Herramientas para potenciar el aprendizaje colaborativo en máquinas eléctricas

Pedro María Lara-Santillán, Montserrat Mendoza-Villena,
Luis Alfredo Fernández-Jiménez, Eduardo García-Garrido,
Enrique Zorzano-Alba, Pedro José Zorzano-Santamaría

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de la Rioja

Resumen: En las titulaciones de Ingeniería existen bastantes dificultades para transmitir los conceptos fundamentales de electromagnetismo aplicados a las máquinas eléctricas. Se trata de conceptos complejos de asimilar por parte de los estudiantes. Para facilitar este aprendizaje, se planteó un proyecto de innovación docente donde se implementaron físicamente las diferentes partes de una máquina eléctrica mediante una impresora 3D, con el objetivo de que se comprobaran visualmente los efectos de aplicar un campo magnético a un rotor móvil.

Hasta el desarrollo de este proyecto, como apoyo a la teoría clásica siempre se ha hecho uso de herramientas didácticas, como son, métodos de aprendizaje cooperativo, videos educativos y pequeños experimentos desarrollados con material de los laboratorios de electricidad.

Mediante el proyecto se buscó generar materiales, de bajo coste, que permitieran comprobar a los estudiantes la interacción de dos campos magnéticos, pudiendo ser uno de ellos controlado mediante variables eléctricas; relacionando estos fenómenos con las partes que integran un actuador electromecánico. Además, se pensó en reforzar la competencia general G17, "Capacidad para comunicarse con personas no expertas en la materia", de las titulaciones implicadas.

Los prototipos, basados en impresión 3D y controladores de electrónica amigable, han sido analizados identificando los problemas de implementación y durabilidad.

Palabras clave: Electromagnetismo, Capacidad de comunicación, Impresión 3D.

1. Introducción

En los últimos años, ha crecido la preocupación entre los profesores y estudiantes de ingeniería por la enseñanza y el aprendizaje en el aula, poniendo un especial interés en la mejora de la enseñanza, que es tan significativa para la formación de los ingenieros. Uno de los mayores desafíos es lograr que los estudiantes asimilen conocimientos experimentando con actividades prácticas de manera rápida y fácil. Muchas universidades no disponen de una infraestructura adecuada, disponibilidad de laboratorios o presupuesto para que los estudiantes puedan llevar a la práctica este tipo de experimentos. Para los estudiantes de Ingeniería Eléctrica, estos desafíos

son aún mayores debido a que se requiere el uso de laboratorios prácticos y bien equipados, especialmente en actividades con sistemas de energía y motores eléctricos (Faria et al., 2020).

El electromagnetismo, y más concretamente el magnetismo, es una de las materias de ingeniería que los estudiantes, a pesar de que sus bases físicas son desarrolladas desde los estudios previos a su acceso a la universidad, ven menos clara su aplicación. Una de las razones, se centra en que en las asignaturas de educación secundaria en las que se deberían estudiar estos conceptos se priorizan otras materias frente a las relacionadas con temas eléctricos y magnéticos; y muy especialmente frente a los segundos.

Otra posible razón es que los campos magnéticos no son visibles de una forma tan directa como lo son los asociados a movimientos, fuerzas de otra naturaleza, etc. Por ejemplo, es fácil ver la deformación de un muelle cuando se le aplica una fuerza, e incluso la fuerza de oposición de dicho muelle; pero, a pesar de ser también un campo de fuerzas, no es fácil visualizar, ni cuantificar los efectos de un campo magnético, ni su interacción con las corrientes y otros campos eléctricos.

A lo anterior, debe sumarse la falta de motivación que sufren los alumnos de los grados no relacionados directamente con electricidad. Los estudiantes de estos grados, inicialmente ven el electromagnetismo como una materia poco útil para ellos; a pesar de ser una materia obligatoria dentro de su formación como Ingenieros.

Una prueba de la complejidad que supone el aprendizaje de estos conceptos básicos de electromagnetismo se encuentra en la búsqueda por parte de los docentes de diferentes métodos didácticos para mejorar su comprensión, por ejemplo, el empleo de crucigramas (Olivares et al., 2008), actividades lúdicas en clase (Hernández Martínez y Villavicencio Torres, 2017), laboratorios virtuales (Iskander, 2002), entre otros.

