

Cargadores de baterías de mediana y baja capacidad para vehículos eléctricos

Consideraciones preliminares de diseño

Cargadores de baterías de mediana y baja capacidad para vehículos eléctricos

Consideraciones preliminares de diseño

César L. Trujillo R., Johan S. Sánchez C., Miguel Á. Dávila R.





UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
© Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico
© César L. Trujillo R., Johan S. Sánchez C., Miguel Á. Dávila R.

ISBN: 978-958-787-301-6
Primera edición, octubre de 2021



Dirección Sección de Publicaciones
Rubén Eliécer Carvajalino C.

Coordinación editorial
Nathalie De la Cuadra N.

Corrección de estilo
Proceditor

Diagramación y montaje de carátula
Jorge Andrés Gutiérrez Urrego

Editorial UD
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Carrera 24 N.º 34-37
Teléfono: 3239300 ext. 6202
Correo electrónico: publicaciones@udistrital.edu.co

Catalogación en la publicación – Biblioteca Nacional de Colombia

Trujillo Rodríguez, César Leonardo
Cargadores de baterías de mediana y baja capacidad para vehículos eléctricos: consideraciones preliminares de diseño / César L. Trujillo R., Johan S. Sánchez C., Miguel Á. Dávila R. -- 1a ed. -- Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2021.
pp. 112 (Espacios)

Incluye reseña de los autores. -- Contiene referencias bibliográficas.

ISBN 978-958-787-301-6

1. Baterías eléctricas - Carga - Investigaciones 2. Baterías eléctricas - Normas técnicas I. Sánchez C., Johan S. II. Dávila R., Miguel A. III. Título IV. Serie

CDD: 629.2293 ed. 23

CO-BoBN- a1082878

Todos los derechos reservados.

Esta obra no puede ser reproducida sin el permiso previo escrito de la Sección de Publicaciones de la Universidad Distrital.

Hecho en Colombia

Contenido

Presentación	9
Baterías en vehículos eléctricos	11
Normatividad en cargadores de vehículos eléctricos	33
Recomendaciones y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos	49
Selección de la topología del convertidor para el cargador de baterías	55
Simulación de topologías seleccionadas	83
Desarrollo de vehículos eléctricos y su infraestructura en el país	95
Conclusiones	103
Referencias	105
Autores	111

Presentación

El contenido de este libro no pretende desarrollar de manera particular una metodología para el diseño e implementación de cargadores de mediana y baja capacidad para vehículos eléctricos (VE), sino que por el contrario responde a una necesidad actual, en la que la tendencia es contar con sistemas electrónicos que cumplan con altos estándares de calidad de energía, en que su efecto sobre las redes eléctricas sea mínimo.

El estudio comienza con la búsqueda de vehículos eléctricos presentes en el mercado colombiano para determinar características comunes. Luego indaga sobre requerimientos técnicos y funcionales que deberían tener los cargadores de baterías de vehículos eléctricos, además de los parámetros de calidad de energía que deben cumplir dichos equipos y que son recomendados o exigidos por estándares nacionales e internacionales. Una vez hecho esto, se hace una amplia revisión de las topologías de conversión de energía eléctrica que pudieran llegar a cumplir con los requerimientos establecidos previamente en cuanto a funcionalidad, niveles de operación, eficiencia y calidad de energía. De este estudio se descartan algunas topologías, para luego hacer un análisis más detallado de las que sí cumplen con los requisitos básicos mediante procesos de simulación y evaluación de su operación. En este punto se deja en libertad al lector para que a partir de los análisis realizados seleccione la topología que mejor se ajusta a la aplicación que desee implementar.

El libro se estructura de la siguiente manera: el primer capítulo presenta los diferentes tipos de baterías empleadas así como una exploración de los vehículos eléctricos de mayor circulación en el mercado colombiano. El segundo expone la normatividad nacional e internacional en términos de

cargadores para VE, mientras que en el tercer capítulo se hacen recomendaciones y establecen requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos. El cuarto capítulo expone las topologías convertidoras más comunes usadas en cargadores de baterías para VE con un análisis comparativo en función de aspectos económicos, electrónicos y de eficiencia, además de estudios previos realizados por la comunidad científica. El quinto capítulo muestra los resultados de simulación de las topologías más apropiadas para esta aplicación. El sexto capítulo presenta el desarrollo de los vehículos eléctricos y su infraestructura para el caso colombiano. Por último, se plantean conclusiones generales acerca del diseño preliminar de cargadores de baterías de mediana y baja capacidad de potencia para vehículos eléctricos.

