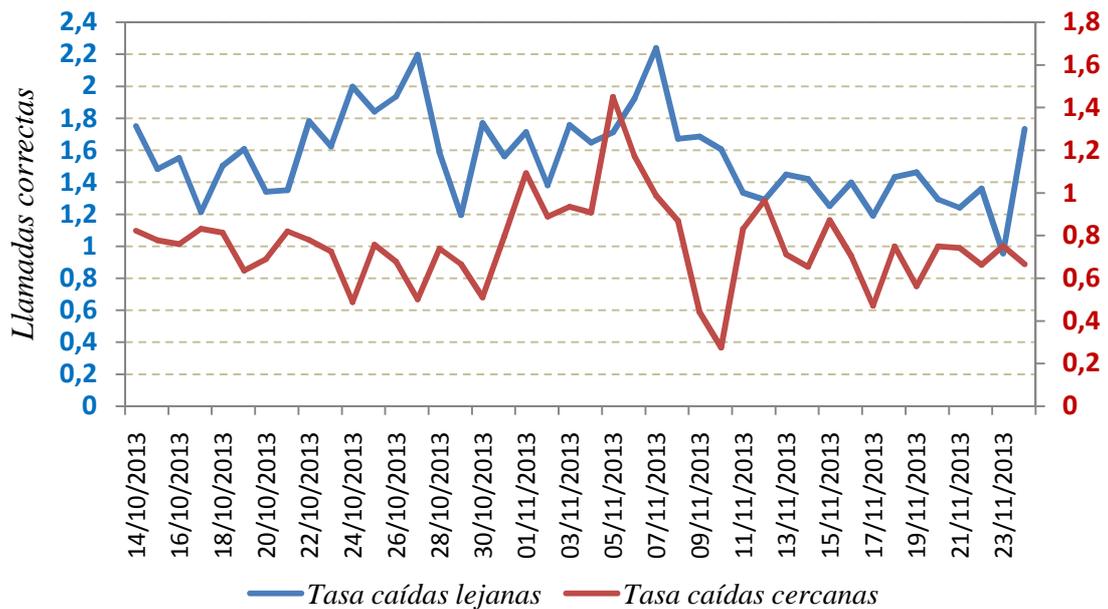


Figura VII. 98 Evolución de la tasa de llamadas caídas

En estas gráficas se muestra una mejora en el total de llamadas correctas, con mayor incremento en las células cercanas. También se observa una disminución en la tasa de llamadas caídas debido a que la relación de colindancias se ha optimizado para los sobrealcances del escenario.

7.3.7 Comparación con los métodos convencionales

Para comparar las configuraciones que propone el algoritmo ANR con la configuración inicial de colindancias diseñada por los métodos expuestos en el apartado 7.3.2, se ha analizado para cada par de células colindantes, los valores de RSCP, Ec/No, número de colindancias definidas y la distancia entre ellas.

En la Figura VII.99 se muestra el histograma de los valores de RSCP (*dBm*) con los que un terminal, enganchado a una célula SC1, está midiendo a su colindancia SC2. En el eje vertical se representa el número de colindancias definidas. Este valor puede ser hasta 31 como máximo por decisión del operador técnico que construye la listas de vecindades de forma manual, o como resultado de la ejecución del algoritmo ANR en función de las restricciones de partida.

La leyenda de colores muestra las configuraciones aplicadas que se detallaron en la Tabla VII.3, siendo la configuración 0 la que tenía el escenario antes de iniciar las pruebas.

