

Inducción electromagnética y carga inalámbrica: caracterización experimental

Víctor Rubio-Jiménez⁽¹⁾, Miguel Ferrando-Bataller⁽²⁾, Marta Cabedo-Fabrés⁽²⁾

E-mail: vrubjim@teleco.upv.es, mferrand@dcom.upv.es, marcafab@dcom.upv.es

⁽¹⁾Universitat Politècnica de València, Valencia, España.

⁽²⁾Dpto. de Comunicaciones, Universitat Politècnica de València, Valencia, España.

Resumen—In this paper, the concept of electromagnetic induction applied to wireless charging systems is presented. Using the Qi standard as a reference, some simple but interesting experiments are proposed that can be carried out in laboratory practices related to Physics and Electromagnetic Fields subjects. Using a low-cost vector network analyzer (VNA) and two flat coils, the coupling effect between them can be measured, and the efficiency loss can be evaluated in terms of the separation distance and spatial arrangement of the coils. Also, using a commercial base station charger and a coil connected to the VNA, the implementation of a communication protocol between the base station charger and the device prior to its charging. These experiments allow introducing students in early courses of undergraduate degrees to physical concepts of electromagnetism and instrumentation.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad hacemos uso de forma diaria de determinados dispositivos electrónicos donde la batería juega un papel importante en su uso. Uno de estos dispositivos es el teléfono móvil, donde dependiendo del hábito de uso, la batería puede aguantarnos todo el día o una parte de este, obligando a realizar varias cargas diarias. Otros dispositivos que se usan a diario pueden ser, por ejemplo, los cepillos de dientes eléctricos. En estos dispositivos las baterías juegan un papel importante, evolucionando hacia sistemas de carga que facilitan su reabastecimiento, en unos casos a través de una carga sencilla y rápida, o incluso cargas de forma inalámbrica. El término inalámbrico aplicado al contexto de carga de baterías no quiere decir que estos dispositivos se carguen en cualquier lugar y en cualquier momento, sino que el proceso de carga de la batería se realiza sin una conexión física a la red eléctrica. El término más apropiado sería carga por inducción o carga electromagnética, porque este es el principio físico que se implementa en este tipo de dispositivos. La idea es sencilla y consiste en generar un campo electromagnético como emisor de energía que se captaría en el dispositivo a cargar. En este tipo de carga, ese campo electromagnético es generado por un soporte para la carga, que podemos denominar transmisor, siendo el receptor el dispositivo a cargar, por ejemplo el teléfono móvil. En la Figura 1 se muestra un sistema de carga inalámbrica para un teléfono móvil. Para lograr dicha carga, ambos dispositivos cuentan con bobinas de inducción electromagnética.

Existen diferentes estándares de carga inalámbrica, entre los que destacan Qi, Powermat y Rezence. Tanto Qi como Powermat están basados en el principio de inducción electromagnética de campos cercanos, mientras que el estándar Rezence está basado en el principio de acoplamiento por resonancia magnética. Qi es a día de hoy el estándar más ex-

tendido ya que fue creado por más de un centenar de empresas del sector tecnológico (*Wireless Power Consortium*) [1], entre las que destacan Huawei, HTC, Microsoft, LG y Energizer, entre otras.

En asignaturas como Física o Campos Electromagnéticos, de las diferentes titulaciones de grado relacionadas con las telecomunicaciones, se abordan los principios físicos que permiten generar un campo electromagnético y como este se propaga por el espacio, así como los procesos de inducción electromagnética. Para entender mejor estos conceptos desde un punto de vista práctico y que despierte interés por parte del alumnado por las aplicaciones más próximas, resulta sencillo plantear y diseñar determinadas prácticas de laboratorio donde se analice el efecto de inducción contextualizándolo en aplicaciones de carga inalámbrica. Este tipo de prácticas permite reforzar los conceptos vistos en teoría, al tiempo que permite conocer los diferentes estándares existentes en el momento.