Lo plasmado en este libro se logró gracias al trabajo y colaboración de los integrantes del grupo de investigación del Laboratorio de Investigación en Fuentes Alternativas de Energía (LIFAE) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, con el apoyo económico de Colciencias y la Universidad Distrital a través de la financiación del proyecto de investigación titulado “Cargador de baterías de mediana y baja capacidad con baja distorsión armónica en corriente, elevado factor de potencia y alta eficiencia para vehículos eléctricos” (Contrato: FP44842 - 031 2016).

Baterías en vehículos eléctricos

Este capítulo presenta definiciones básicas relacionadas con las características de las baterías. Luego expone un breve estudio sobre las diferentes tecnologías de fabricación de baterías, especialmente las más usadas en aplicaciones de vehículos eléctricos. Una vez exhibidas las características fundamentales de cada familia de baterías, se eligen las que mejores prestaciones ofrecen a cada aplicación en particular, basados en criterios de rendimiento y costo. Finalmente, se realiza un análisis de los diferentes niveles de tensión usados por las baterías en los vehículos eléctricos actuales.

Definiciones básicas

Antes de elegir el tipo de batería a usar por un vehículo eléctrico, se tendrán en cuenta algunos conceptos básicos útiles en el momento de evaluar el rendimiento de cada familia de baterías y así tomar la decisión más conveniente.

Tensión

Es una de las características más sobresalientes y de mayor importancia para diferentes aplicaciones. Hace referencia a la diferencia de tensión existente entre los terminales de la batería —mientras no se encuentre alimentando ningún circuito externo— y se denomina tensión en vacío. Resulta necesaria esta aclaración, ya que la tensión de la batería puede verse disminuida una vez esté alimentando una carga, debido a subproductos resultantes de la reacción química que son solubles en el electrolito, cambiando sus propiedades de conducción. También es posible que se creen compuestos sólidos que se van depositando en los electrodos, lo que hace que caiga la diferencia de tensión entre los terminales. La caída de tensión se produce

gracias al paso de corriente: entre más pase mayor será la caída. La diferencia de tensión que aparece entre la interfase de los electrodos —zona de contacto metal-solución— disminuye mientras aumenta la corriente que circula por ellos.

Capacidad

Esta característica tiene gran importancia, ya que con adecuado conocimiento se puede optimizar la estrategia de carga. La capacidad es definida como la cantidad total de electricidad producida en la reacción electroquímica, cuyas unidades son culombios —o Coulomb (C)— o amperio-hora (Ah). Dicha capacidad está determinada por la masa activa de los electrodos, determinada por la ley de Faraday [1]. Adicionalmente, existen algunas diferencias en este concepto que se explican a continuación.

Nominal: capacidad que puede entregar la batería desde un estado de plena carga hasta alcanzar cierta tensión a una descarga determinada, usando una razón de descarga específica. Por ejemplo, cuando una batería con capacidad nominal de 1000 Ah es descargada con corriente constante de 200 A es capaz de mantener tensión durante cinco (5) horas.

Real: es la capacidad de la batería, pero esta vez se encuentra operando en un punto diferente, es decir, la batería no opera en las condiciones dadas como referencia en la capacidad nominal.

Retenida: es la capacidad de la batería después de un período de reposo o inactivad de la misma [2].

Ciclo de vida

Número total de veces que una batería puede ser descargada y recargada sin que deje de mantener su carga hasta un 80%.

Profundidad de descarga (DOD)

Relación entre la capacidad durante un ciclo de descarga y la capacidad nominal. Como ejemplo suponga una DOD de 80% para una batería con una capacidad de 100 Ah, lo cual indica que se está descargando a 80 Ah.

Energía específica

Cantidad de energía en watts-hora (Wh) que la batería es capaz de almacenar por kilogramo de su masa a una taza de descarga específica.

Densidad de energía

Se refiere a la cantidad de energía que tiene una batería en relación con su tamaño, es decir, es la cantidad de energía (Wh) almacenada en una batería por unidad de volumen para una taza de descarga determinada.

Familias de baterías

Es posible encontrar un sinnúmero de baterías de distinta fabricación que brindan diferentes prestaciones. Enseguida se presentan las más representativas en el mercado y las que ofrecen mejores ventajas para su aplicación en vehículos eléctricos.

Batería de sulfuro de sodio

El grupo de baterías desarrolladas por Ford Motor Company aún presenta algunos inconvenientes importantes, por lo que se siguen realizando investigaciones y mejoras para lograr una incorporación en el mercado. Compuestas de tubos electrolíticos de óxido de aluminio cerámicos con electrodos negativos de sodio y electrodos positivos de sodio fundido en medio de un contenedor aislado y sellado. Para mantener el sulfuro fundido la temperatura de la batería debe estar entre unos 300 °C y 350 °C, lo que ha dificultado su uso en el mercado automotriz. No obstante, se han presentado algunos avances que han logrado ofrecer temperaturas de operación de 150 °C [3]. Se estima que estas baterías tendrían un costo de aproximadamente siete veces lo que costaría una batería de ácido-plomo [4].

