

► Universal magnetic induction charger

CARGADOR UNIVERSAL POR INDUCCIÓN MAGNÉTICA



Por:  Diana Laura Lima Bravo • Eduardo Mosqueda Herrera • Ana Karen Graciano Álvarez
• Ludwika Ugarte Pereyra • Roberto Alcázar Barbosa • Pedro Bañuelos Sánchez • Adriana Palacios Rosas



Lima Bravo, D. L., Mosqueda Herrera, E., Graciano Álvarez, A. K., Ugarte Pereyra, L., Alcázar Barbosa, R., Bañuelos Sánchez, P. y Palacios Rosas, A. (2026). Cargador universal por inducción magnética. *Entorno UDLAP*, 25.

➡ **Recibido:** 9 de septiembre de 2025. ✓ **Aceptado:** 26 de noviembre de 2025.

◆ RESUMEN

El lento crecimiento en la adopción de vehículos eléctricos se puede atribuir a diversos factores; uno de ellos es el limitado acceso a electrolineras, causado en parte por la gran variedad de tipos de conectores. Una alternativa tecnológica que puede aumentar el acceso a estaciones de carga es el sistema de transferencia de energía por inducción electromagnética. Aunque la potencia de esta transferencia es baja en comparación con el sistema por cable, el presente proyecto de investigación busca demostrar la viabilidad de este sistema. Es decir, al estacionar el automóvil eléctrico sobre la plataforma de carga, se establece automáticamente una conexión magnética donde las dos partes del sistema, la emisora y la receptora, transferirán la energía sin perder la eficiencia de la carga y sin que el usuario intervenga ni se exponga. La metodología implica el uso de una bobina fuente en el suelo y una bobina receptora en el automóvil. El estudio experimental explora cómo varía la potencia de transferencia al ajustar las distancias entre ellas. Las mediciones se llevan a cabo en un prototipo con dos bobinas separadas por una distancia d , equipado con una escala de medida en milímetros. Finalmente, se

evalúa el rendimiento de la energía transferida en relación con la distancia entre las bobinas y las distintas alternativas de núcleo magnético.

◆ PALABRAS CLAVE

Carga • Inalámbrica • Inducción magnética
• Potencia • Auto eléctrico

◆ ABSTRACT

The limited increase in electric vehicle adoption can be attributed to several issues, one of them being the limited access to electric charging stations, caused in part by the wide variety of connector types. A technological alternative that may increase access to electric charging stations is the electromagnetic induction energy transfer system. Although the power of this transfer is currently low compared to the wired system, this research project seeks to demonstrate the full feasibility of the magnetic induction charging system for electric vehicles. For example, when parking the electric car on the charging platform, a magnetic connection is automatically established that allows the transfer of energy, thus facilitating charging without user intervention, as this system consists of two parts, the transmitter and the re-

ceiver, which will be responsible for transferring energy without exposing the user to the charge and without losing charging efficiency. The present methodology involves the use of a source coil on the ground and a receiver coil in the car. An experimental study explores how power transfer varies by adjusting the distances between the two coils. The measurements are carried out in a prototype, with two coils separated by a distance d , equipped with a measurement scale in millimeters. Finally, the performance of the transferred energy is evaluated with the distance between the coils and the different magnetic core alternatives.

KEYWORDS

Charging • Wireless • Magnetic induction
• Power • Electric car

INTRODUCCIÓN

El *Informe del medio ambiente* publicado por el Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (2018) estableció que en 2014 uno de los contaminantes más emitidos por fuentes antropogénicas fue el monóxido de carbono (co). Lamentablemente, la situación no ha cambiado. Como se puede comprobar en el Índice de Calidad del Aire de Estados Unidos, plataforma fundada por Rohit Bansal, encargada de monitorear la calidad del aire en tiempo real (AQI, s. f.), en 2023 este gas seguía siendo uno de los mayores contaminantes en el país. La emisión proviene de vehículos de combustión interna, y se genera cuando hay un exceso de combustible en relación con el aire, lo que impide su quema completa. El peligro de su presencia desmedida es su toxicidad, ya que incluso en concentraciones menores a 35 ppm ocasiona enfermedades como hipertensión arterial, arritmias y déficits cognitivos (Canales-Manchuria et al., 2023).

La creciente preocupación por la gran cantidad de partículas contaminantes en el aire ha impulsado acciones internacionales como la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de la ONU, la cual establece diecisiete objetivos en materia económica, social y ambiental. Entre ellos, dos objetivos son fundamentales para abordar esta problemática: el objetivo siete, que busca garantizar el acceso a una energía asequible y no contaminante, y el nueve, que se centra en el desarrollo de infraestructuras sostenibles y de alta calidad (Organización de las Naciones Unidas, 2015). Siguiendo estos objetivos, el presente proyecto de investigación se enfoca en promover la movilidad sostenible mediante el desarrollo de una infraestructura que favorezca el uso eficiente de recursos.

En México, hasta 2022, circulaban aproximadamente 55.1 millones de vehículos (Hidalgo, 2024), mientras que en el estado de Puebla, en 2021, el parque vehicular superó los 1.2 millones de unidades (Zambrano, 2022). De acuerdo con la ONU Habitat (2016), los vehículos particulares son responsables del 18 % de las emisiones de CO_2 del país, y el co es un subproducto de la combustión de gasolina. El hecho de que los motores de combustión interna generen ambos gases subraya la necesidad de promover el uso de vehículos eléctricos.

Es importante mencionar que Puebla ostenta la quinta posición a nivel nacional en la venta de vehículos eléctricos e híbridos, y que su gobierno estatal busca impulsar este mercado a través del *Plan para el despliegue de cargadores de vehículos eléctricos en el estado de Puebla* (Barrera et al., 2022), por lo que es imperativo atender las necesidades de este sector en crecimiento. Hasta junio de 2018 en todo el país había solamente 1,528 estaciones de carga públicas, mientras que, a marzo de 2022, en el estado de Puebla se contaba con tan solo 45

Tabla 1. Prototipos de cargadores inalámbricos para celulares.

Año	País	Modelo/estándar	Funcionamiento	Empresa
1973	Estados Unidos	Sistema de carga inalámbrica	Transferencia de energía electromagnética	Westinghouse
2004	Estados Unidos	Prototipo	Resonancia magnética	Wipower
2008	Estados Unidos	Qi	Inducción electromagnética	Wireless Power Consortium
2012	Estados Unidos	PMA	Resonancia magnética	Power Matters Alliance
2016	Estados Unidos	Air-Fuel	Carga por radiofrecuencia	Air-Fuel Alliance

(Barrera, Mitz, Bates y Hernández, 2022). Este número es desalentador, aunado al hecho de que cada estación ofrece distintos tipos de conectores debido a que los fabricantes diseñan su propio conector, lo que limita el acceso a electrolineras, y disminuye el interés y la movilidad sostenible en la región.

Para abordar esta problemática se han desarrollado diversas tecnologías, como los cargadores inalámbricos y de carga ultrarrápida. Ejemplos de estos incluyen el sistema Primove e-bus y el sistema OLEV de KAIST. Estas innovaciones buscan mejorar la eficiencia y la comodidad de la carga de vehículos eléctricos (Bingke, 2023). Por ejemplo, Primove e-bus ya ha manufacturado un sistema de carga inalámbrica aplicado a las paradas de autobuses, reportando una eficiencia de transmisión mayor del 90 %. Por otro lado, KAIST implementó OLEV, un sistema de transporte con cargadores inalámbricos dinámicos, el cual se usó para tranvías y se planea expandir con autobuses. El sistema de KAIST consiste en bobinas instaladas debajo del circuito y bobinas secundarias en el vehículo, con esto se crea una resonancia magnética y, mientras se transporta, simultáneamente el vehículo se carga. Otra idea que se obtuvo es que la bobina primaria esté en un autobús (i. e., el distribuidor de energía magnética) y la

secundaria en un coche eléctrico, lo que también se clasificaría como cargador inalámbrico dinámico (Bingke, 2023).