El objetivo de esta contribución es presentar los fundamentos teóricos básicos que intervienen en los diferentes estándares de carga inalámbrica, así como diseñar y proponer unos experimentos basados en dispositivos de fácil acceso y baratos que, aunque siendo sencillos, permiten afianzar los conceptos teóricos estudiados en las clases de teoría de aula.

La comunicación está organizada del siguiente modo. En la Sección II se presentan los fundamentos teóricos del proceso de inducción que se aplica en los sistemas de carga inalámbrica. En la Sección III se presentan una serie de experimentos, con un protocolo de medida y resultados. En la Sección IV se presentan las conclusiones de este trabajo.



Fig. 1: Base y teléfono móvil como dispositivo de carga.

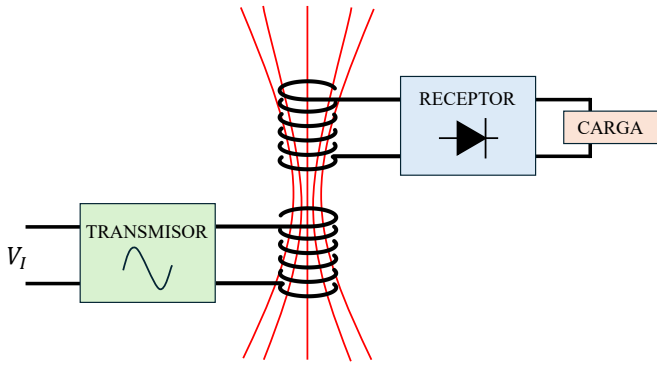


Fig. 2: Esquema de un sistema de transferencia de potencia inalámbrico.

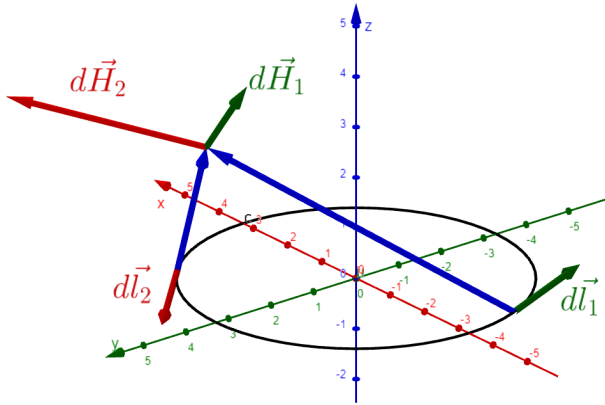


Fig. 3: Campo magnético creado por dos diferenciales de longitud del conductor en un punto cualquiera.

II. INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA. ASPECTOS TEÓRICOS

El principio físico en el que se fundamenta la transferencia inalámbrica de potencia o energía es la inducción electromagnética. La Figura 2 muestra un esquema de un sistema de transferencia inalámbrica de potencia. El transmisor está formado por un generador de tensión variante en el tiempo al que se conecta una bobina que genera un campo magnético variante en el tiempo y proporcional a la corriente que la recorre [2]. La ley de Ampère-Laplace en su forma diferencial relaciona el campo magnético $d\vec{H}$ que genera un diferencial de longitud, $d\vec{l}$, de un conductor por el que circula una corriente eléctrica, I , en un punto cualquiera del espacio definido por el vector posición \vec{r} :

$$d\vec{H} = \frac{I}{4\pi r^3} d\vec{l} \times \vec{r}. \quad (1)$$

En la Figura 3, a modo de ejemplo, se indica el campo generado por dos diferenciales de longitud de una espira circular, con su correspondiente orientación en el espacio.