Batería de litio-hierro

Desarrollada por Sony Corporation y evaluada por Nissan. Entre sus características sobresalen los bajos efectos de memoria, la alta energía específica de 100 Wh/kg, la alta potencia específica de 300 W/kg y una vida útil de aproximadamente 1000 ciclos de carga. Fabricada para operar a 28.8 V consiste en ocho celdas cilíndricas metálicas cubiertas en un módulo de resina.

Incorpora un controlador de celda para verificar que cada una esté operando en un rango de 2.5 V a 4.2 V durante la carga y descarga. Su mayor desventaja es el alto costo de construcción debido al uso de un material compuesto de óxido de cobalto para el ánodo y la alta pureza de un material orgánico usado en el electrolito, además de la necesidad de un sistema de ventilación para mantener frías las baterías [1].

Batería de níquel-zinc

Combina el mismo tipo de electrodo positivo con un electrodo negativo de zinc que las de níquel-cadmio y níquel-hierro. Usa, además, una solución acuosa de hidróxido de potasio como electrolito. Destaca su relativamente elevada tensión por celda —aproximadamente 1.6 V—, tensión que mantiene constante durante una buena parte del ciclo de descarga. Adicionalmente, su alta densidad de energía —superá los 100 Wh/l—; energía específica aceptable de alrededor de 50 Wh/kg, funcionamiento a bajas temperaturas, y finalmente, precio, resultan ser características muy atractivas [5].

Batería de níquel-hierro

Esta batería usa un electrodo positivo de níquel sumergido en un electrolito de hidróxido de potasio como las baterías de níquel-cadmio y níquel-hidruro metálico. El material activo del electrodo es hierro, el cual tiene características atractivas de costo y estabilidad electroquímica. Las desventajas con estas tecnologías están relacionadas con la baja eficiencia energética del proceso de recarga y descarga debido a la producción temprana de hidrógeno durante la carga que conduce a un calentamiento excesivo de la batería. Otras desventajas son su alto costo, razón de autodescarga elevada y mal funcionamiento a bajas temperaturas [4].

Batería de ácido-plomo

Este tipo de batería usa el dióxido de plomo como material activo del electrodo positivo y plomo metálico con una estructura muy porosa como material activo del electrodo negativo. Estos materiales activos están soportados en rejillas de aleaciones de plomo. El electrolito es ácido sulfúrico diluido en un medio acuoso actuando como conductor iónico. Debido a

que el electrolito actúa en los procesos de carga y descarga se presenta como un material activo. Su rasgo más sobresaliente es, quizás, su amplia difusión en diferentes aplicaciones, ocupando alrededor de un 50 % del mercado internacional. La razón de esta amplia presencia es su relativa facilidad de fabricación y bajo costo.

Por otro lado, su construcción permite una tensión de 2 V por celda, valor que es relativamente alto respecto a celdas de otra fabricación, haciendo que para la elaboración de una batería de ácido-plomo se requiera menos cantidades de celdas frente a otras familias. Además, tiene la capacidad de proveer picos de corriente elevados durante el proceso de descarga, característica que permite aceleraciones mayores en los carros eléctricos.

De igual manera, esfuerzos constantes a lo largo de varios años de investigación han permitido desarrollos sobre esta batería que disminuyen las operaciones de mantenimiento convirtiéndolas en elementos que necesitan cuidados mínimos para su uso.

A pesar de las ventajas ya mencionadas, debido a los materiales usados para su fabricación, principalmente el plomo, las baterías de ácido-plomo poseen un peso elevado, lo que implica una baja energía específica —aproximadamente 40 Wh/kg— convirtiéndolas en elementos pesados, rasgo indeseable para aplicaciones de transporte. Otra desventaja de este grupo de baterías es que demanda un entorno de relativa baja temperatura para no deteriorar su estado y disminuir su ciclo de vida.

El proceso conocido como estratificación del electrolito en donde el material activo se transforma en sulfato de plomo durante la descarga y el electrolito se consume formándose agua en el electrodo positivo genera algunos inconvenientes. Aunque este proceso es reversible durante la recarga de la batería, desafortunadamente, la disminución de la concentración del electrolito no es lineal. Durante el proceso de carga, el ácido sulfúrico que se genera en los electrodos se va depositando en el fondo del contenedor, por lo que, al incrementarse la concentración del ácido aumenta el aglutinamiento y, por ende, la corrosión de los electrodos en la parte inferior [6]. Por tanto, pierden electrolitos con facilidad, debido a la excesiva producción de gases ocurridos durante la sobrecarga.