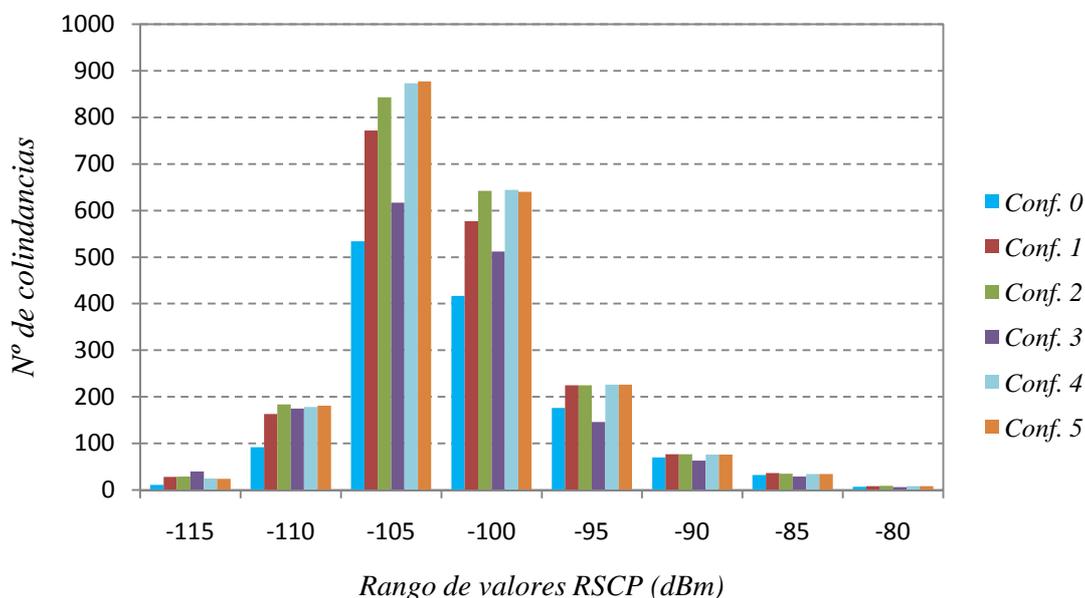


Figura VII. 99 Comparación de valores de RSCP

Como se puede observar, la configuración 0 (situación previa) contiene un menor número de relación de colindancias en todos los rangos de valores de RSCP. La configuración 3 también tiene menos colindancias definidas, ofreciendo el peor índice de llamadas caídas como se mostró anteriormente.

Las configuraciones 4 y 5, con los que se obtuvo una mejora en la calidad de la red, contiene el mayor número de colindancias. La configuración 2 tiene valores similares, pero la distancia entre células estaba limitada a 10 Km.

En la Figura VII. 100 se muestra el histograma de los valores de Ec/No (*dB*) en función del número de colindancias.

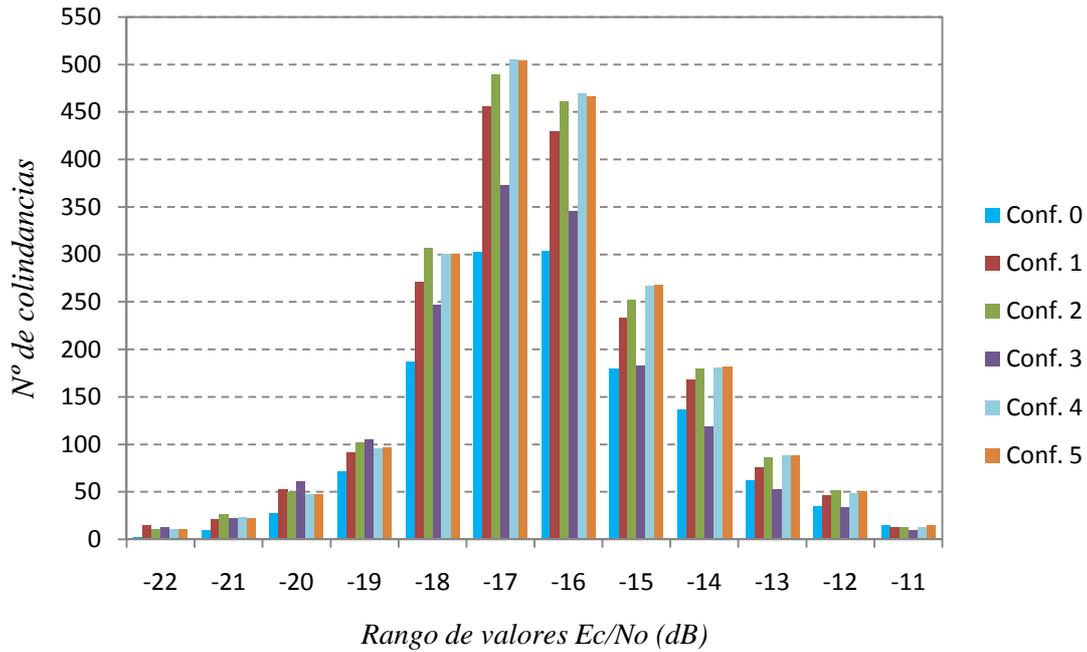


Figura VII. 100 Comparación de valores de Ec/No

La distribución del número de colindancias en función de la interferencia tiene el mismo patrón que en el caso del RSCP, salvo las que están definidas a -19 dB o menor donde la configuración 3 tiene valores similares a los de su entorno.

La Figura VII.101 muestra la distribución de colindancias recibidas en función del número de veces que un terminal enganchado a una célula, recibe a otra célula colindante. Se puede observar una gran diferencia de casi el doble entre la configuración inicial y el resto de configuraciones.