Por tanto, se hace patente la necesidad de desarrollar prototipos elementales que ayuden a mostrar las interacciones y aplicaciones de los campos magnéticos con otros campos eléctricos y/o magnéticos. Dichos elementos deben ser portables, para que permitan su utilización fuera de un laboratorio específico.

Actualmente, se dispone de una herramienta capaz de construir estructuras diseñadas por el usuario y que se pueden adaptar a un amplio campo de aplicaciones industriales. La utilización de la impresora 3D en la fabricación de dispositivos de bajo coste y portables aporta muchas ventajas en la enseñanza de todos los niveles educativos. La demostración visual de fenómenos que son muy complejos de entender teóricamente ha supuesto un gran avance en el campo de la formación de los ingenieros. En Ingeniería Eléctrica, el diseño y posterior construcción de un motor BLDC (Brushless de Corriente Continua) mediante impresora 3D es posible utilizando materiales PLA (Ácido Poliláctico). Con este dispositivo, los estudiantes, que se convertirán en ingenieros, pueden ampliar su conocimiento, probar diferentes diseños y plantear hipótesis en el aula, sin equipo especial (Stakhiv et al., 2020). En el diseño de motores eléctricos también se ha utilizado la técnica de impresión 3DMMP (Proceso de impresión 3D con varios materiales) que ofrece la oportunidad de producir estructuras electromagnéticas completas de varios materiales que pueden soportar temperaturas extremadamente altas (Trnka et al., 2020).

Por otro lado, cuando los sistemas de aprendizaje implican la participación activa del alumnado mejoran la motivación de este y la asimilación de contenidos (López Espinosa, 2011).

Esta idea ha motivado también la necesidad de diseñar nuevos sistemas que lleven asociada la realización física de elementos relacionados con los contenidos aplicados de campos

electromagnéticos, cuyo conocimiento se desea facilitar. Se trata de trasladar la cultura DIY (Do It Yourself), que fue objeto del proyecto europeo "*DIYLab*" (*DIYLab - Do It Yourself in Education: Expanding Digital Competence to Foster Student Agency and Collaborative Learning*, 2016) en varios niveles educativos, al aprendizaje de electromagnetismo (Mishonov et al., 2017).

Dentro de la cultura DIY se pretende impulsar especialmente el "aprender de los otros y con los otros" (Domingo et al., 2014). Se trata de contar con una herramienta más para mejorar las competencias generales de los grados técnicos relacionadas con la comunicación: "Comunicación oral y escrita de la propia lengua", "Comprensión de textos escritos en una segunda lengua relacionados con la propia especialidad", "Liderazgo", "Capacidad para comunicarse con personas no expertas en la materia", etc.

Este objetivo también se puede obtener trabajando en un entorno de aprendizaje cooperativo, en el que los equipos de trabajo encuentren una serie de tareas que se basan en habilidades existentes, y al mismo tiempo expandan gradualmente su conocimiento y experiencia en disciplinas fuera de la suya. Este enfoque de aprendizaje basado en proyectos permite al estudiante realizar exposiciones en profundidad de problemas con las terminologías especializadas. A menudo, para estos estudiantes es el primer contacto con dichas terminologías (Eppes et al., 2011).

Teniendo en cuenta todo lo anterior, y aunando los contextos de aprendizaje en una materia específica y competencias de comunicación, se hace atractiva la idea de integrar a los estudiantes dentro de las actividades de difusión, captación, e incluso en otras relacionadas con la potenciación de la ciencia y tecnología en niveles formativos no universitarios dentro de las actividades implementadas en la ETSII (Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial). No obstante, una parte de las herramientas, también es interesante que se utilice dentro de los procesos de aprendizaje universitario (por ejemplo, en las metodologías puzle).

Llegado este momento, se presenta el reto de que los materiales de laboratorio al uso no se prestan a una interacción con personas que no cuenten con un grado de formación mínima (tal y como el que reciben los alumnos previamente a la implementación de la práctica), o al precio de los equipos que no permite contar con un número suficiente para implementar soluciones a costes asumibles.