Batería de níquel-cadmio

Usa como electrolito una solución acuosa de una base formada por hidróxido de potasio diferente a las de ácido-plomo que utilizan una solución ácida. Como consecuencia de dicha elaboración presenta características de baja temperatura para su funcionamiento y permite que sea sellada herméticamente, lo cual resulta conveniente, teniendo en cuenta la toxicidad de sus elementos.

Destaca entre sus ventajas que el electrolito formado por hidróxido de potasio no forma parte de las reacciones electroquímicas, haciendo que su concentración no varíe durante los procesos de descarga o recarga, por lo que su tensión varía poco en el proceso de descarga. De igual manera presenta alta densidad de energía —alrededor de 90 Wh/l— y una alta energía específica —aproximadamente 60 Wh/kg—, permitiéndole tener un elevado ciclo de vida. Otro rasgo atractivo es que después de las baterías de ácido-plomo, las baterías de níquel-cadmio son las de mayor posicionamiento en el mercado.

Su mayor desventaja radica en que el níquel es un elemento costoso, siendo esta batería de un precio más elevado que las de ácido-plomo. Asimismo, la tensión máxima lograda por celda es de alrededor de 1.2 V, lo que resulta inferior respecto a las celdas de otros materiales, por lo que se requieren más unidades para construir una batería. También tienden a recalentarse durante su funcionamiento, lo que afecta su rendimiento. Finalmente, a causa del uso de componentes tóxicos en su fabricación, especialmente el cadmio, resulta de difícil reciclaje, por ende, dañino para el medioambiente.

Seguimiento tecnológico de las baterías para VE

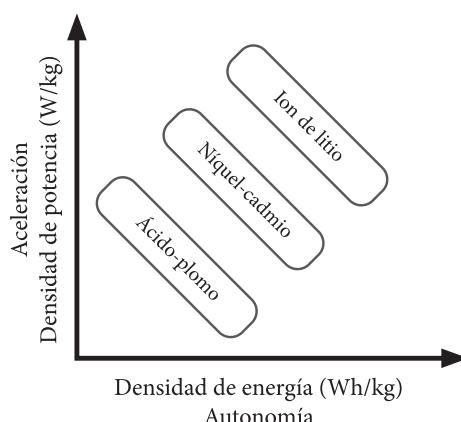
Desde el desarrollo inicial de VE —principios del siglo XX— se han usado distintos tipos de baterías que evolucionaron al ritmo de las investigaciones mundiales. A continuación se expone dicha evolución, solo desde la etapa de auge comercial de estos vehículos, que se remonta a la década del noventa.

Estas primeras versiones usaron baterías de ácido-plomo, aunque algunos fabricantes utilizaron tecnologías de níquel-cadmio y sulfuro de sodio. Posteriormente, a principios del año 2000 y debido a la reducida autonomía que brindaban las baterías de ácido-plomo se empezó a usar el hidruro de

níquel-metal, causando un aumento en la densidad de energía, lo que incrementó, a su vez, el costo del automóvil y desincentivó compradores. Luego, como consecuencia de la preocupación ambiental, resurgió el interés por los vehículos eléctricos, impulsado también por esfuerzos industriales como el de Tesla Motors, que desarrolló en 2003 el Roadster, carro que se convirtió en el primer VE de producción en utilizar baterías de ion-litio compuesto de 6.831 celdas, dándole una autonomía aproximada de 320 km. Desde entonces, aunque hay una gran variedad de baterías de ion de litio, resaltan las de ánodo de carbono/grafito y cátodo de óxido de metal de litio, siendo usado como metal cobalto, manganeso, níquel o una mezcla de estos con sal de litio disuelta en un solvente orgánico. El titanato de litio para el ánodo y cátodo de manganeso de litio, es otra composición química usada en las baterías para VE actuales [7].

Las baterías de ion de litio han tenido hasta ahora un amplio uso como sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones móviles, especialmente carros eléctricos, por su reducido tamaño, volumen y peso en relación con la energía almacenada, característica que tiene un impacto directo en el rango del vehículo. La figura 1 muestra cómo, además, brinda una mayor aceleración. También tienen otras ventajas como no tener efectos de memoria y poseer altos ciclos de vida. Su mayor desventaja es que es más costosa que sus predecesoras.

Figura 1. Densidad de energía y de potencia de las tres principales familias de baterías



Fuente: [7].