El receptor dispone de una bobina, que en presencia del campo magnético generado por la bobina del transmisor, según la ley de Faraday [3], induce una fuerza electromotriz directamente proporcional a la variación del flujo magnético que la atraviesa. El coeficiente de inducción, M , del transformador formado por las bobinas del transmisor y receptor vendrá dado por:

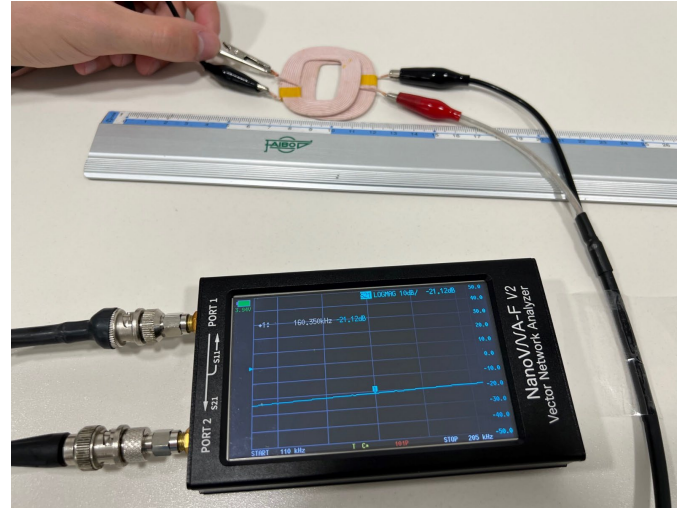


Fig. 4: Vista del sistema de medida: VNA, cables y bobinas utilizadas.

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (2)$$

donde k es el coeficiente de acoplamiento que varía entre 0 (no hay acoplamiento) y 1 (acoplamiento perfecto o máximo acoplamiento), y L_1 y L_2 son las inductancias de las bobinas del transmisor y receptor, respectivamente.

III. SISTEMA DE MEDIDA

El equipo de instrumentación propuesto para caracterizar experimentalmente el acoplamiento magnético es un analizador de redes vectorial (VNA, *Vector Network Analyzer*), el NanoVNA-F V2. Se trata de un VNA de bajo coste, con un rango de frecuencia de 10 kHz a 4.4 GHz y un margen dinámico en la medida del parámetro s_{21} de 70 dB hasta 1.5 GHz y de 60 dB para frecuencias superiores. Para más información relacionada con el equipo puede consultarse [4]. El dispositivo bajo test (DUT, *Device Under Test*) está formado por dos bobinas que se conectarán mediante cables BNC-cocodrilo a los puertos del VNA utilizando transiciones SMA-BNC. La medida del parámetro s_{21} es la relación entre la tensión inducida en bornes de la bobina receptora conectada al puerto 2 del VNA y la tensión aplicada a la bobina transmisora conectada al puerto 1. Antes de realizar la medida del parámetro s_{21} se lleva a cabo una calibración en THRU que tiene en cuenta la respuesta de los cables utilizados para conectar las bobinas al VNA. Las bobinas utilizadas son espiras rectangulares de 9 vueltas, con dimensiones interiores de 2 y 3 cm. En la Figura 4 se muestra el sistema de medida, donde puede verse el detalle de las bobinas utilizadas en el experimento.

IV. EXPERIMENTO Y RESULTADOS

En primer lugar se describe brevemente el estándar Qi desde un punto de vista funcionamiento y margen de frecuencias utilizado, para posteriormente presentar el experimento y las medidas realizadas.

A. Breve descripción del estándar Qi

Este estándar de carga inalámbrica define dos elementos: el módulo transmisor (Tx), que consiste en una base de carga, y un módulo receptor (Rx), que es el dispositivo

de carga. El módulo Tx es el encargado de proporcionar la potencia necesaria para el dispositivo de carga. Ambos módulos disponen de una bobina plana, bobina primaria en el Tx y bobina secundaria en el Rx. Ambas bobinas forman un transformador a través de su acoplamiento magnético. Cuando las bobinas guardan entre sí una separación adecuada, la transferencia de potencia hacia el módulo Rx se realiza con máxima eficiencia. En el estándar Qi la distancia típica de carga, entendida esta como la separación de la bobina Tx y Rx, es de 5 mm, pudiendo llegar a distancias de hasta 4 cm dependiendo del diseño [5]. La transferencia máxima de carga puede ir desde 5 hasta 200 W, y la frecuencia de trabajo está en el rango de 100 a 205 kHz. El estándar permite dos tipos de colocación del módulo Rx: (1) posición guiada, que permite la carga solo en unas pocas posiciones encima de la base de carga, y (2) posición libre, que permite la carga en cualquier posición encima de la base. El estándar define un protocolo de comunicación entre los módulos Tx y Rx, de forma que el dispositivo de carga pueda tomar el control de la transferencia de potencia.