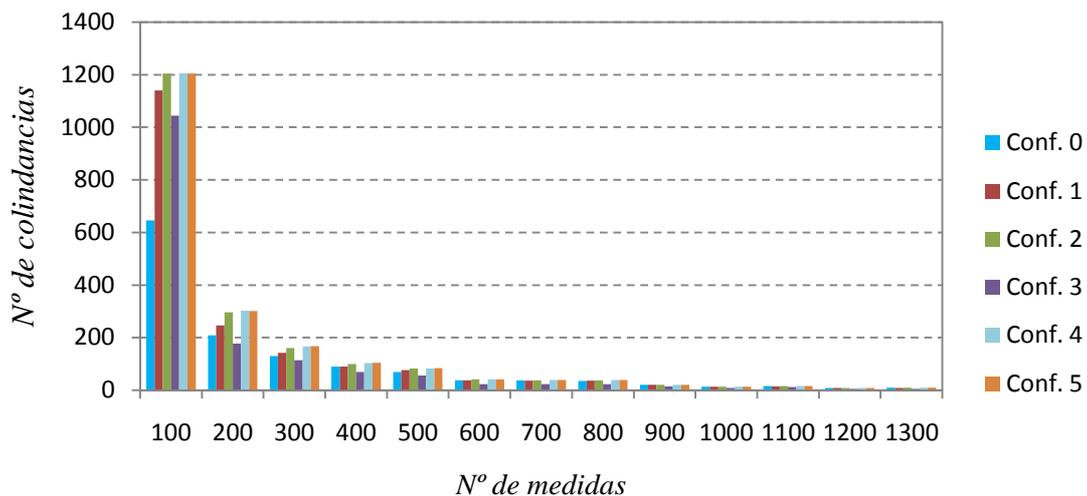


Figura VII. 101 Comparación de valores en función del número de medidas

La Figura VII.102 muestra la distribución de colindancias recibidas en función de la distancia entre células, agrupada por rangos. A pesar de que la configuración 0 no tiene límite de distancia pues no fue definida con el algoritmo, se puede observar que éstas disminuyen rápidamente en comparación con otras configuraciones.

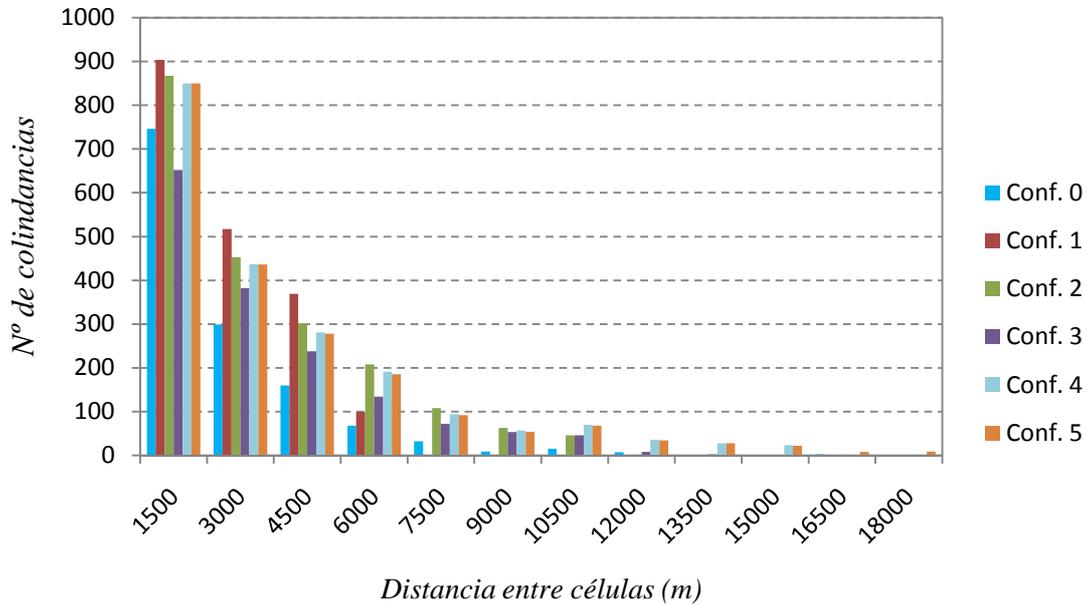


Figura VII. 102 Comparación de valores en función de la distancia

En todos los casos analizados se observa una carencia o menor definición de colindancias definidas en la configuración previa respecto de las propuestas del algoritmo ANR. También la distancia aparece como elemento a tener en cuenta. Estas diferencias resultan ser las que más destacan. No obstante hay otros condicionantes de difícil evaluación, dónde sería necesario el análisis de cada pareja de células vecinas para determinar qué diferencias existen entre los métodos habituales y el algoritmo ANR diseñado.