Ecualización

Las baterías de ion de litio son, por bastante, las más usadas por VE. Sin embargo, debido a sus características químicas, no pueden suplir con solo una celda de este material, no reúnen los requerimientos de tensión y capacidad. Por esta razón se tienen que hacer arreglos en serie y paralelo de estas celdas. Desafortunadamente, debido a disparidades en la fabricación de las celdas estos ajustes traen otras consecuencias como el aumento de su resistencia interna y posterior disminución acelerada de la capacidad de la batería. Por ello se requieren técnicas que intenten apaciguar este efecto, siendo la ecualización el método más efectivo para tal efecto. La ecualización se clasifica en dos grandes grupos; el primero de ellos es la ecualización pasiva cuya corriente es baja y sus efectos se alejan bastante de lo deseado. El segundo es la ecualización activa que, a diferencia del grupo anterior, tiene mayores corrientes y menor cantidad de pérdidas —sin embargo, las técnicas de control son notablemente más complicadas y costosas en su implementación—. Las técnicas de ecualización activa pueden clasificarse, a su vez, de acuerdo con el camino que toma el flujo de energía en el proceso de ecualización, estas pueden ser: desviación de celda, celda-celda, celda-*pack*, *pack*-celda, celda-*pack*-celda, refiriéndose al grupo de baterías como *pack*. Pueden ser, además, de tipo capacitivo, inductivo o incorporar algún convertidor dentro de su estructura [8].

Estimación del SOC

El estado de carga (*State Of Charge*) de la batería supone un reto importante debido a que, por lo general, se hace mediante la lectura de otras variables físicas, cuya variación en el ciclo de vida es notable, por lo que la estimación del SOC se vuelve imprecisa. Dicha inexactitud en la determinación del SOC genera problemas en el ciclo de vida de las baterías, y esto deriva en el sometimiento a sobrecargas o descargas profundas. Además, la autonomía que se calcula en los vehículos se hace a partir del SOC, por lo que errores en este generan problemas en el rango de conducción del carro. Siendo entonces un aspecto tan importante, suscita múltiples propuestas para su solución, que van más allá de la técnica convencional del conteo de carga. En [9] se realiza una juiciosa revisión de las diferentes técnicas de estimación de SOC,

agrupadas en cinco categorías: las convencionales que basan su estimación en un modelo y dentro de las que se encuentra la estimación por tensión de circuito abierto o resistencia; la categoría de filtros adaptativos que usa distintos filtros como el de Kalman o el Kalman de punto sigma para realizar el cálculo del SOC; la tercer categoría es la compuesta por algoritmos de aprendizaje en redes neuronales o sistemas difusos, que usa caracterizaciones previas de la batería para así estimar el SOC. Los observadores no lineales componen la cuarta categoría, siendo estos los que incorporan en su estructura observadores tipo deslizante, proporcional-integral, entre otros, para encontrar el estado de carga. Finalmente, una quinta categoría, que agrupa las técnicas que no se encuentran en las categorías anteriores o que son un híbrido de algunas de estas, dentro de las que se puede nombrar la interpolación lineal o la respuesta al impulso.

Estimación del SOH

Usualmente, cuando la batería solo llega hasta el 80% de su capacidad nominal, se da por terminado su ciclo de vida. La proximidad a este valor se establece a partir de lo que se conoce como el SOH (*State of Health*) de la batería. Para estimarlo se usan dos clases de técnicas. La primera se basa en modelos de circuito equivalente o modelos electroquímicos para lograr su propósito. Generalmente, estos métodos hacen uso de técnicas como filtrado Kalman o filtro de partículas, para que con lecturas de tensión, corriente y temperatura se estime el SOH *online*. El inconveniente con ello es que se debe establecer de manera *offline* la relación entre la tensión de circuito abierto, el estado de carga para distintos SOH y temperaturas, por lo que se deben implementar complejos algoritmos que hacen que estas técnicas solo puedan ser corridas en BMS (*Battery Management System*). La segunda clase —denominada “ingeniería de características”— extrae algunos indicadores del SOH a partir de ciertas señales de la batería como, por ejemplo, la tensión de descarga en sus terminales. Sin embargo, gracias a que esta tensión es altamente dependiente de la carga conectada en los terminales de la batería, el uso de esta característica como indicador de SOH está limitada a aplicaciones de descarga a corriente constante, lo cual claramente discrepa de las aplicaciones en VE, debido a que el proceso de descarga a corriente

constante no se da durante la conducción del vehículo. Por lo anterior, para aplicaciones en VE se suele usar la tensión de recarga de la batería, pues los procesos de carga se encuentran totalmente estandarizados por los fabricantes, garantizando que siempre se haga bajo las mismas condiciones [10].