B. Medida del acoplamiento magnético

En nuestro sistema de medida la bobina Tx que simularía la base de carga se conecta al puerto 1 del VNA, y la bobina Rx se conecta al puerto 2 del VNA. El parámetro $s_{21}(f)$ es una medida del acoplamiento entre ambas bobinas y un indicador de la eficiencia de transferencia de potencia. Es importante tener en cuenta que la transferencia de potencia será máxima en condiciones de adaptación en Tx y Rx, lo que implicaría evaluar los parámetros de *scattering* $s_{11}(f)$ y $s_{22}(f)$. Por el tipo de cables que estamos utilizando para conectar las bobinas al VNA no podemos realizar el calibrado apropiado para medir los parámetros de reflexión, al tiempo que el VNA empleado solo permite medir los parámetros $s_{11}(f)$ y $s_{21}(f)$. Sin embargo, el objetivo del experimento es evaluar el efecto de inducción o acoplamiento en función de la distancia de separación de las bobinas, por lo que una representación del parámetro de *scattering* normalizado es suficiente y muestra la diferencia de acoplamiento en términos relativos, pudiendo evaluar la pérdida de eficiencia con respecto a la condición de máximo acoplamiento.

En la Figura 4 se está midiendo el acoplamiento entre bobinas cuando estas están ubicadas sobre un mismo plano, alineadas como se indica y se separan siguiendo su eje menor de simetría, en lo que denominamos separación en horizontal. En la pantalla del VNA se muestra el parámetro $s_{21}(f)$ en el rango de 110 a 205 kHz, observándose un comportamiento prácticamente plano en frecuencia. Es interesante también evaluar el acoplamiento cuando las bobinas parten de la posición de máximo acoplamiento, esto es una justo encima de la otra, y se separan en vertical, siguiendo un eje perpendicular al plano definido por las bobinas y que pasa por el centro geométrico de las mismas, en lo que llamamos separación en vertical. En la Figura 5 se muestra el parámetro $s_{21}(f)$ normalizado en función de la separación de las bobinas, tanto en horizontal como en vertical, a la frecuencia de 160.35 kHz (frecuencia central en la pantalla del VNA). Hasta una separación próxima a los 4 cm, hay una clara diferencia en el nivel de acoplamiento según el tipo de separación considerado. Cuando las bobinas se desplazan en horizontal el acoplamiento es mayor que cuando se desplazan en vertical. Esta

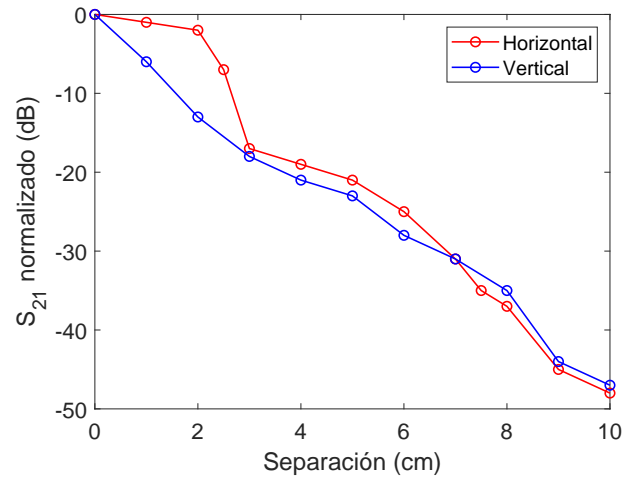


Fig. 5: Inducción sobre la bobina Rx creada por una base de carga comercial a la espera de localizar un dispositivo compatible.