Bibliografía

- [1] David Ortega Sicilia, Santiago Torres López, Rafael Herradón Díez, "Utilización de la red UMTS en la aviación general," in *Simposium Nacional de la Unión Internacional de Radio*, La Laguna, 2007.
- [2] J. Pérez-Romero et al., "An analysis of deployment alternatives in a real UMTS scenario to support voice and data traffic," *IEEE*, vol. *Vehicular Technology Conference*, 2004. VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th (Volume:6), no. 6, pp. 4385-4389, September 2004.
- [3] David Ortega Sicilia, Santiago Torres López, Rafael Herradón Díez, "UMTS Optimization based on the minimization of the Detected Network Window," in *Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on COMMUNICATIONS*, , Agios Nikolaos, Crete Island, Greece, July 26-28, 2007, pp. 323-326.
- [4] Santiago Torres López, David Ortega Sicilia, Rafael Herradón Díez, "Técnicas de Planificación Automática: Análisis de escenarios Hexasectoriales UMTS," in *Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio*, Oviedo-España, 2006.
- [5] David Ortega Sicilia, Santiago Torres López, Rafael Herradón Díez, "Optimización automática de redes 3G con la herramienta OPTIRED" in *Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio*, Oviedo-España, 2006.
- [6] Hillier and Lieberman, *Investigación de operaciones*: Mc Graw Hill, 2003.
- [7] Patricia Cordero Ravelo, "Herramienta de optimización automática de colindancias para redes UMTS y LTE", Proyecto fin de Carrera Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2015.
- [8] David Ortega Sicilia, Francisco Cabrera Almeida, Antonio Sedeño Noda, Alejandro Ayala Alfonso, "Design and evaluation of an ANR algorithm for LTE in a real scenario with high interference" *Electronics Letters*, ELL-2015-1242.R1 (artículo aceptado por el editor).
- [9] Christian M. Mueller, Hajo Bakker, and Lutz Ewe, "Evaluation of the Automatic Neighbor Relation Function in a Dense Urban Scenario," *IEEE*, no. 978-1-4244-8331-0/11, 2011.

Capítulo VIII

Conclusiones

8.1 Conclusiones

En este Trabajo de Tesis se han realizado estudios sobre el comportamiento de las redes de telefonía móvil en entornos reales con interferencia y sobrealcance. También se han mostrado diferentes métodos manuales y aislados de optimización en los que se ha podido constatar la dependencia mutua que existe entre todas las células de una zona o clúster, donde un cambio de configuración de parámetros o del sistema radiante en una célula, afecta de manera no proporcional en el resto de células colindantes. Estos métodos han demostrado la necesidad de utilizar técnicas de optimización automática que permitan el tratamiento de una gran cantidad de datos, para los que fue necesario diseñar un algoritmo que procesara estos datos, con el objetivo de proponer una lista óptima de colindancias que obtuvo una mejora en la calidad de la red, con lo que la hipótesis planteada pudo ser demostrada.

De la experiencia práctica se pudo comprobar la dependencia mutua que existe entre todas las células de su entorno. Con este procedimiento se demostró que en escenarios densos, no es posible optimizar el rendimiento de una célula o estación base sin producir efectos en las células de su entorno. El cambio de un parámetro o sistema radiante tiene una dependencia no lineal en el resto de la red.

Con el objeto de mejorar la calidad de un conjunto amplio de células, se diseñó un algoritmo ANR para crear listas de colindancias. Para ello se estudiaron los diversos métodos de optimización de redes de transporte, tratando de encontrar una analogía en el método de caminos mínimos, de flujo máximo o de coste mínimo, habitualmente empleado en problemas de redes de telecomunicaciones (entre otros). Pero la dificultad de prever una ruta fija en los terminales no permitió encontrar una relación con los métodos comentados. En una red de telefonía móvil, los terminales disponen de múltiples opciones para ir de un punto a otro, de quedarse en medio de cualquier ruta o incluso de regresar al punto de partida. Los terminales que permanecen estáticos apenas realizan handovers (si acaso cambian de célula por restricciones de capacidad) por lo que quedan fuera de estos supuestos. Por este motivo, se optó por diseñar un algoritmo que eligiera las mejores células colindantes en función de varios conjuntos de restricciones de partida, evaluando el comportamiento de la red para cada uno de ellos.