El futuro de las baterías para VE y su recarga

En la actualidad muchas compañías trabajan en el desarrollo de nuevas tecnologías que brinden mejores características a sus baterías. El más prometedor es, quizás, de baterías metal-aire, específicamente, tecnología de baterías de litio-aire, cuya densidad de energía es teóricamente igual a la de la gasolina, con lo que se lograría aumentar drásticamente la autonomía del VE. Algunas investigaciones sugieren que estas baterías podrían tener una densidad de energía cercana a 11.429 Wh/kg (basados en la masa del litio usado), además de una alta capacidad específica que podría rondar los 3.860 mAh/g, y una tensión por celda de 2.96 V. Estas baterías están compuestas por un ánodo de litio y un cátodo de aire compuesto por un material poroso que extrae el oxígeno del aire circundante. Al combinarse el litio y el oxígeno, se forma un óxido y libera energía. Dado que el oxígeno no necesita ser almacenado en la batería, el cátodo es muchísimo más ligero que el de las baterías de ion de litio actuales, generando una notable reducción en el peso de la batería. Sin embargo, con algunos prototipos se han vislumbrado algunas de sus desventajas, como reducido ciclo de vida, lentitud de recarga (comparada con las de ion de litio) y dificultad para evitar que el vapor de agua se mezcle con el oxígeno, pues el litio reacciona violentamente con el agua [11].

Las baterías de metal-aire no son el único camino que están explorando las compañías en sus investigaciones; aparentemente, las baterías de estado sólido son atractivas alternativas al evaluar los resultados obtenidos hasta el momento, pues tienen la ventaja de no tener fugas de electrolito y ser más estables que las de litio, además de un ciclo de vida alto si se comparan con las demás, y no requieren complejos y costosos sistemas de enfriamiento debido a su habilidad de operar en un amplio rango de temperaturas [12].

A pesar de todos los esfuerzos en investigación y desarrollo que se están realizando y fueron reportados en este libro, puede que pase mucho tiempo para que se den los resultados esperados, o simplemente no se lleguen a dar.

Como se menciona en [13], la problemática que más atención demanda es, quizás, el tiempo de recarga, pues aunque compañías como Tesla Motors ya tienen cargadores de 135 kW, y pueden cargar el vehículo en un 80% en tan solo 45 minutos, esto sigue siendo mucho más tiempo que el que le toma actualmente a un vehículo de combustión en una estación de servicio. Adicionalmente, estos cargadores súperrápidos tendrían serias consecuencias en la red eléctrica, tales como problemas en las líneas de distribución y en los transformadores, causados por los picos de energía que demandan. Por esta razón, han surgido propuestas que hacen frente a este problema desde una perspectiva distinta a la convencional, como las llamadas estaciones de intercambio, en las que se proponen lugares a los que se pueda ir y cambiar la batería a punto de descargar por otra totalmente recargada, lo que disminuye enormemente el tiempo necesario para el proceso, permitiendo controlar el tiempo en el que las baterías son recargadas y así evitar picos en la red.

Esta no es una idea únicamente académica; ya se encuentran algunos casos de éxito. Por ejemplo, la compañía china NIO dedicada a la construcción de VE, ha puesto en operación 18 estaciones de intercambio. Otro ejemplo, también en China, es el de BJEV, que construyó 106 estaciones de intercambio especialmente para taxis eléctricos. Aunque esta solución es muy sencilla, implica otros problemas como falta de estándar en las características de las baterías usadas para diferentes modelos de VE, por lo que las estaciones que hay hasta el momento funcionan, exclusivamente, para marcas específicas. Otra desventaja es el alto costo que se tiene hasta el momento para su operación. Sin embargo, existen algunas investigaciones que mejoran y proponen estrategias para la operación de este tipo de estaciones como la que se reporta en [13], en la que se presenta un modelo de flujo dinámico, el cual ofrece una aproximación determinística y continua con demanda estocástica y tiempos de recarga aleatorios que harían más eficiente su funcionamiento.

Vehículos eléctricos en Colombia

Aunque el mercado nacional tiene una industria automotriz que mueve importantes cifras de ventas, los vehículos eléctricos aún no tienen una importante penetración debido, principalmente, a la escasa infraestructura eléctrica

que no permite encontrar fácilmente puntos de recarga. Sin embargo, en los últimos años diferentes compañías han traído al país modelos de distintas capacidades que buscan cautivar tanto al sector público como al privado.

Renault Twizy

La marca Renault es hasta el momento la mayor impulsadora de este tipo de vehículos en el mercado de los particulares, siendo por ahora Twizy su modelo más popular en Colombia. Este vehículo (figura 2) cuenta con un diseño compacto con capacidad máxima para dos personas, un motor eléctrico de 17 Hp que es alimentado por un *pack* de baterías de ion-litio cuyo peso es de 100 kg, capacidad de 6.1 kWh, carga lenta suministrada a 10 A y enchufe estándar tipo 3 *pin plug* que puede ser conectado a un *socket* de 230 V para obtener una carga completa en aproximadamente tres horas y media, dando lugar a una autonomía de aproximadamente 90 km, dependiendo de las condiciones de recorrido [14].