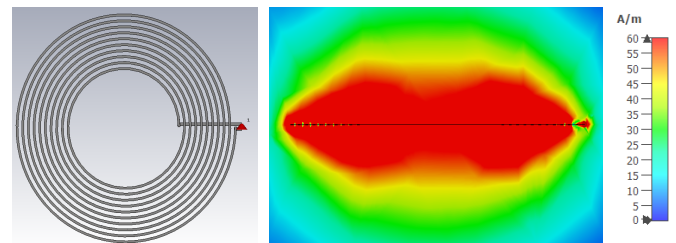


Fig. 6: Campo magnético simulado (derecha) con CST en un plano transversal a una bobina plana circular (izquierda) de radio interior 15 mm, 10 arrollamientos, conductor de 0.6 mm y un gap, o separación entre espiras, de 1 mm.

diferencia se explica porque el flujo magnético que atraviesa la bobina receptora es menor en el desplazamiento vertical por la orientación de las líneas de campo creadas por la bobina Tx. A modo de ejemplo, para la bobina plana circular de la Figura 6 (izquierda), la distribución de campo magnético en un plano transversal a la misma es la representada en la Figura 6 (derecha) [6]. La distribución de campo mostrada ha sido obtenida mediante simulación con CST [7], observándose una distribución prácticamente uniforme en el área definida por la bobina, y que a partir de una determinada separación en vertical, menor al propio radio interior de la bobina, el valor de campo decae rápidamente. Aunque nuestras bobinas no son exactamente circulares, a efectos de entender la distribución del campo magnético que generan en su proximidad son válidos los resultados mostrados para la bobina circular de la Figura 6. De los resultados mostrados en la Figura 5, para una separación de 1 cm, el acoplamiento se reduce un 21 % para un desplazamiento horizontal, y alcanza una reducción próxima al 74 % para un desplazamiento vertical. Cuando la distancia es de 2 cm, el acoplamiento se reduce un 38 % y un 95 % para una separación en horizontal y vertical, respectivamente. A partir de una separación de 4 cm, el acoplamiento se reduce a valores superiores al 98 %, con una tendencia muy similar para ambos desplazamientos. Los resultados ponen de manifiesto que este sistema de carga solo es eficiente para distancias cercanas entre las bobinas, donde la intensidad del campo próximo es mayor.

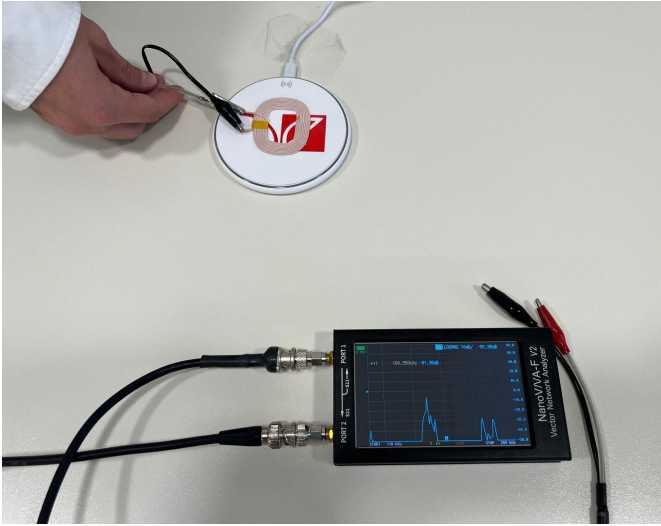


Fig. 7: Inducción sobre la bobina Rx creada por una base de carga comercial a la espera de localizar un dispositivo compatible.



Fig. 8: Inducción sobre la bobina Rx creada por una base de carga comercial durante el proceso de carga.