Por otro lado, la carga ultrarrápida es también una opción atractiva. En la revisión realizada en este estudio, se encontró que puede recargar en un lapso de diez a quince minutos, alcanzando una potencia de 350 kW, perteneciente al cargador ABB Terra HP. Actualmente se usa la configuración de *dual active bridge* por su diseño compacto y su aislamiento galvánico para un puerto sencillo. Para cargadores múltiples, la tecnología de convertidor multinivel modular es prometedora por su flexibilidad, eficiencia alta, calidad de potencia y modularidad (Rodríguez, 2022).

Es así que en este proyecto se planteó la necesidad de crear un sistema de carga universal mediante inducción magnética, capaz de proporcionar una carga semirrápida y compatible con la mayoría de los vehículos eléctricos. La implementación de este cargador universal por inducción magnética en cada electrolinera busca incrementar la disponibilidad de estaciones de carga para todos los modelos de vehículos eléctricos, fomentar el interés en la electromovilidad y contribuir a la reducción de la contaminación ambiental de nuestro país.

NIKOLA TESLA IMAGINÓ UN MUNDO DONDE LA ENERGÍA PUDIERA SER TRANSMITIDA DE FORMA INALÁMBRICA A TRAVÉS DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS.

ANTECEDENTES

La historia de los cargadores inalámbricos se remonta al siglo XIX. A través de experimentos, Michael Faraday descubrió los principios de la inducción electromagnética en la década de 1830, lo que sentó las bases para la tecnología que hoy conocemos como carga inalámbrica (Ross, 2022).

Por su parte, Nikola Tesla, a finales del siglo XIX y principios del XX, contribuyó al desarrollo de la transmisión de energía sin cables (BBC, 2019). Tesla imaginó un mundo donde la energía pudiera ser transmitida de forma inalámbrica a través de campos electromagnéticos. Sus experimentos, como la bobina de Tesla, sentaron las bases teóricas para la transmisión inalámbrica de energía.

En 1973, la empresa Westinghouse, de origen estadounidense, creó uno de los primeros sistemas de carga inalámbrica para celulares; este utilizaba un campo magnético para pasar la energía a la batería del teléfono móvil (Trejo, 2023). Sin embargo, el sistema era lento y contaba con un alcance muy limitado.

Por otro lado, en términos de implementación práctica de cargadores inalámbricos para automóviles, el desarrollo más temprano y significativo ocurrió en la última década con Qualcomm Halo, una división de Qualcomm Incorporated, una de las primeras empresas en presentar un sistema de carga inalámbrica para vehículos eléctricos. Su tecnología se dio a conocer alrededor de 2009 y fue uno de los primeros intentos comerciales de llevar la carga inalámbrica a la realidad para la movilidad eléctrica (Tobón-Ramírez y Restrepo-Laverde, 2018).

Figura 1. Cargador inalámbrico Qi (Rodríguez, 2022).



En la tabla 1 se muestran algunos de los prototipos de cargadores inalámbricos desarrollados en Estados Unidos a lo largo de los años; el primero es de 1973 con un funcionamiento de transferencia de energía electromagnética; unos años más tarde, la empresa Wipower crea el primer prototipo que funciona por medio de resonancia magnética. El Consorcio de Energía Inalámbrica estableció una carga inalámbrica estandarizada llamada Qi (Trejo, 2023).

El estándar Qi de carga inalámbrica es una forma conveniente y eficiente de recargar la batería de un teléfono inteligente sin necesidad de enchufar cables (figura 1). Este sistema se basa en un estándar desarrollado por el Consorcio de Energía Inalámbrica (Wireless Power Consortium, WPC), una organización que se encarga de promover tecnologías de carga inalámbrica. El proceso detrás de la carga inalámbrica

CUANDO EL VEHÍCULO SE UBICA SOBRE LA ESTACIÓN BASE, LA BOBINA RECEPTORA DETECTA EL CAMPO MAGNÉTICO Y CONVIERTE LA ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA EN ELECTRICIDAD.

Tabla 2. Prototipos de cargadores inalámbricos para automóviles.

Año	País	Modelo/estándar	Funcionamiento	Empresa
2013	Estados Unidos	Qualcomm Halo Wireless EV Charger	Inducción electromagnética	Qualcomm
2015	Alemania	Audi Wireless Charging	Inducción electromagnética	Audi
2017	Alemania	Mercedes-Benz EQ Power	Inducción electromagnética	Mercedes-Benz
2018	Alemania	BMW Wireless Charging	Inducción electromagnética	BMW

Figura 2. Volvo de carga inalámbrica. Tomado de González (2022).



Qi se llama inducción electromagnética (Trejo, 2023). Ejemplifiquemos con la carga de un teléfono inteligente: un cargador inalámbrico tiene una bobina de alambre enrollada en su interior que envía corriente eléctrica y crea un campo magnético a su alrededor; el teléfono tiene una bobina similar, cuando se coloca el teléfono sobre el cargador, la bobina en el teléfono detecta el campo magnético y empieza a convertirlo de nuevo en electricidad. Esta electricidad carga la batería.

Los cargadores inalámbricos para coches funcionan de forma similar a los tradicionales, pero están diseñados específicamente para vehículos. Estos cargadores utilizan la misma tecnología de inducción electromagnética para transferir energía eléctrica de una fuente a un dispositivo; en este caso, la batería de un automóvil eléctrico o híbrido enchufable. El sistema de carga inalámbrica para coches suele constar de dos partes principales: una estación base y una bobina receptora instalada en la parte inferior del vehículo. La estación base, que se

monta en el suelo o en una pared, contiene una bobina de alambre que genera un campo magnético cuando se conecta a una fuente de alimentación. El campo magnético actúa como la fuente de energía que interactúa con la bobina del automóvil. Cuando el vehículo se estaciona sobre la estación base, la bobina receptora detecta el campo magnético y convierte la energía electromagnética en electricidad. Esta electricidad carga la batería del vehículo (Yáñez, 2019).

En la tabla 2 se muestran los prototipos de cargadores inalámbricos de autos por inducción electromagnética a través de los años. La empresa Qualcomm comenzó a trabajar en 2011 para sacar al mercado su cargador inalámbrico para coche eléctrico. Después, las grandes empresas europeas, como Mercedes-Benz, BMW y Audi, presentaron este tipo de cargadores (Motorpasión, 2011).

Posteriormente, otras compañías como Volvo se sumaron a la innovación en carga por inducción, colaborando con la empresa belga

COMPAÑÍAS COMO VOLVO SE SUMARON A LA INNOVACIÓN EN CARGA POR INDUCCIÓN, COLABORANDO CON LA EMPRESA BELGA FLANDERS DRIVE PARA DESARROLLAR SISTEMAS COMPATIBLES CON SUS MODELOS ELÉCTRICOS, ENTRE ELLOS EL C30.