Figura 2. Modelo de Renault Twizy



Fuente: [14].

BYD E6

En 2013 Bogotá adquirió una flota de 43 taxis eléctricos modelo E6 similares a los mostrados en la figura 3, fabricados por la compañía BYD. Estos alcanzan una velocidad máxima de 140 km/h, con un consumo de potencia de 3.1 millas/kWh con una autonomía de 300 km/h. El suministro eléctrico

lo aporta un banco de baterías de hierro-fosfato (especialmente desarrollado por la compañía, mejorando estándares de estabilidad, ciclo de vida y facilidad de reciclaje), siendo su capacidad de 61.4 kWh. Para recargar estos vehículos el distrito dispuso de dos estaciones de uso exclusivo en las que es posible recargar al 80 % en 15 minutos y al 100 % en media hora [15].

Figura 3. Modelo de BYD E6



Fuente: [15].

Mitsubishi iMiEV

Vehículo eléctrico de origen japonés (figura 4). En julio de 2014 reportaba ventas a nivel mundial de 32 000 unidades. Posee una autonomía de 160 km que es lograda por un banco de baterías de ion-litio de 16 kWh compuesto por 22 celdas en serie para lograr una tensión nominal de 330 V con una energía específica de 80 Wh/kg. Cuenta con dos tipos de conectores para la recarga. El primero, denominado “chademo”, ofrece una carga DC rápida de 125 A, con lo que la batería puede recargarse en un 80 % en 20 minutos. El segundo conector o “menneke” es un punto de recarga rápida y lenta en AC con características variantes según la conexión de la variación de modelo [16].

Figura 4. Modelo de Mitsubishi iMiEV



Fuente: [16].

BMW i3

La compañía BMW —de origen alemán— desarrolló la serie de vehículos eléctricos i3 de aspecto similar al presentado en la figura 5, alimentados por una batería de ion-litio de 22 kWh. De acuerdo con las variaciones hechas específicamente para cada región del mundo, logran autonomía de 130 a 200 km mediante un motor eléctrico de 125 kW. Este modelo puede ser recargado de tres maneras: el primero es de nivel 1 y carga el vehículo en 8 horas; el segundo se hace mediante un cargador nivel 2 conectado a una instalación monofásica de 230 V a 32 A, permitiendo una recarga total en 3 horas; el tercero permite una recarga nivel 3, a partir de una instalación trifásica de 230 V a 63 A, logrando una carga total en 30 minutos. Existen algunas versiones del vehículo REx que incluyen un motor a gasolina de doble cilindro de 647 cc [17].

Figura 5. Modelo de BMW i3



Fuente: [17].

Renault Zoe

Es un automóvil dos puertas de cuatro puestos con moderada aceptación nacional. La versión *Life*, mostrada en la figura 6 ronda los 100 millones de pesos. Este vehículo con su batería de ion de litio Z.E.40 de 52 kW de capacidad, ofrece una autonomía real de unos 300 km, la cual puede ser recargada a través de un cargador a bordo capaz de proporcionar una potencia desde 3.5 kW. Para su recarga se usa un tomacorriente tipo “camaleón” capaz de adaptarse a las características de la red a la cual se conecta y así recargar la batería en el menor tiempo posible, aunque también es posible hacer uso de un cargador combo CCS. Se puede recargar la batería hasta un punto tal que genere 150 km de autonomía en apenas media hora. Además, la batería soporta carga rápida de hasta 50 kW. Estos vehículos ofrecen la opción de un *wallbox* que es, básicamente, un cargador de pared de 7 kW que puede llevar la batería en 10 horas a un estado de carga de 0% a 80% [18]. Para su más reciente versión, el Renault Zoe viene provisto de un motor eléctrico denominado R135 de 136 CV de potencia.