Todo lo anteriormente expuesto llevó a la necesidad de diseñar e implementar físicamente prototipos que contasen, entre otras, con las siguientes características:

- Permitir interactuar de forma básica con los campos electromagnéticos. Por tratarse de conceptos "básicos", los fundamentos teóricos asociados deberán ser simples, hasta el punto de que un alumno pueda asimilarlo en un tiempo muy reducido, e incluso ser capaz de transmitirlo a terceras personas.
- Ser un diseño no terminal, de forma que permita la participación activa de alumnos no expertos en su finalización, reconfiguración, etc.
- Permitir que las actuaciones de los alumnos anteriores sean siempre en un entorno "seguro" desde una perspectiva de riesgos hacia las personas; o, al menos, dentro de los márgenes de trabajo fijados.

Como conclusión a los argumentos descritos, se planteó un proyecto de innovación docente en el que se consideró conveniente que los prototipos, destinados al aprendizaje del fenómeno electromagnético en estudiantes de ingeniería, integrasen sistemas atractivos hacia las nuevas generaciones tales como la impresión 3D. Estos dispositivos deben dar soporte a la parte estructural del mismo y sistemas de control fácilmente programables, tales como los basados en plataformas abiertas Open Source. Se trata de herramientas cuyo uso básico, en algunos casos, forman parte de campus tecnológicos orientados a estudiantes de niveles formativos inferiores y que en otro extremo llegan a formar parte de los planes formativos de colegios profesionales (por ejemplo, del Colegio Oficial de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales de La Rioja, COGITIR).

2. Metodología

Con anterioridad al planteamiento del proyecto de innovación docente y del comienzo de su desarrollo, se conocía la existencia de ciertos materiales ya implementados por otros grupos de trabajo. Por tanto, la primera fase consistió en hacer una revisión de los materiales generados por otros grupos y que se encontrasen disponibles en formato abierto, o al menos en un formato parcialmente "aprovechable"; centrándose fundamentalmente en las leyes básicas de electromagnetismo y en sus aplicaciones en la implementación de máquinas eléctricas y en experiencias de aprendizaje colaborativo en alumnos STEM.

Aunque, a priori, podría estimarse que los proyectos descritos en las páginas web acompañadas de videos deberían ser susceptibles de ser utilizados, se verificó que muchos de ellos presentaban errores conceptuales o, incluso, los vídeos asociados no mostraban la realidad; sino que ocultaban elementos en las zonas no visibles.

Después de analizar la información encontrada, se estimó que, dentro de todos los modelos constructivos de motores, el proyecto debería trabajar sobre los motores brushless DC y sobre su controlador y sensores. Además, se estimó necesario generar elementos capaces de visualizar la existencia y dirección de los campos magnéticos asociados a los conductores eléctricos recorridos por corrientes (Figura 1) y de explicar la ley de Lorentz (Figura 2).

Figura 1. Visualizador del campo magnético asociado a un conductor eléctrico.