METODOLOGÍA

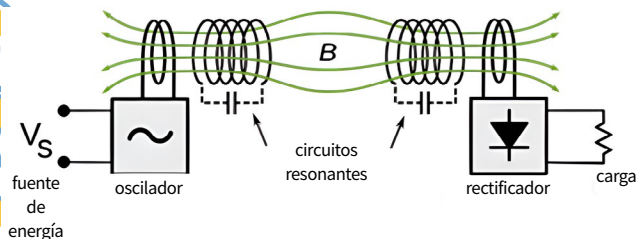


Figura 3. Funcionamiento de la carga inalámbrica (Sauras, 2022).

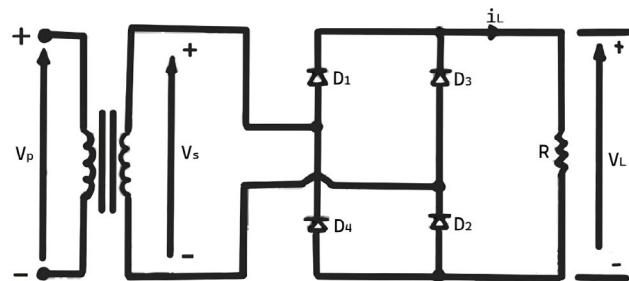


Figura 4. Rectificador puente de onda completa con transformador (Rashid, 1996).

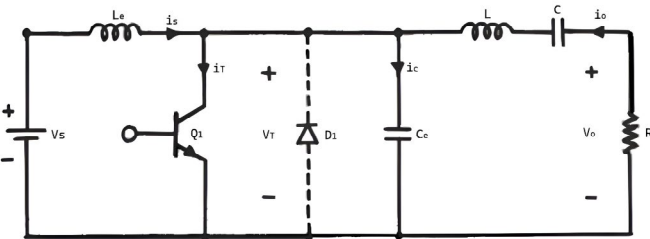
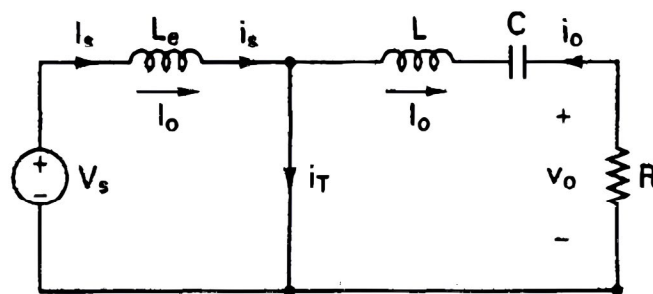
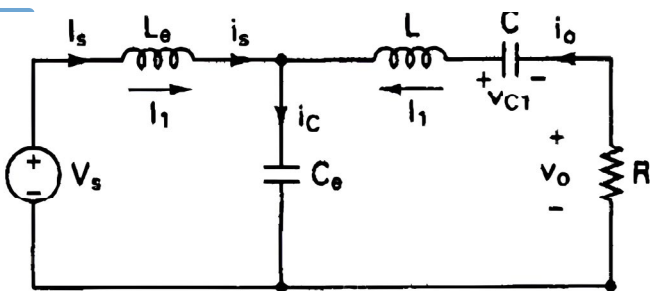


Figura 5. Inversor resonante clase E (Rashid, 1996).



Modo 1

Figura 6. Modo 1, inversor clase E.



Modo 2

Figura 7. Modo 2, inversor clase E.

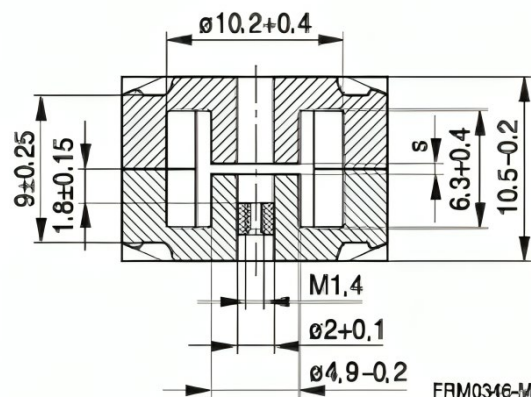
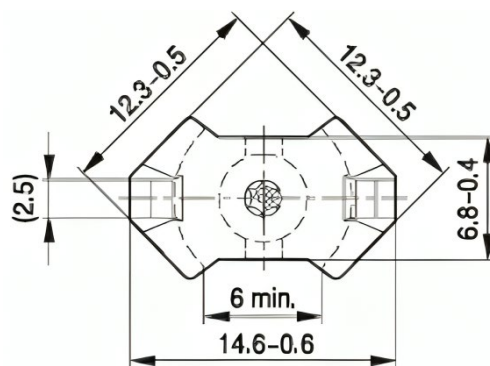


Figura 8. Proyección isométrica del entrehierro.

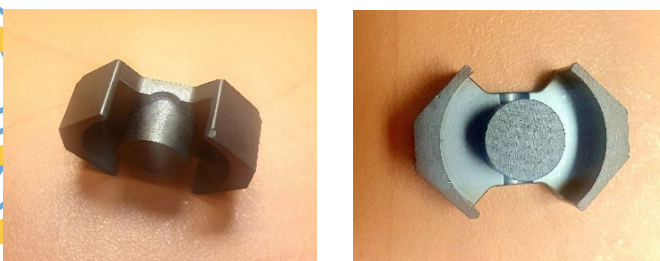


Figura 9. Núcleo RM10.

Tabla 3. Valores de los componentes eléctricos del circuito clase E.

	Freq (Hz)	Q	C	Ce	R (Ohms)	L	Le
Teóricas	2.5k	15	434.651pF	10nF	100	954.93uH	2.5uH

Flanders Drive para desarrollar sistemas compatibles con sus modelos eléctricos, entre ellos el C30 (figura 2). Este avance refleja la expansión progresiva de la tecnología, inicialmente impulsada por Qualcomm y las firmas europeas mencionadas, que consolidó un mercado competitivo orientado a la movilidad sostenible (Motorpasión, 2011).

A pesar de estos avances iniciales, la tecnología de carga inalámbrica para vehículos eléctricos por inducción magnética apenas comenzó a ganar impulso en la última década. Con el aumento de la conciencia ambiental y la transición hacia la movilidad eléctrica, los fabricantes de automóviles y las empresas de tecnología han centrado sus esfuerzos en encontrar soluciones más convenientes y eficientes para cargar vehículos eléctricos. El avance más significativo en la carga inalámbrica para automóviles se dio con la introducción de la resonancia magnética. Esta tecnología permite la transmisión eficiente de energía a través de campos magnéticos resonantes entre la estación de carga y el receptor en el vehículo. La resonancia magnética ha abordado algunos de los desafíos asociados con la carga inalámbrica, como la alineación precisa del vehículo con la estación de carga (Yáñez, 2019).