Para asegurar la continuidad de la llamada es necesario que cada célula tenga configurada como colindantes una lista de hasta 31 células (por restricción del sistema) con buenos niveles de potencia e interferencia, así como las que se encuentran más cerca por la movilidad de los usuarios. Sin embargo, las medidas de los terminales recogidas durante el traceo, no permitieron decidir de forma simple qué células eran las más adecuadas, puesto que la dispersión de valores presentaba las siguientes opciones:

- valores buenos de potencia e interferencia
- valores buenos de potencia pero malos de interferencia
- valores buenos de interferencia pero malos de potencia
- valores malos de potencia e interferencia pero a poca distancia

La configuración de partida del escenario bajo estudio antes de la aplicación del algoritmo ANR presentado, estaba diseñada mediante métodos aislados que se basaban en medidas de campo, estadísticas de funcionamiento de red, por selección de las vecinas que mayor número de veces se recibe, y por proximidad física (a partir de regiones de Voronoi).

El algoritmo diseñado ofrecía como novedad el procesado del conjunto de medidas de todas las células que el móvil era capaz de recibir, para posteriormente realizar una selección de la mejor combinación entre ellas en base a unos criterios por distancia, potencia e interferencia. Se probaron varias condiciones de partida para evaluar su funcionamiento.

El mejor resultado en el funcionamiento de la red se obtuvo con el límite de distancia a 20 Km (el mayor de los probados) y seleccionando células que se recibían con valores de potencia mejor que -90 dBm, e interferencia mejor que -9 dB junto con el mayor número de veces que eran recibidas por el terminal. Los métodos habituales casi siempre eligen las células ordenadas por potencia sin ningún límite, y los que menor tasa de fallos de handover producen. Con el algoritmo diseñado se logró una disminución en la tasa de llamadas caídas, al tiempo que se consiguió aumentar el número de llamadas que se cursan en la red, con lo que el rendimiento del sistema mejoró notablemente.

8.2 Líneas de investigación abiertas

En esta Tesis han quedado sin explorar una serie de temas que permitiría mejorar los métodos de optimización.

Los modelos de propagación estudiados no ofrecen buenas soluciones para escenarios heterogéneos donde se den simultáneamente caminos N-LOS a nivel de calle en zonas urbanas con edificios altos y caminos LOS de usuarios en zonas elevadas que tengan buena visión sobre la población. La línea de investigación que se propone sería el estudio de modelos de propagación mixtos, o bien herramientas de estimación de cobertura que combine los modelos ya existentes, y que también muestra cómo varían las prestaciones de los sistemas radiantes ante obstáculos cercanos.

El análisis y tratamiento de los datos que forman los KPIs producen en ocasiones decisiones de cambios de configuración de red muy abruptas. En la bibliografía

existente apenas se han encontrado algunos trabajos que utilicen la lógica difusa que adapte de una forma realista la red a las necesidades de los usuarios. Uno de los ejemplos más significativos puede ser la gestión de la capacidad de una célula. El método habitual consiste en forzar handovers a las células colindantes, cuando la célula servidora supera un determinado nivel de carga, sin tener en cuenta los antecedentes de tráfico y capacidad de dicha célula. El resultado es que algunos terminales han acabado en células que reciben con menor potencia que la original, con lo que aumenta la potencia necesaria para comunicarse, incrementándose también la interferencia y la probabilidad de que el enlace radio se pierda, produciendo una llamada caída. Una línea de investigación sería desarrollar métodos basados en lógica difusa que permita tomar mejor la decisión de forzar el traspaso en función del tiempo que dura el aumento de carga de la célula, si tiene una periodicidad diaria o semanal, o si bien se debe a un caso singular. Su aplicación valdría también para el resto de casos de usos de las técnicas SON.

Los modelos de movilidad de tráfico ayudarían a estimar la ubicación de los usuarios y su variación durante el día, lo que supondría una interesante fuente de información para el desarrollo y aplicación de algoritmos de optimización de redes de transporte. Este campo de investigación mejoraría la previsión de carga de la red con el objeto de proponer cambios en la configuración de red con antelación.

Para el algoritmo ANR se utilizó el promediado de las muestras de potencia e interferencia. Otro tipo de estadístico o sistema de voting, como el utilizado por Motorola para procesar las medidas en su sistema GSM en los años 90, podría tener validez. Una línea de trabajo sería el estudio y evaluación de otras formas de procesar las muestras de medida. Para el escenario de pruebas, en vez de realizar el promediado, se contabilizó para cada muestra, cuántas de ellas superaban los valores de -90 dBm y -9 dB. Con este criterio, la configuración de colindancias variaba sensiblemente respecto del método anterior. Esta nueva lista de colindancias no se pudo aplicar en la red real por cuestiones diversas, pero queda como propuesta en las líneas de investigación abiertas.