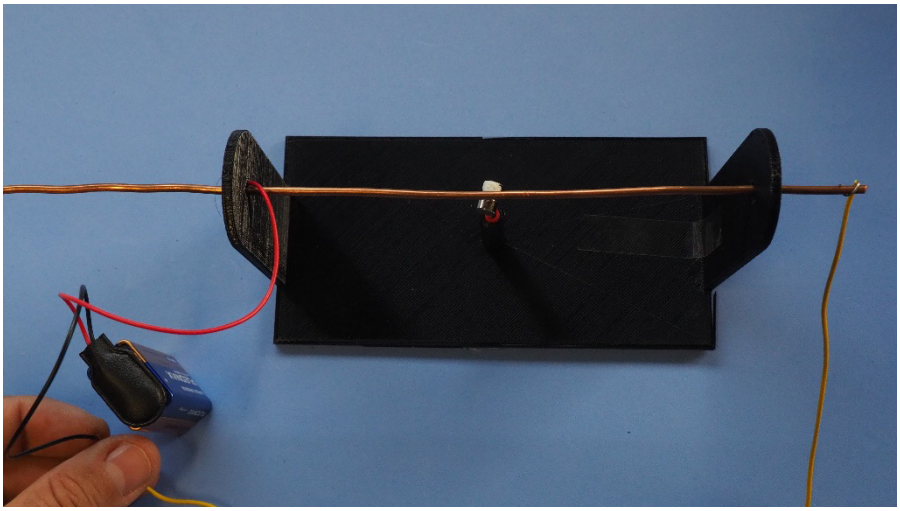
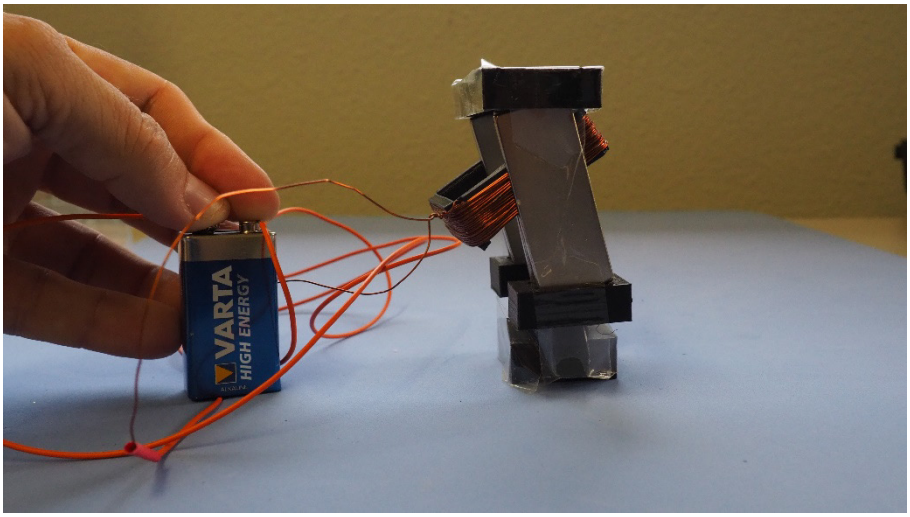


Figura 2. Visualizador de la fuerza de Lorentz.



Todos estos sistemas fueron complementados con diferentes útiles de electrónica: elementos para identificar campos magnéticos mediante un polímetro (Figura 3), si se desea cuantificar, o un led si únicamente se pretendía verificar su polaridad, y drivers para elevar las señales de los sistemas de microprocesador hasta niveles capaces de excitar los devanados de las máquinas construidas (Figura 4).

Figura 3. Sensor efecto hall para media de campos magnéticos.

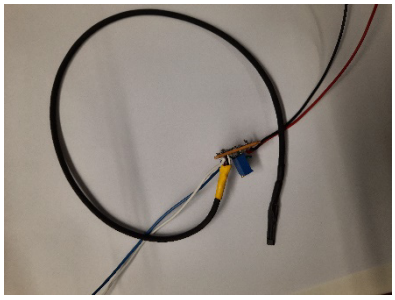
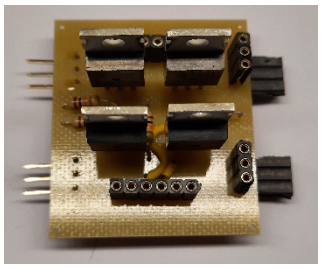


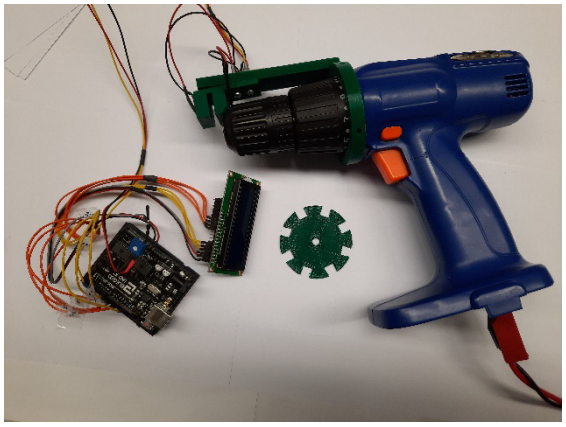
Figura 4. Driver de baja tensión.



Finalmente, para simplificar el trabajo de bobinado se fabricó un sistema semiautomático para ayudar a implementar los devanados de forma más rápida y fiable (Figuras 5 y 6).