METODOLOGÍA

Con base en el principio de la inducción magnética, en el presente proyecto de investigación se diseñó un sistema universal de carga para casi todos los vehículos eléctricos, sin necesidad de usar un puerto físico. Este cargador se divide en dos circuitos:

- **Circuito transmisor.** Se conecta directamente a la fuente de energía, y pasa por distintos circuitos eléctricos que sirven para que en su potencia de salida se obtengan los parámetros necesarios para la recepción de energía por medio de inducción magnética. El transmisor finaliza con una bobina que, al inducir una corriente de energía, genera un campo magnético, el cual transmite la energía a otra bobina receptora.
- **Circuito receptor.** Va conectado a la batería del vehículo eléctrico. Este circuito recibe la energía que emite el transmisor mediante

ECUACIÓN
[1]

$$L_e = \frac{0.04001(R)}{W_s}$$

ECUACIÓN
[2]

$$C_e = \frac{2.165}{W_s R}$$

ECUACIÓN
[3]

$$L = \frac{Q * R}{W_s}$$

ECUACIÓN
[4]

$$C = \frac{1}{W_s(W_s(L) - 0.3533R)}$$

ECUACIÓN
[5]

$$N = \sqrt{\frac{L * e}{\mu_o 2S}}$$

ECUACIÓN
[6]

$$e = \frac{\mu_o L (i_{pk})^2}{2S * B^2}$$

EL AVANCE MÁS SIGNIFICATIVO EN LA CARGA INALÁMBRICA PARA AUTOMÓVILES SE DIO CON LA INTRODUCCIÓN DE LA RESONANCIA MAGNÉTICA.

inducción magnética. La bobina del circuito transmisor y la bobina en el circuito receptor se acercan a una distancia considerable para que la corriente inducida del transmisor llegue al receptor, y esa energía pase a la batería del vehículo eléctrico. La energía que se obtenga en el transmisor puede ser menor a la que salga del receptor, ya que este parámetro depende de la distancia entre ambos. Para que el cargador funcione de manera óptima, los circuitos deben cumplir ciertos requisitos. El circuito transmisor debe conectar-

EXPERIMENTACIÓN

11

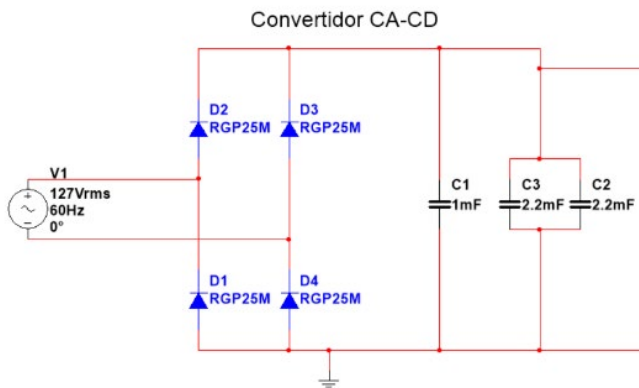


Figura 10. Simulación en Multisim del convertidor AC-DC.

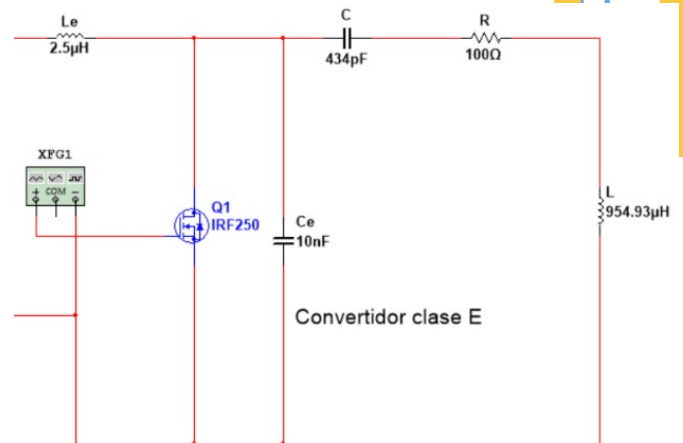


Figura 11. Simulación en Multisim del inversor resonante clase E.

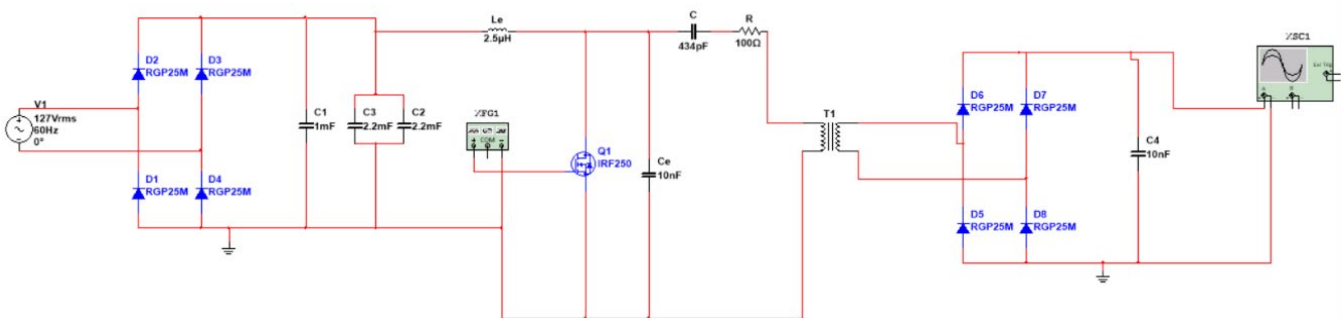


Figura 12. Circuito simulado en Multisim del cargador universal (transmisor y receptor).

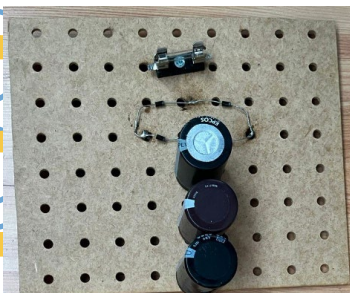


Figura 13. Circuito físico del rectificador puente de onda completa.
Figura 14. Transformador construido en físico.

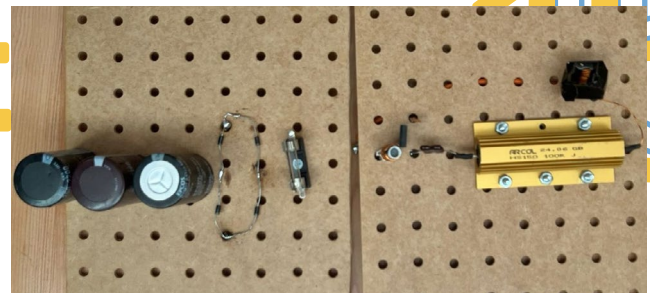
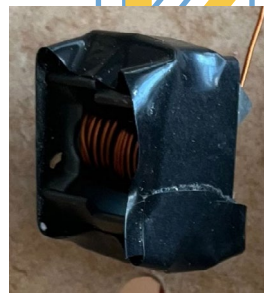


Figura 15. Circuito físico del rectificador e inversor clase E.

se a un voltaje alterno, debido a que, según la ley de Faraday (figura 3), la magnitud de la fuerza electromotriz inducida en un circuito es proporcional a la rapidez con la que cambia el flujo magnético a través del circuito (Sauras, 2022). Por ende, los campos magnéticos estáticos (voltaje directo) no presentan cambios, y con eso, no se induce corriente eléctrica. Otro factor para considerar es su eficiencia, proporcional a su frecuencia. Una mayor corriente inducida en el circuito incrementa la eficiencia del sistema, ya que reduce las pérdidas de energía durante la transferencia de potencia. Para el receptor es necesario formar un circuito que cambie la corriente alterna a corriente directa, ya que las baterías de los vehículos eléctricos trabajan con corriente directa y, como se mencionó, el transmisor debe conectarse hacia un voltaje alterno. Para el transmisor se trabajó con dos tipos de circuitos. El primero fue un rectificador puente de onda completa (figura 4). Este circuito sirvió para pasar la corriente alterna de la fuente de energía a corriente directa; comúnmente constaba de cuatro diodos, un capacitor y una resistencia, sin embargo, por los parámetros que se manejaron en la investigación, se reemplazó la resistencia por otro capacitor para cumplir con los requisitos necesarios del circuito.