Anexo I

Marco regulatorio para el despliegue de redes móviles

En este anexo se muestra el marco regulatorio, particularizado para Canarias, como un elemento que influye en el despliegue de redes móviles, así como en el funcionamiento y las prestaciones que se pueden obtener.

Títulos habilitantes

Según el Registro de Operadores de redes y servicios de comunicaciones electrónicas de la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones, los títulos habilitantes para la explotación del servicio de telefonía móvil son:

- a) Servicio telefónico móvil disponible al público, en su modalidad GSM, de ámbito nacional.
- b) Servicio telefónico móvil disponible al público, en su modalidad DCS1800, de ámbito nacional.
- c) Servicio de comunicaciones móviles de tercera generación (UMTS), de ámbito nacional.
- d) Servicio de comunicaciones móviles de para LTE, de ámbito nacional.
- e) Explotación de una red pública de comunicaciones electrónicas, soporte del servicio telefónico móvil en las modalidades anteriormente indicadas.
- f) Servicio telefónico fijo disponible al público, de ámbito nacional.
- g) Explotación de una red de comunicaciones electrónicas fija, soporte del servicio telefónico fijo, de ámbito nacional.
- h) Explotación de una red pública de comunicaciones electrónicas que implica el uso del dominio público radioeléctrico en la modalidad de red terrenal, necesaria para la prestación del servicio de telecomunicación de radio-búsqueda en todo el territorio nacional.
- i) Explotación de una red pública de comunicaciones electrónicas que implica el uso del dominio público radioeléctrico en la modalidad de red terrenal, para la prestación del servicio de telecomunicación de radiocomunicaciones móviles terrestres en las zonas de Barcelona, Madrid, Mérida-Extremadura, Santiago-La Coruña, Valencia, Sevilla-Cádiz, Santa Cruz de Tenerife, Las Palmas, Baleares, Zaragoza, Málaga-Costa del Sol, y Bilbao, respectivamente.
- j) Servicios de comunicaciones electrónicas de “Telefonía vocal en grupo cerrado de usuarios”, “Proveedor de acceso a Internet”, “Transmisión de información, texto, imagen y sonido a través del servicio telefónico móvil (vídeo bajo demanda y casi a la demanda)” y “almacenamiento y reenvío de mensajes cortos SMS”.

Regulación estatal

Las leyes que tienen relación con las redes móviles, de manera más o menos directa, son las siguientes:

- a) R.D. 1032/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental.

- b) R.D. 1.131/1988, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del R.D. 1302/1986.
- c) R.D. 1627/1997, de 24 de octubre, de Estudio de Seguridad y Salud en el Trabajo.
- d) Real Decreto 1736/1998, de 31 de julio, de desarrollo del Título III de la LGT en lo relativo al servicio universal de telecomunicaciones, a las demás obligaciones de servicio público y a la explotación de las redes de telecomunicaciones.
- e) Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación.
- f) Orden de 9 de marzo de 2.000, reguladora del uso del dominio público radioeléctrico.
- g) R.D. Ley 9/2000, de 6 de junio de modificaciones al Real Decreto Legislativo 1032/1986 de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental.
- h) Ley 6/2001, de 8 de mayo, de modificación del Real Decreto Legislativo 1302/1986 de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental.
- i) Real Decreto, 1066/2001 de 28 de septiembre, sobre la reglamentación para la protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitarias frente a emisiones radioeléctricas.
- j) Orden CTE/23/2002 de 11 de enero, por la que se establecen condiciones para la prestación de estudios y certificaciones por operadores de servicios de radiocomunicaciones.
- k) Ley 32/2003, de 3 de noviembre, General de Telecomunicaciones.
- l) Ley 9/2014, de 9 de mayo, de Telecomunicaciones.

Regulación autonómica de Canarias

Las leyes y artículos más destacables para la Comunidad Autónoma de Canarias, son:

- a) Decreto Legislativo 1/2000, de 8 de mayo, por el que se aprueba el Texto Refundido de Ordenación del Territorio de Canarias y de Estaciones Naturales Protegidos de Canarias.
- b) Ley Autonómica 11/1990 de 13 de julio, de Prevención del Impacto Ecológico.
- c) Ley 4/1999, de 15 de marzo, del Patrimonio Histórico de Canarias.
- d) Ley 11/2009, de 15 de diciembre, reguladora de la Ordenación Territorial de las Telecomunicaciones de Canarias:
 - *Art. 4.2.b) Los titulares de las actividades han de (...) garantizar la cobertura de los servicios de telecomunicaciones a la población de Canarias.*
- e) Ley 07/2011, de 5 de abril, de actividades clasificadas y espectáculos públicos y otras medidas administrativas complementarias.
- f) *DECRETO 52/2012, de 7 de junio, establece en su NOMENCLÁTOR: “11.31 Instalaciones para la radiocomunicación”.*
- g) *DECRETO 124/2011, de 17 de mayo, por el que se aprueban las Directrices de Ordenación Territorial de las Telecomunicaciones de Canarias:*
 - *Establece la obligatoriedad de presentar un PLAN ANUAL DE DESPLIEGUE.*
 - *Directriz 8.4. Las infraestructuras que tengan por objeto principal satisfacer la demanda de servicios de telefonía móvil a población en suelo urbano (...).*

Regulación insular de Canarias

De forma general, los Cabildos disponen de la siguiente normativa:

- a) Planes Insulares de Ordenación del Territorio.
- b) Planes y Normas de Espacios Naturales Protegidos: Planes Rectores de Uso y Gestión, Planes Directores de Reservas Naturales, Planes Especiales, etc.
- c) Planes Territoriales Especiales de Ordenación.

Regulación municipal de Canarias

- a) Planes generales de ordenación municipal
- b) Ordenanzas específicas de telecomunicaciones

Ley 9/2014, de 9 de mayo, de Telecomunicaciones

El complejo y heterogéneo marco legal afecta al rendimiento de la redes, por lo que esta nueva ley nace con los objetivos de facilitar el despliegue de las redes de nueva generación ampliando su cobertura, y mejorar la oferta de servicios innovadores a los ciudadanos impulsando unas condiciones más efectivas de competencia. La Ley introduce una serie de medidas específicas para alcanzar esos objetivos. Las principales novedades son:

- a) Las redes públicas de comunicaciones electrónicas constituyen equipamiento de carácter básico y su instalación se configura como obra de interés general. Se establece la obligación de instalar estas redes en zonas de nueva urbanización.
- b) Se establecen requisitos técnicos comunes para el despliegue de redes, así como límites máximos únicos en todo el territorio nacional de emisión y exposición a campos electromagnéticos.
- c) Para desplegar las nuevas redes de telecomunicación, los operadores podrán reutilizar las canalizaciones, conductos y emplazamientos de titularidad pública o de otras redes de operadores privados, al objeto de minimizar las obras en los despliegues y con ello las molestias a los ciudadanos.
- d) Se simplifican los procedimientos administrativos estatales para acceder al uso del espectro radioeléctrico.
- e) Se suprimen las licencias urbanísticas y medioambientales para el despliegue de redes de telecomunicaciones en dominio privado. Las licencias serán sustituidas por declaraciones responsables.
- f) Se han diseñado nuevos mecanismos de coordinación y colaboración del Estado con las CCAA y las Entidades Locales que faciliten los despliegues.