Figura 5. Bobinador basado en Lego Mindstorms.

Figura 6. Bobinador basado en taladro.



El diseño del sistema, que permite hacer patente el campo magnético asociado a un conductor recorrido por una corriente, se basa en la implementación de una brújula gobernada por un conductor; por el que se hace circular corriente continua. Dicho elemento se muestra en la Figura 1. A diferencia de las brújulas comerciales, puede desmontarse para ver su composición y bases de funcionamiento, y es capaz de trabajar dentro de un amplio rango de inclinaciones del plano de la base. Para su alimentación es suficiente con el uso de una pila.

Para visualizar la interacción entre campos magnéticos y corrientes eléctricas se diseñó un prototipo reversible, compuesto por un bobinado móvil, que se introduce dentro de un campo magnético generado por imanes y un conjunto de piezas plásticas que aseguraban la posición mecánica de los imanes. Al alimentar el bobinado con la polarización adecuada, el estudiante ve como el bobinado móvil se desplaza verticalmente, hasta que se choca contra un límite superior. Cuando se invierte la posición del prototipo, se permite reflexionar a los estudiantes sobre la posibilidad/necesidad de cambiar el sentido de las fuerzas de interactuación.

Ambos diseños son simples, de dimensiones reducidas, y alimentados mediante pequeñas baterías, por lo que pueden ser fácilmente transportados desde los laboratorios hasta aulas u otros espacios.

En la siguiente etapa se diseñó un motor, donde se pudieran identificar claramente los elementos. Como ya se ha comentado, se pensó que una máquina brushless ("sin escobillas", donde uno de los campos magnéticos está creado a partir de imanes permanentes, y carece de contactos móviles), lo que permitiría la comprensión de las leyes electromagnéticas de una forma más fácil

que con otro tipo de aplicaciones. Además, se consideró importante que el diseño permitiese variar parámetros constructivos y de control de forma flexible.

Con la intención de flexibilizar el prototipo, se pensó en la realización de un diseño modular, con un soporte físico realizado mediante impresión 3D. En este soporte se hace necesario que las bases estructurales de los motores no sean cerradas, así se le dará la posibilidad al estudiante o al docente de poder variar algunos elementos constructivos de su máquina, o ensayar sus estrategias de control; dependiendo del nivel formativo del estudiante y de su especialidad.

A la hora de diseñar el modelo, se decidió que, tanto de estator como de rotor se construyeran de manera modular, de modo que se pudiese contar con varios elementos constructivamente compatibles y combinables, a modo de kit.

En cuanto al estator, se diseñó una caja soporte/contenedor cuya tapa diese soporte físico al propio estator (Figuras 7 y 8).

Figura 7. Caja soporte para estator y sensores.

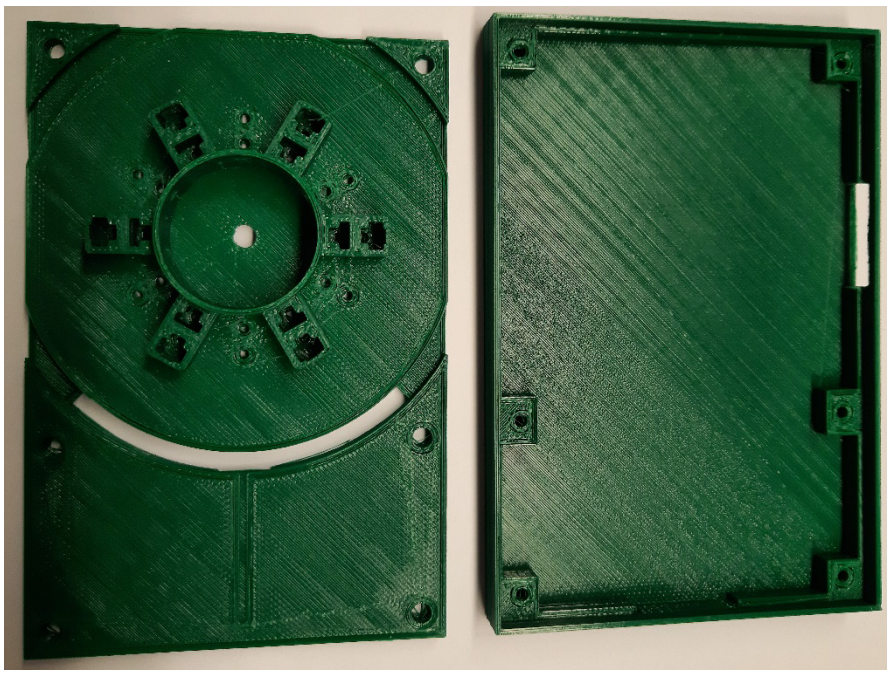
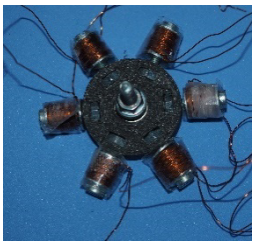
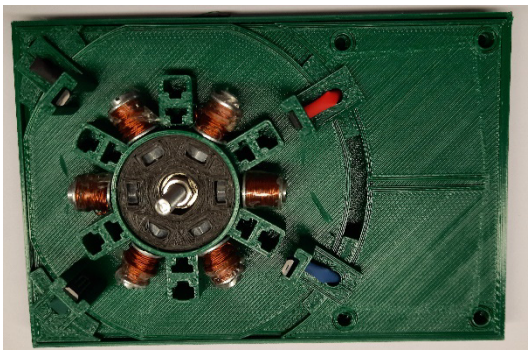