Después, se conectó un inversor resonante clase E (figura 5). Su función fue convertir la corriente directa del circuito en corriente alterna, ya que la corriente directa no genera campos electromagnéticos. Se escogió esta configuración debido a que el circuito clase E tenía bajas pérdidas de conmutación y una alta eficiencia.

La operación del circuito para generar una corriente alterna se divide en dos modos, sin embargo, si se cumple cierta condición, puede existir un tercer modo:

- **Modo 1.** En el modo 1 (figura 6), el transistor se activa, por ende, permite el flujo de corriente sobre sí mismo. La corriente de conmutación se compone de la corriente de alimentación y la corriente de carga. Para lograr una corriente de salida casi senoidal, se seleccionan valores óptimos para el inductor (L) y el capacitor (C), asegurando un alto factor de calidad y una baja relación de amortiguación. Cuando el conmutador se desactiva en el voltaje cero, la corriente se desvía instantáneamente a través del capacitor «Ce».
- **Modo 2.** Al contrario del modo 1, aquí el transistor está desactivado. El voltaje de conmutación se eleva desde cero hasta su

valor máximo y de nuevo vuelve a cero (figura 7).

- **Modo 3.** Este modo solo ocurre cuando el voltaje de conmutación cae hasta cero con una pendiente negativa. El circuito equivalente es similar al modo 1, sin embargo, no cuenta con sus condiciones iniciales (Rashid, 1996). Para obtener los parámetros óptimos para el circuito se presentan las ecuaciones de la 1 a la 4 (Rashid, 1996).

Como se muestra en la figura 5, existe un inductor L , el cual fue sustituido por un transformador. Este transformador funcionó como la salida del circuito transmisor y, a su vez, transmitió la corriente hacia el receptor. El receptor también estuvo conectado a otro transformador para que, a causa de los campos electromagnéticos generados, se pudiera traspasar la corriente por medio de inducción magnética de un transformador a otro. Para que el transmisor y el receptor tuvieran una mayor eficiencia, se consideró como experimentación teórica el que ambos transformadores estuvieran pegados uno a otro; sin embargo, era importante saber que a mayor distancia había más pérdida de energía y potencia. El transformador que se usó fue el RM10.

En la figura 8 observamos las medidas correspondientes del entrehierro para obtener un análisis en el cálculo de la inductancia, y en la figura 9 se muestra el núcleo, al que se le hizo un devanado con cable de cobre. Esto se debió a que, para el cambio de inductor a transformador, este último debía tener un valor específico de inductancia para no afectar el resultado proporcionado por el circuito transmisor. Para determinar el número de vueltas requeridas en el núcleo, se utilizaron las ecuaciones 5 y 6.

Los resultados de los cálculos que se realizaron con base en las fórmulas 1 a 6 se presentan en el apartado de «Nomenclatura».

EXPERIMENTACIÓN

Experimentación teórica

Para comenzar con las pruebas de la investigación, primero se formularon los datos teóricos necesarios para simularlos y revisar su comportamiento. En la tabla 3 se presentan las medidas obtenidas a través de los cálculos de las ecuaciones para el circuito clase E, para determinar los materiales que se requieren en la elaboración del prototipo.

Para comenzar las pruebas, se diseñó el circuito con sus respectivos componentes en simulación por medio del *software* de Multisim.

TRANSITAR HACIA LA ELECTROMOVILIDAD ES FUNDAMENTAL PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES COMO EL MONÓXIDO DE CARBONO (CO) Y EL DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂), QUE SON RESPONSABLES DE PROBLEMAS DE SALUD PÚBLICA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

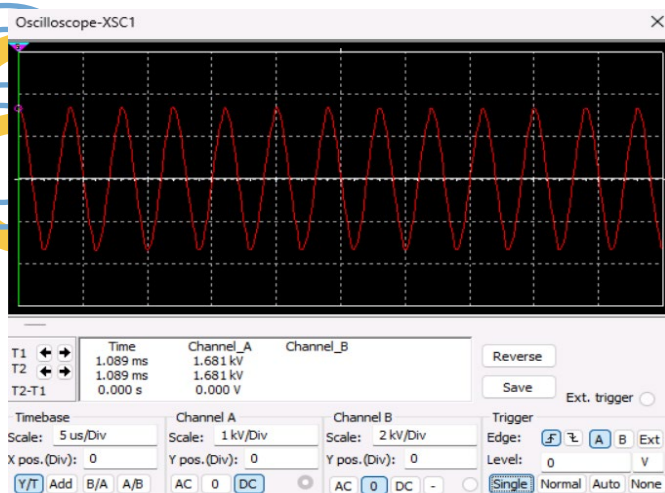


Figura 16. Simulación en Multisim del circuito transmisor.

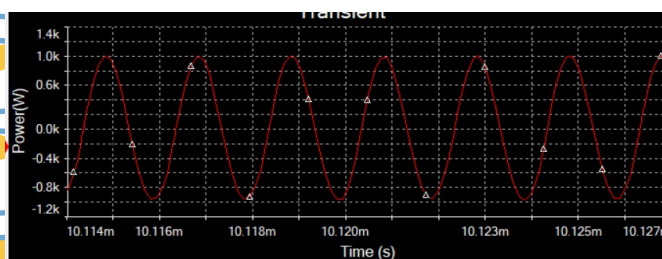


Figura 18. Simulación de potencia del circuito transmisor (vista ampliada).

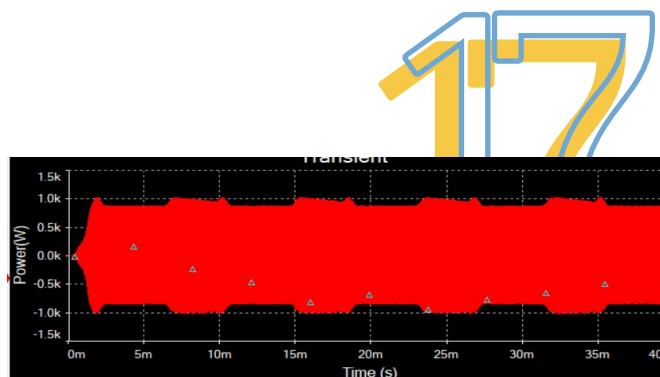


Figura 17. Simulación en Multisim de la potencia del circuito transmisor.

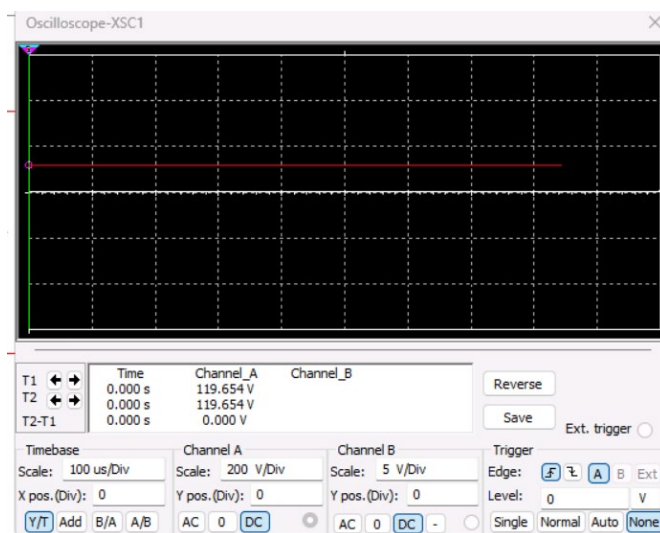


Figura 19. Simulación de salida de voltaje del cargador.