Anexo II

Código en C del algoritmo ANR

En este anexo se muestra el código en lenguaje C del algoritmo ANR.

```
#include "proplib.h"
#include <string.h>

unsigned buscarlexmax(colindancia *L, int tamano, double radius) {
    unsigned k, bl, bll, max, kmax= UERROR2;
    max = 0;
    for (k=0; k<tamano; k++)
        if ((L[k].asignado == FALSE) &&( L[k].distancia <
            radius)){
            if (max < L[k].demanda) {
                max =L[k].demanda;
                kmax = k;
                //bl = ((L[k].potencia >=-90) &&
                (L[k].frecuencia >=-9)) ? 0 : 1);
                bl = L[k].buenas;
            }
            else{
                //bll = ((L[k].potencia >=-90) &&
                (L[k].frecuencia >=-9)) ? 0 : 1);
                bll = L[k].buenas;
                if ((max == L[k].demanda) && (bl < bll)) {
                    kmax = k;
                    bll = bl;
                }
            }
        }
    return(kmax);
}

unsigned buscarlexmin(colindancia *L, int tamano, double radius) {
    unsigned k, bl, bll, max, kmax= UERROR2;
    max = 0; bll = 0;
    for (k=0; k<tamano; k++)
        if ((L[k].asignado == FALSE) &&( L[k].distancia <
            radius)){
            //bl = ((L[k].potencia >=-90) && (L[k].frecuencia
            >=-9)) ? 0 : 1);
            bl = L[k].buenas;
            if (bl > max) {
                max = bl;
                kmax = k;
                bll = L[k].demanda;
            }
            else
                if ((bl == max) && (bll < L[k].demanda)) {
                    kmax = k;
                    bll = L[k].demanda;
                }
        }
}
```

```

    }
    return(kmax);
}

void Procesantena(antena *antenai, long int *demandatotal, int
*badassigns, double radius, BOOLEAN primerodemanda){
    int j;
    antenai->nasig =0;
    if (antenai->tamano <= antenai->ncol) {
        for (j=0; j<antenai->tamano; j++)
            if (antenai->L[j].distancia <= radius) {
                antenai->L[j].asignado = TRUE;
                antenai->nasig++;
                printf("%d, ",antenai->L[j].nodo);
                *demandatotal += antenai->L[j].demanda;
                *badassigns += (((antenai->L[j].potencia >=-
90) && (antenai->L[j].frecuencia >=-9)) ? 0 :
1);
            }
        antenai->nsat = 0;
    }
    else {
        antenai->nsat = 0;
        //primero colindantes a dist cero
        for (j=0; j<antenai->tamano; j++)
            if (antenai->L[j].distancia == 0.0) {
                antenai->nsat +=1;
                antenai->L[j].asignado = TRUE;
                antenai->nasig++;
                printf("%d, ",antenai->L[j].nodo);
                *demandatotal += antenai->L[j].demanda;
                *badassigns += (((antenai->L[j].potencia >=-
90) && (antenai->L[j].frecuencia >=-9)) ? 0 :
1);
            }
        j=0;
        while ((j !=UERROR2) && (antenai->nsat < antenai->ncol))
        {
            if (primerodemanda==TRUE)
                j = buscarlexmax(antenai->L,antenai->
tamano,radius);
            else
                j = buscarlexmin(antenai->L,antenai->
tamano,radius);
            if (j!=UERROR2) {
                antenai->nsat +=1;
                antenai->L[j].asignado = TRUE;
                antenai->nasig++;
                printf("%d, ",antenai->L[j].nodo);
                *demandatotal += antenai->L[j].demanda;
                *badassigns += (((antenai->L[j].potencia >=-
90) && (antenai->L[j].frecuencia >=-9)) ? 0 :
1);
            }
        }
    }
}
}

```

```

void lexmindmax(PROBLEM *P, long int *demandatotal, int
*badassigns, double radius, BOOLEAN primerodemanda){
    unsigned i;
    unsigned tasignaciones=0;
    *demandatotal = 0;
    *badassigns = 0;
    for(i=0; i< P->nantenas;i++){
        printf("\n la antena %d tiene las siguientes
        colindancias: {",P->vantena[i].nodo);
        Procesantena(&(P-
        >vantena[i]),demandatotal,badassigns,
        radius,primerodemanda);
        tasignaciones += P->vantena[i].nasig;
        printf("}");
    }
    printf("\n Demanda total %ld Malas colindancias %d (total
    colidancias %d) para distancia
    %.0lf\n",*demandatotal,*badassigns,tasignaciones,radius);
}

int main(int argc, char *argv[])
{
    FILE *fp;
    PROBLEM *P;
    char respuesta, nombrefichero[85];
    long int demandatotal;
    int badassigns;
    int iradius;
    double radius = Maxcost;
    BOOLEAN primerodemanda, fichero_abierto = FALSE;
    primerodemanda = TRUE;
    if (argc > 1)
        {
            strcpy(nombrefichero,argv[1]);
            fichero_abierto = abrirFichero(&fp,nombrefichero);
        }
    else
        {
            clrscr();
            printf("Se ha de especificar un fichero y el numero de
            caminos a determinar\n");
            Formato_fichero();
            clrscr();
            printf("Deseas dar el nombre de un Fichero(y\n): ");
            respuesta = getchar();
            if (respuesta == 'y')
                {
                    printf("\nDame el nombre del fichero en el
                    directorio_actual: ");
                    scanf("%s", nombrefichero);
                    printf("\n");
                    fichero_abierto = abrirFichero(&fp,nombrefichero);
                }
        }
    if (fichero_abierto){
        {

```

```

P = (PROBLEM *) malloc(sizeof(PROBLEM));
//printf("%s ",nombrefichero);
leerproblema(fp,P);
//mostrarProblema(P);
if (argc > 2){
    iradius = atoi(argv[2]);
    radius = iradius;
}
if (argc > 3)
    primerodemanda = atoi(argv[3]);
lexmindmax(P,& demandatotal,
&badassigns,radius,primerodemanda);
free(P);
}
fclose(fp);
}
else
{
    clrscr();
    if ((respuesta == 'y') || (argc > 1))
        printf("Fichero no reconocido\n");
}

return(0);
}

```