Figura 8. Estator antes y después de ser embebido en la tapa de la caja soporte.



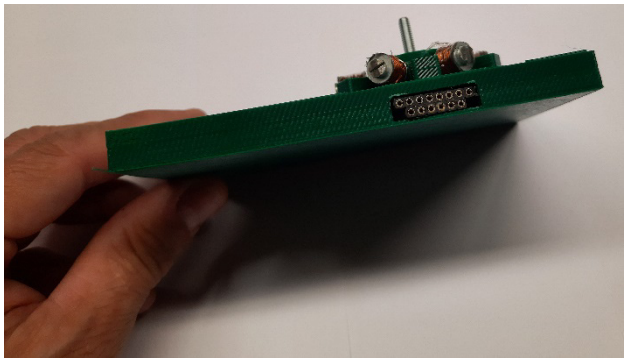


Durante el proceso de implementación del estator se probaron varios materiales de soporte para la impresión 3D, entre ellos PLA, ABS y PLA magnético. En el proceso constructivo se optó, para facilitar la ejecución, por fraccionar el estator en varias piezas; siendo cada uno de los polos un bobinado en un soporte independiente, que luego permitiese ser integrado en el conjunto.

Dentro de los materiales, utilizados para construir los bobinados de los polos magnéticos, se emplearon varias composiciones como PLA magnético, acero, y otros materiales fáciles de mecanizar, pero sin base ferromagnética. Lo que permitió hacer un diseño final que conjugase el rendimiento magnético y las fases de mecanizado y bobinado.

En cuanto a la conexión eléctrica de los devanados, se optó por exteriorizar los contactos de cada uno de los polos, pero sin realizar ninguna conexión eléctrica en el interior de la caja. De esta forma es posible reconfigurar eléctricamente el sistema en cualquier momento. Esto permite cambiar la conexión del estator de estrella a triángulo o actuar de forma completamente independiente cada uno de los polos (Figura 9).

Figura 9. Caja soporte para estator: conector de los devanados del estator.



También fueron realizadas pruebas relativas a la unión de las partes móviles. Se realizaron prototipos de rotores en los que la propia impresión 3D del soporte actuase como cojinete y prototipos basados en la utilización de rodamientos de diferentes formatos. En cuanto a los rotores, bajo un mismo formato dimensional se construyeron prototipos con diferente número de pares de polos. De esta forma se pueden implementar máquinas que requieran diferentes estrategias de control.

La siguiente etapa del proceso fue la de evaluación de los resultados en el uso del material con los alumnos. Para ello, se diferenciaron dos escenarios.