Primero se construyó el transmisor, para el que se usaron dos tipos de circuitos: el rectificador puente de onda completa y el inversor resonante clase E. A continuación, se describen:

1. Rectificador de onda completa. La figura 10 presenta el rectificador de onda completa, también conocido como convertidor de corriente alterna a corriente directa (AC-DC). La simulación mostrada ya cuenta con los valores teóricos necesarios para el buen funcionamiento del circuito. El circuito comienza conectado a una fuente de voltaje alterno, la cual sería una conexión como la de los hogares. En caso de querer conectarlo a una fuente trifásica, como la que se usa en ciertas

industrias, se deben cambiar los componentes para soportar dicho voltaje.

2. Inversor resonante clase E. Posterior al rectificador, se conectó el inversor clase E (figura 11). Los valores de sus componentes se calcularon usando las ecuaciones 1, 2, 3 y 4 respectivas al circuito clase E. Este circuito está compuesto por un inductor L , un transistor, dos capacitores y una resistencia. El inductor L fue sustituido por un transformador.

Ya terminado el circuito transmisor, se construyó en simulación el circuito receptor, usando el rectificador puente de onda completa y solamente una resistencia. Como el circuito receptor por sí solo no puede mostrar resultados,

NOMENCLATURA

A CORRIENTE	Lm INDUCTOR PRINCIPAL	ω_0 FRECUENCIA ANGULAR NATURAL DEL CIRCUITO	m METROS
C CAPACITOR	R RESISTENCIA		H_{rtz} RESISTENCIA
d DISTANCIA	V_m VOLTAJE MÁXIMO O VOLTAJE PICO	$ Z $ MAGNITUD DE LA IMPEDANCIA TOTAL	H HENRIOS
f FRECUENCIA	V_o VOLTAJE DE SALIDA	A AMPERIOS	Ω OHMS
L INDUCTOR	ω FRECUENCIA ANGULAR	f FARADIOS	V VOLTS
			RPS RADIANES POR SEGUNDO

ya que no está conectado a ninguna fuente, se usaron ambos circuitos en la simulación conectados uno con otro, lo que resultó en el cargador universal completo. Esto se puede observar en la figura 12.

Experimentación práctica

Al finalizar las pruebas teóricas, y después de comprobar que el circuito funcionó correctamente, se comenzó con la experimentación práctica. Para ello, al igual que en la experimentación teórica, se construyó el circuito ensamblándolo por partes y probando sección por sección. Se comenzó con el circuito rectificador de onda completa para el transmisor, el cual se muestra en la figura 13.

Para protegerlo, se conectó un fusible en la entrada del circuito que consta de un filamento, el cual, en caso de un corto circuito o que el circuito sobrepase la corriente máxima del filamento, se quemará y no afectará ningún componente dentro del circuito.

Además, se comenzó la construcción del transformador y se protegió el alambrado con una cinta aislante que evitó un posible corto circuito (figura 14).

Posteriormente, se construyó el circuito resonante clase E, basándose en el circuito simulado en la figura 11. Se conectaron ambos circuitos para hacer las pruebas (figura 15). Como se mencionó, el circuito re-

RESULTADOS DE ECUACIONES

$$\begin{aligned}
 &= 0.5T \text{ para el material tipo 98} \\
 S &= 89.8mm^2 \text{ para el núcleo tipo RM10} \\
 L &= 954.93\mu F \\
 i &= 1.15A \\
 \mu_0 &= 4\pi * 10^{-7} H/m \\
 e &= 3.5345 * 10^{-5} m^{-1} \\
 N &= 12.229 = 13 \text{ vueltas}
 \end{aligned}$$

ceptor es similar en la parte inicial al circuito transmisor.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para los resultados de cada parte, primero se analizó el circuito rectificador de onda completa, el cual debía tener una onda senoidal en la señal de entrada, y en la de salida, una gráfica lineal que fuera lo más similar a una línea horizontal y constante. Posteriormente, se conectó el circuito resonante clase E que produjo una señal senoidal a alta potencia en la señal de salida (figura 16), lo cual confirmó que el circuito transmisor estaba funcionando de manera correcta en la simulación, similar a la gráfica de un voltaje con corriente alterna, el cual era necesario para generar la inducción electromagnética.



LA IMPLEMENTACIÓN EXITOSA DE UN CARGADOR UNIVERSAL POR INDUCCIÓN MAGNÉTICA PODRÍA CONVERTIRSE EN UN ESTÁNDAR EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ, Y PROMOVER LA INTEROPERABILIDAD ENTRE DIFERENTES MARCAS Y MODELOS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.

15

Para analizar mejor los resultados, se presentan en las figuras 17 y 18 las gráficas de la potencia instantánea del circuito transmisor. El propósito es determinar si la potencia de salida alcanza los niveles necesarios para inducir una corriente de carga adecuada en la batería del vehículo eléctrico. Las simulaciones revelan que la señal de potencia exhibe un incremento inicial seguido de oscilaciones periódicas, comportamiento característico de sistemas de transferencia de energía por inducción electromagnética. Este fenómeno se observa con mayor detalle en la figura 17, donde se aprecia la dinámica transitoria y el estado estacionario de la señal.

Anteriormente, se reportaron los valores pico a pico máximos y mínimos. Para la potencia instantánea, el error fue de aproximadamente 17 %. Se observó que, al cambiar los valores de capacitancia en el transmisor, este error se redujo conforme se incrementó el valor. Posterior al circuito clase E, se usó una bobina que funcionó como el transmisor de energía. Por otro lado, en la bobina del receptor se conectó otro circuito rectificador de onda completa para cambiar la señal de corriente alterna a corriente directa. En la salida del cargador, se obtuvo una señal en DC que debería ir conectada a la batería del vehículo eléctrico. El valor experimental pudo cambiar considerablemente, ya que la distancia entre transmisor y receptor no se tomó en cuenta.

Usando las gráficas que se presentan en las figuras 17 y 18, se obtuvieron los siguientes da-

tos: la frecuencia es de aproximadamente 250 kHz. Para los valores pico a pico, se tomaron dos puntos, uno cuando el valor es el máximo y otro cuando el valor es el mínimo. Para la potencia, $W_{ppmax} = 2\text{KW}$ y $W_{ppmin} = 1.7\text{KW}$. Para la corriente, $I_{ppmax} = 2.3\text{A}$ y $I_{ppmin} = 2.1\text{A}$. Para el voltaje, $V_{ppmax} = 3.6\text{kV}$ y $V_{ppmin} = 3.3\text{kV}$.

Posteriormente, se revisó con el osciloscopio digital la señal de salida del circuito receptor para revisar la potencia con la que finalizaba el circuito (figura 19). La señal de salida terminó siendo una corriente directa, conectada a la batería del vehículo. Se debe entender que los resultados teóricos no son iguales a los resultados prácticos, ya que en físico hay muchos factores que no se toman en cuenta durante la simulación, tales como la temperatura del ambiente, la condición de los componentes y su margen de error, entre otros.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este proyecto plantea una alternativa viable y eficiente frente a los sistemas de carga por cable, cuyo principal problema radica en la incompatibilidad de conectores y la falta de estandarización a nivel global. Este análisis teórico y experimental ha demostrado la factibilidad del sistema desde una perspectiva conceptual. Las simulaciones realizadas en Multisim confirmaron que el diseño del circuito propuesto puede cumplir con los requisitos básicos de conversión de corriente alterna (AC) a corriente directa (DC) y viceversa. El circuito rectificador de onda completa mostró un comportamien-

to adecuado en simulación y logró transformar una señal senoidal en una señal casi lineal, lo que constituye un paso esencial para alimentar las baterías de vehículos eléctricos. Además, el inversor resonante clase E logró generar señales senoidales de alta potencia, aunque con fluctuaciones que podrían ser mejoradas ajustando los parámetros de capacitancia y resistencia.