Los estándares de carga inalámbrica definen un protocolo de comunicación entre la base y el dispositivo a cargar. La base está continuamente transmitiendo información en espera de que se acople un dispositivo de carga. En la pantalla del VNA de la Figura 7 se observa la traza medida cuando el puerto 1 del VNA se deja al aire y la bobina conectada al puerto 2 se ubica sobre una base de carga comercial conectada a la red eléctrica. El valor registrado del parámetro $s_{21}(f)$ muestra actividad en determinadas frecuencias en la que la base de carga está transmitiendo información. Con esta pequeña prueba, podría observarse también que la traza no es estática en el tiempo y que el conjunto de frecuencias utilizadas en la transmisión va cambiando. Este detalle es especialmente interesante para que el alumno entienda que existe un protocolo de comunicación entre la base y el dispositivo de carga.

En la Figura 8 puede verse la traza medida por el VNA

cuando se ubica un teléfono móvil sobre la base de carga y la bobina conectada al puerto 2 está situada entre la base y el dispositivo de carga. En este caso, se produce inducción magnética en todo el margen de frecuencias, el proceso de carga del teléfono móvil ha comenzado. Téngase en cuenta que en los casos mostrados en las Figuras 7 y 8 la lectura del parámetro $s_{21}(f)$ solo es un indicativo de que se está induciendo tensión en la bobina receptora y que esta proviene de la base de carga, ya que el valor medido toma como referencia la potencia transmitida por el VNA a través del puerto 1 y que este está al aire. En esta situación el VNA se está comportando como un analizador de espectros.

V. CONCLUSIONES

En esta comunicación se han presentado unos experimentos o pruebas sencillos que pueden formar parte de una práctica de laboratorio relacionada con el proceso de inducción electromagnética, bien en una asignatura de Física o de Campos Electromagnéticos en una titulación de Grado. Los experimentos pueden llevarse a cabo con equipos de instrumentación sencillos, en nuestro caso se ha realizado con un VNA de bajo coste, que cubre las frecuencias utilizadas por el estándar de carga inalámbrica Qi. Podría haberse utilizado también un osciloscopio, pero la ventaja de usar un analizador de redes reside en que puede observarse el efecto de inducción en un amplio margen de frecuencias, siendo esto especialmente interesante para entender el protocolo de comunicación entre la base y el dispositivo de carga. Aunque se trata de un experimento sencillo, su implementación en prácticas de asignaturas regladas en cursos tempranos permite introducir al alumno en aspectos relacionados con la instrumentación, entendiendo por ejemplo el sentido físico de la magnitud que indican los parámetros de *scattering*, en particular el parámetro s_{21} como una medida de atenuación. Esto último facilita que el alumno entienda mejor, por ejemplo, el concepto de diafonía (*crosstalk*) que se presenta en las transmisiones de cables de pares debido al fenómeno de acoplamiento magnético y que se evalúa a través de los parámetros FEXT (*Far End Crosstalk*) y NEXT (*Near End Crosstalk*), cuyo sentido físico es el de una atenuación similar a la medida aquí presentada a través del parámetro s_{21} . En la sesión del congreso, durante la presentación se expodrán algunos ejemplos más, junto con un vídeo, que por cuestiones de espacio no es posible reproducir aquí.

REFERENCIAS

- [1] Wireless Power Consortium. [Online]. Available: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/>
- [2] P. A. Tipler and G. Mosca, *Física para la Ciencia y la Tecnología*, 6th ed. Barcelona: Reverté, 2010.
- [3] L. Nuño Fernández, J. V. Balbastre Tejedor, L. J. Llácer, and H. E. González, *Electrodinámica para Ingenieros*. Ediciones VJ, 2005.
- [4] Sysjoint. Nanovna-f_v2. Sysjoint. [Online]. Available: https://sysjoint.com/index.php?tpl=product_detail&pid=11&uid=17&id=65&sno=1&list=2&lang=en
- [5] M. El Rayes, G. Nagib, and W. Abdelaal, "A review on wireless power transfer," *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, vol. 40, p. 272, 10 2016.
- [6] M. Ferrando-Bataller and M. Cabedo-Fabrés, "Informe técnico para el instituto aitec sobre radiación de espiras bordadas en telas," Universitat Politècnica de València, Tech. Rep., febrero 2022.
- [7] CST Studio Suite. Dassault Systèmes. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulacion/productos/cst-studio-suite/>