El primer escenario es la utilización de las herramientas elementales de visualización de campos electromagnéticos en las visitas de enseñanzas preuniversitarias. Este escenario busca que los alumnos universitarios potencien su capacidad de comunicación dentro del ámbito del electromagnetismo, mediante la explicación de las leyes fundamentales a estudiantes preuniversitarios. Además, como efecto secundario se busca conseguir un efecto motivador en los participantes.

El segundo escenario es el que busca potenciar el autoaprendizaje y el aprendizaje colaborativo entre iguales basado en el motor BLDC; donde los estudiantes cuenten con una herramienta que

permita contrastar los conocimientos adquiridos en el aula, a la vez que reflexionar sobre otros aspectos del funcionamiento de la máquina.

Como fase final se pensó en establecer una realimentación de los virtudes y defectos tanto de los nuevos materiales implementados como de la metodología de trabajo de los estudiantes; de modo que se pueda entrar en un proceso de depuración, que permita mejorar y/o generar nuevos materiales y metodologías. Para esta fase es imprescindible la interactuación entre los alumnos y compartir ciertos materiales, de modo que los receptores de aprendizaje puedan ser también participes activos del proceso; siendo ellos mismos los que realicen las acciones necesarias sobre los circuitos eléctricos, etc.

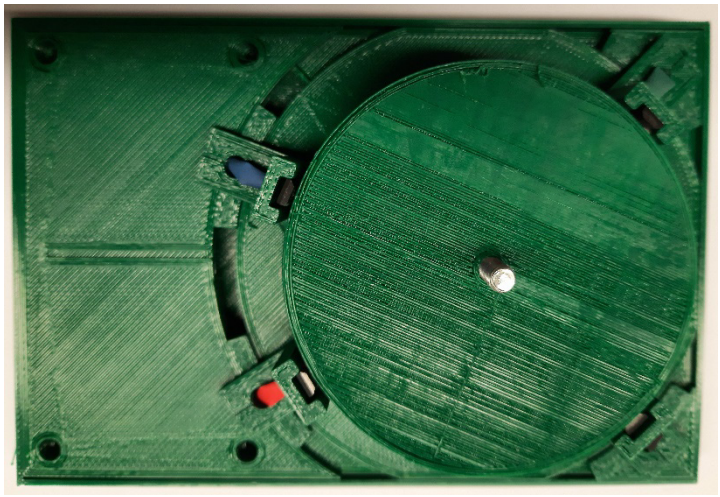
3. Resultados

Las herramientas para la comprensión de las leyes fundamentales del electromagnetismo fueron testadas con los alumnos de las visitas preuniversitarias.

Durante las visitas se pudo comprobar que los alumnos eran capaces de asimilar la base conceptual asociada a las leyes fundamentales. Se verificó que, cuando se explicaba a los estudiantes la ley y posteriormente se les hacía una demostración con los prototipos, los estudiantes eran capaces de deducir las posibles actuaciones que se podían realizar para cambiar de sentido las fuerzas, o predecir el comportamiento del prototipo al cambiar alguna de sus entradas.

La figura 10 presenta el prototipo del motor brushless con sensores hall integrados en el mismo, para la realización de control con realimentación.

Figura 10. Prototipo de motor BLDC outruner.



Como resultado del ensayo de distintos materiales y formas constructivas se dedujo que a muy bajas velocidades es posible implementar los acoplamientos mecánicos entre los rotores y estatores sin necesidad de utilizar rodamientos. A medida que se aumenta la velocidad de trabajo de los prototipos se hace necesario utilizar rodamientos. Dichos rodamientos han de ser de una calidad mínima, y estar preparados para soportar leves fuerzas axiales.

En cuanto a los ensayos de los rotores, han demostrado la necesidad de dotar de una envolvente mecánica para los imanes, cuando se opera a alta velocidad.

Durante el proceso de construcción también se han podido comprobar factores tales como la agresividad de los filamentos magnéticos hacia el extrusor de la impresora 3D.

Finalmente, la fase de aprendizaje cooperativo entre iguales no pudo implementarse de acuerdo a lo planificado, debido a que el periodo en que estaba programado coincidió con las restricciones sanitarias asociadas al COVID-19. Por tanto, aún se está en el proceso de recopilación de información que permita depurar la herramienta del motor y evaluar hasta qué punto es efectivo el autoaprendizaje, el aprendizaje colaborativo y la potenciación de la capacidad de comunicación de los alumnos asociados a la máquina.