El desarrollo de este sistema también contribuye a mitigar los problemas ambientales causados por los vehículos de combustión interna. La transición hacia la electromovilidad es fundamental para reducir las emisiones de gases contaminantes como el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂), que son responsables de problemas de salud pública y el cambio climático. En regiones como Puebla, donde el número de vehículos eléctricos está en aumento, la implementación de este tipo de tecnologías podría generar un impacto ambiental y social positivo a gran escala.

Si bien los resultados teóricos fueron alentadores, las pruebas prácticas evidenciaron varias limitaciones que deben ser abordadas en futuras investigaciones. Entre los principales desafíos se encuentra la necesidad de mejorar la selección y diseño de componentes eléctricos, especialmente diodos y transistores, para garantizar la robustez y efectividad del sistema. Asimismo, la distancia entre el transmisor y el receptor sigue siendo un factor crítico que afecta la eficiencia de la transferencia de energía. Este aspecto debe ser optimizado mediante el uso de materiales y configuraciones de bobinas más avanzadas.

Adicionalmente, el error del 17 % en la potencia teórica y experimental registrado en las simulaciones indica que se requiere un ajuste más preciso de los parámetros del circuito. Las fluctuaciones observadas en la señal de salida sugieren la necesidad de un análisis más detallado de los fenómenos de resonancia magnética y de las interacciones entre los componentes del sistema.

Este proyecto sienta las bases para futuros desarrollos en la carga inalámbrica de vehículos eléctricos, y abre la puerta a innovaciones que podrían mejorar tanto la eficiencia como la

escalabilidad de la tecnología. La implementación exitosa de un cargador universal por inducción magnética podría convertirse en un estándar en la industria automotriz, y promover la interoperabilidad entre diferentes marcas y modelos de vehículos eléctricos.

Además, el conocimiento adquirido durante este estudio puede ser aplicado en otros campos, como la carga inalámbrica para dispositivos electrónicos o el desarrollo de sistemas de carga dinámica para vehículos en movimiento. Estas aplicaciones podrían expandir aún más las posibilidades de la tecnología de inducción magnética, y contribuir a la construcción de un futuro más sostenible y conectado.

Para mejorar el rendimiento del sistema de carga, es fundamental seleccionar componentes de alta calidad. Esto incluye utilizar diodos y transistores de mayor capacidad para soportar el rango de voltajes y corrientes del circuito, así como investigar y emplear materiales de alta capacidad para bobinas y núcleos magnéticos.

La optimización del diseño es también crucial. Se recomienda refinar los parámetros de capacitancia y resistencia para reducir las fluctuaciones en las señales de salida, y desarrollar configuraciones de bobinas que maximicen la eficiencia a distintas distancias y mejoren la estabilidad del sistema. Finalmente, para validar la funcionalidad del sistema en entornos prácticos, se sugiere realizar experimentos con prototipos a escala real y usar sistemas de monitoreo para evaluar el impacto de la distancia y la orientación del transmisor y receptor en la eficiencia de la carga. Esto permitirá identificar y solucionar cualquier problema que pueda surgir en la implementación del sistema.

Agradecimientos

Este artículo es resultado del trabajo de investigación realizado por Ugarte-Pereyra, L. como miembro activo del Programa de Honores UDLAP, Graciano-Álvarez, Á. K., Lima-Bravo, D. L., Mosqueda-Herrera, E. y Alcázar-Barbosa, R., exalumnos de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP).



Adriana Palacios Rosas

Profesora de tiempo completo de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP). Doctora en Ingeniería de Procesos Químicos por la Universidad Politécnica de Cataluña. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI), nivel 2. Áreas de investigación:

combustión, análisis de riesgos industriales, uso de hidrógeno con energías renovables, incendios y explosiones.

adriana.palacios@udlap.mx



Pedro Bañuelos Sánchez

Profesor de tiempo completo de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP). Doctor en Ingeniería Eléctrica por Supelec, Francia. Miembro del Sistema

Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI), nivel 1. Áreas de investigación: electrónica de potencia, calidad de la energía eléctrica, convertidores de potencia y energías renovables.

pedro.banuelos@udlap.mx



Diana Laura Lima Bravo

Technology project manager. Ingeniera mecatrónica con Maestría en Administración Energética y

Especialidad en Energías Renovables (UDLAP). Integra tecnología y gestión para desarrollar soluciones sustentables de eficiencia energética con impacto socioeconómico.

diana.limabo@udlap.mx



Eduardo Mosqueda Herrera

Egresado de la Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica (UDLAP), con experiencia en mantenimiento

electromecánico. Su enfoque profesional se centra en la innovación tecnológica y la optimización de procesos, con especial interés en la integración de energías renovables en la industria.

eduardo.mosquedaha@udlap.mx

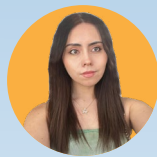


Roberto Alcázar Barbosa

Egresado de la Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica (UDLAP), con experiencia en diseño electrónico y

mecánico. Destaca por su interés en automatización, programación y desarrollo de soluciones orientadas a mejorar la eficiencia y el desempeño en entornos industriales y tecnológicos.

roberto.alcazarba@udlap.mx

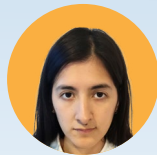


Ludwika Ugarte Pereyra

Ingeniera mecatrónica (UDLAP) con experiencia en automatización de procesos intralogísticos y desarrollo

de soluciones tecnológicas sostenibles. Sus intereses profesionales se enfocan en la ingeniería sostenible y la innovación con impacto social.

ludwika.ugartepa@udlap.mx



Ana Karen Graciano Álvarez

Egresada de Ingeniería Mecatrónica (UDLAP). Desarrolló su tesis en el diseño de un convertidor eléctrico