4. Discusión y/o conclusiones

El proyecto de innovación docente objeto del presente capítulo ha permitido la generación de nuevos materiales didácticos.

Algunos de los materiales didácticos pueden ser utilizados dentro de los procesos divulgativos a estudiantes preuniversitarios para interactuar con ellos, ayudar a potenciar su capacidad deductiva y estimular su inquietud hacia los procesos electromagnéticos.

Se ha desarrollado un prototipo de motor brushless, del que se espera que potencie el autoaprendizaje y el aprendizaje colaborativo de los alumnos, así como que mejore la motivación de los alumnos en materias relacionadas con el electromagnetismo y potencie la capacidad de comunicación de los alumnos.

El prototipo es una herramienta abierta que permite la reconfiguración física de la misma y la implementación de diferentes estrategias de control.

Agradecimientos

Esta investigación forma parte del proyecto “Desarrollo de un sistema para la mejora de la comprensión del magnetismo en máquinas eléctricas y la potenciación del poder de comunicación de los alumnos de ingeniería”, financiado por la Universidad de La Rioja, en la convocatoria de PID 18-19, con referencia: PID52.

Referencias

DIYLab - Do It Yourself in Education: Expanding Digital Competence to Foster Student Agency and Collaborative Learning. (2016). https://diylab.eu/

Domingo, M., Sánchez, J. A., y Sancho, J. M. (2014). Investigar con y sobre los jóvenes colaborando y educando. *Comunicar*, *21*(42), 157-164.

Eppes, T., Milanovic, I., y Russell, I. (2011). Multiphysics modeling with high priority research applications. *2011 IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON 2011*, 59-64. https://doi.org/10.1109/EDUCON.2011.5773113

Faria, G., Peres, M. F., Neto, O. M. D. S., y Silva, C. A. G. Da. (2020). An Educational Didactic Machine to Improve the Learning Process of Motor Protection Mechanisms in Electrical Engineering High Education. *Revista Iberoamericana de Tecnologias Del Aprendizaje*, *15*(4), 253-261. https://doi.org/10.1109/RITA.2020.3033169

Hernández Martínez, A. R., y Villavicencio Torres, M. (2017). Ambientes lúdicos para la enseñanza del electromagnetismo en el bachillerato. *Latin-American Journal of Physics Education*, *11*(2), 2309(1)-2309(10). http://www.lajpe.org/jun17/2309_MRAHM_2017.pdf

Iskander, M. F. (2002). Technology-based electromagnetic education. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *50*(3), 1015-1020. https://doi.org/10.1109/22.989985

López Espinosa, S. (2011). El aprendizaje a través de la participación del estudiante en actividades prácticas. *XII Congreso Iternacional de Teoría de La Educación*, 1-17. https://www.cite2011.com/wp-content/Comunicaciones/Escuela/044.pdf

Mishonov, T. M., Varonov, A. M., Maksimovski, D. D., Manolev, S. G., Gourev, V. N., y Yordanov, V. G. (2017). An undergraduate laboratory experiment for measuring ϵ 0, μ 0 and speed of light c with do-it-yourself catastrophe machines: Electrostatic and magnetostatic pendula. *European Journal of Physics*, *38*(2). https://doi.org/10.1088/1361-6404/38/2/025203

Olivares G., J. C., Escalante A., M., Escarela P., R., Campero L., E., Hernández A., J. L., y López G., I. (2008). Los crucigramas en el aprendizaje del Electromagnetismo. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, *5*(3), 334-346. https://revistas.uca.es/index.php/eureka/article/view/3744

Stakhiv, H., Solomchak, O., Stepien, M., y Lasek, P. (2020). Analysis and Experimental Investigation of 3D Printed Electric Motor with Permanent Magnets. *2020 11th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2020 - Proceedings*. https://doi.org/10.1109/ICEPDS47235.2020.9249306

Trnka, N., Rudolph, J., y Werner, R. (2020). Magnetic properties of ferromagnetic materials produced by 3D multi-material printing. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, *2020-June*, 326-331. https://doi.org/10.1109/ISIE45063.2020.9152231