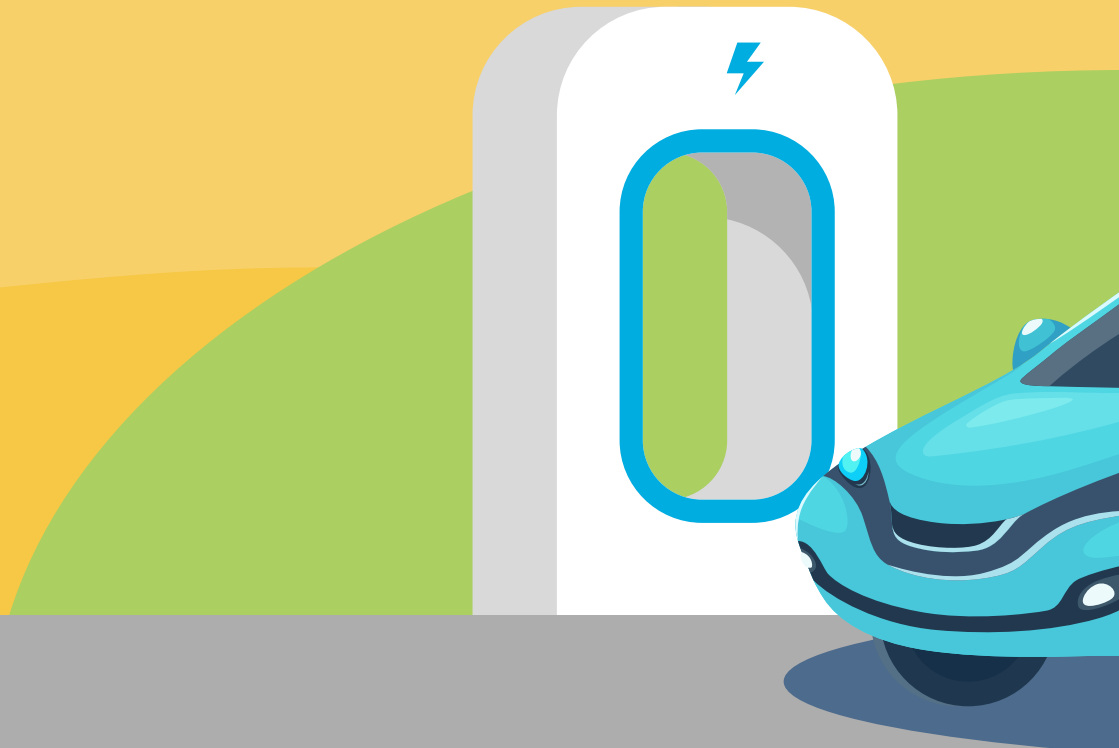
para paneles solares con aplicación en vehículos eléctricos. Interesada en energías renovables y desarrollo tecnológico.

ana.gracianoaz@udlap.mx



REFERENCIAS

- Alegría, A. (2023, 21 de agosto). En México, el uso de energía fósil seguirá hasta 2060. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/noticia/2023/08/21/economia/en-mexico-el-uso-de-energia-fosil-seguira-hasta-2060-8294>
- Álvarez, S. (2022, 3 de marzo). Volvo prueba la tecnología de carga inalámbrica en la XC40 Recharge. <https://autosdeprimera.com/volvo-tecnologia-carga-inalambrica-xc40-recharge-pruebas-suecia/>
- AQI. (s. f.). *Índice de calidad del aire (AQI) de México: nivel de contaminación del aire en tiempo real*. <https://www.aqi.in/es/dashboard/mexico>
- AQI. (s. f.). *¿Quiénes somos?* <https://www.aqi.in/es/about-us>
- Barrera, J., Mitz, E., Bates, A. y Hernández, Z. (2022, junio). *Plan para el despliegue de cargadores de vehículos eléctricos en el estado de Puebla*. Agencia de Energía del Estado de Puebla.
- Bingke, Z. y Jingyun, L. (2023). A review of research on wireless charging technology for electric vehicles. *2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 4791-4797. <https://doi.org/10.1109/icems59686.2023.1034426>
- Canales-Manchuria, F., Canales-Manchuria, G. y Gutiérrez, A. C. (2023). Calidad del aire en relación a los niveles de concentración del monóxido de carbono. *Ateliê Geográfico*, 17(1), Article 1. <https://doi.org/10.5216/ag.v17i1.72804>
- CNG. (2011, 6 de diciembre). Daimler y Nissan investigan la recarga por inducción. *Motorpasión*. <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/daimler-y-nissan-investigan-la-recarga-por-induccion>
- ¿Cuál es el principio de funcionamiento de un sistema de carga inalámbrica basado en ondas electromagnéticas? (2023, 11 de junio). *Electricity - Magnetism*. <https://www.electricity-magnetism.org/es/cual-es-el-principio-de-funcionamiento-de-un-sistema-de-carga-inalambrica-basado-en-ondas-electromagneticas/>
- González, J. (2022). Volvo Cars prueba infraestructura de carga inalámbrica en un entorno urbano real. *Latam Mobility*. <https://latamobility.com/volvo-cars-prueba-infraestructura-de-carga-inalambrica-en-un-entorno-urbano-real/>
- Hidalgo, C. (2024). En Edomex ya son 2 millones de motos, hay una por cada 8.5 habitantes. *Milenio*. <https://www.milenio.com/politica/comunidad/en-edomex-ya-son-2-millones-de-motos-hay-una-por-cada-8-5-habitantes>
- La electricidad inalámbrica ¿Es posible un mundo sin cables? (2016, 23 de agosto). *Qmadis*. <https://qmadis.com/blog/electricidad-inalambrica-es-posible-mundo-sin-cables/>
- Mateos-Aparicio, J. P. (2020, 22 de junio). ¿Sabes qué es el sistema de carga por inducción de un vehículo híbrido? *Autofácil*. <https://www.autofacil.es/tecnic/sistema-carga-induccion-vehiculo-hibrido/176250.html>



• ONU Habitat. (2016). *Contaminación, automóviles y calidad del aire*. <https://onu-habitat.org/index.php/contaminacion-automoviles-y-calidad-del-aire#:~:text=Los%20autom%C3%B3viles%20particulares%20generan%20el,gas%20causante%20del%20efecto%20invernadero>

• Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. [Versión electrónica]. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

• Rashid, M. H. (1996). *Electrónica de potencia*. *Prentice Hall Hispanoamericana*. <https://riverraid17.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/03/electronica-de-potencia-rashid-espanol.pdf>

• Rodríguez, C., Vidal, C., Barros, R., Díaz, M. y Rajendran, S. (2022). Control of an ultrafast electric vehicle charger based on a series-parallel modular multilevel converter. *2022 Second International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/SMART55236.2022.9990425>

• Rodríguez, E. (2022). *Qué cargador inalámbrico comprar para cargar mi teléfono móvil: estándares, velocidad de carga y modelos destacados*. <https://www.xataka.com/seleccion/que-cargador-inalambrico-comprar-para-cargar-mi-movil-estandares-velocidad-carga-modelos-destacados>

• Ross, J. (2022, 20 de julio). *¿Vamos camino de un futuro inalámbrico? Solopress España*. <https://www.solopress.com/blog/es/impresion-inspiracion/estamos-en-el-camino-hacia-un-futuro-inalambrico/>

• Sauras, Á. (2022, 13 de abril). Coches eléctricos: así funciona la recarga inalámbrica. *Autofácil*. <https://www.autofacil.es/coches-electricos-e-hibridos/recarga-inalambrica-coches-electricos/350339.html>

• Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. (2018). *Informe del Medio Ambiente en México*. Capítulo 5. Atmósfera. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap5.html>

• Tesla: el genio que hace 100 años intentó construir una red mundial de comunicación inalámbrica que lo llevó a la perdición. (s. f.). *BBC News Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46789425>

• Tobón-Ramírez, D. A. y Restrepo-Laverde, J. V. (2018). Desarrollo de estación de carga de vehículos eléctricos. *Lámpasakos*, 19. <https://doi.org/10.21501/21454086.2532>

• Trejo, G. (2023, 23 de octubre). La evolución de los cargadores inalámbricos en los smartphones. *Droid Panic*. <https://droidpanic.com/la-evolucion-de-los-cargadores-inalambricos-en-los-smartphones/>

• Yáñez, I. (2019). Sistema de carga inalámbrica para vehículos eléctricos en reposo. *Enfoque UTE*, 10(2), 17-27.

• Zambrano, J. (2022). Puebla supera los 1.2 millones de vehículos en circulación: 66 % automóviles, 24 % camiones y 10 % motos. *Milenio*. <https://www.milenio.com/estados/puebla-supera-1-2-millones-vehiculos-circulacion#:~:text=En%20el%20a%C3%B1o%202021%2C%20el,ciento%2C%20en%20comparaci%C3%B3n%20con%202020>