Figura 6. Modelo Renault ZOE



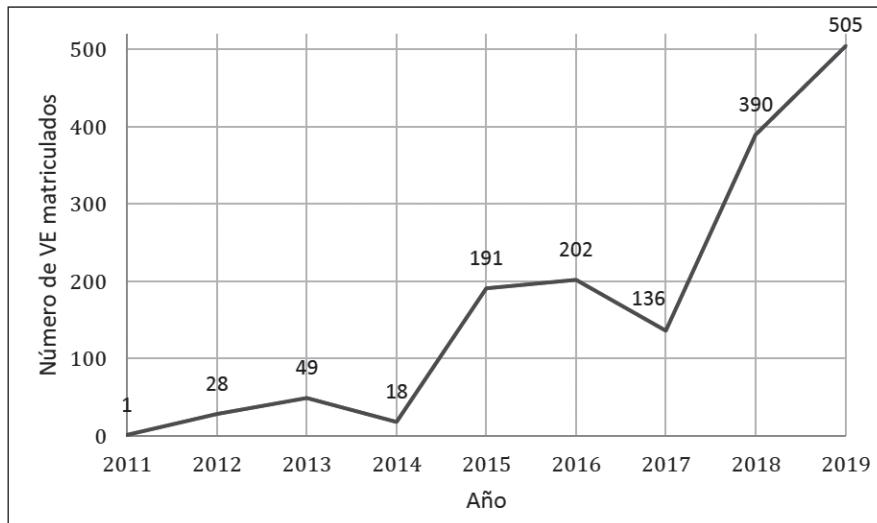
Fuente: [18].

Cifras de los VE en Colombia

Según el más reciente reporte del sector automotor por parte de la ANDI en su apartado de vehículos eléctricos e híbridos [19], de acuerdo con las cifras del RUNT, tan solo en mayo de 2019 en Colombia se matricularon 78 vehículos eléctricos, siendo Renault la marca de mayor participación con 44.9%, seguida por BMW, con 43.6%. Para tener una visión más global y detallada del sector presentamos en la figura 7 el número de vehículos

eléctricos nuevos adquiridos por los colombianos desde 2011. Las cifras de la Asociación Nacional de Movilidad Sostenible (Andemos) muestran que entre enero y agosto de 2019 en el país se han vendido 505 vehículos eléctricos, representando un aumento de 195.3% respecto al mismo periodo del año anterior [20], recalmando, además, que en lo que va corrido de este año ya se vendieron 115 vehículos eléctricos más que el año anterior. Con algunas excepciones, la figura 7 muestra una marcada tendencia al crecimiento y aceptación de estos vehículos, consolidando a Colombia como el principal mercado de vehículos eléctricos de la región hasta la fecha, por encima de México, Chile y Ecuador.

Figura 7. Número de vehículos eléctricos matriculados por año

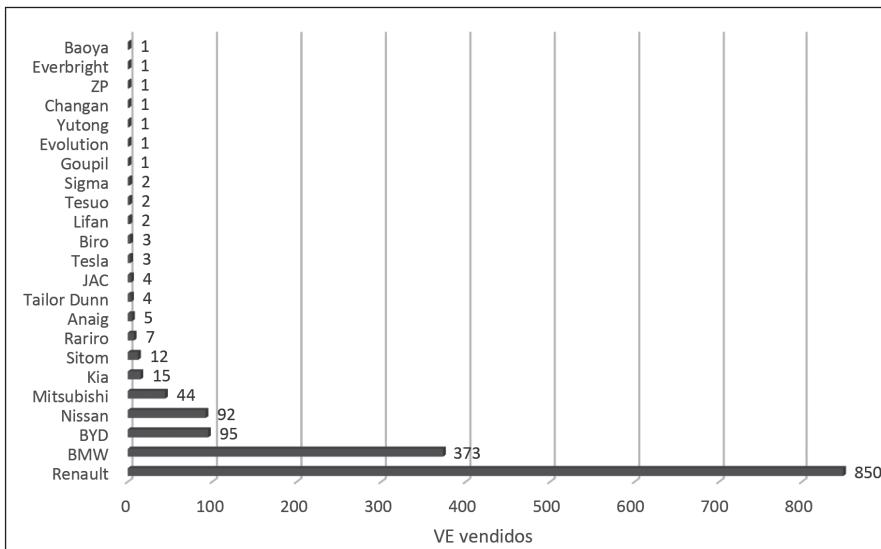


Fuente: elaboración propia a partir de [20].

Ante el evidente crecimiento de la presencia de VE en el país presentado en la figura 7, resulta conveniente conocer la constitución del sector de vehículos eléctricos a nivel nacional. La figura 8 muestra las marcas presentes en el mercado desde 2011 y la cantidad de vehículos eléctricos que han vendido con corte a agosto del 2019. Destaca el alto dominio de la marca Renault frente a sus competidoras, tal cual como lo hace en el mercado de vehículos de combustión interna. Adicionalmente, vemos que gracias al creciente interés por la movilidad eléctrica de los compradores

colombianos, el mercado ha atraído nuevas marcas nutriendo el sector, haciéndolo más competitivo, beneficiando al comprador con una mayor variedad de modelos, características y precios.

Figura 8. Número de vehículos eléctricos matriculados de acuerdo con su marca



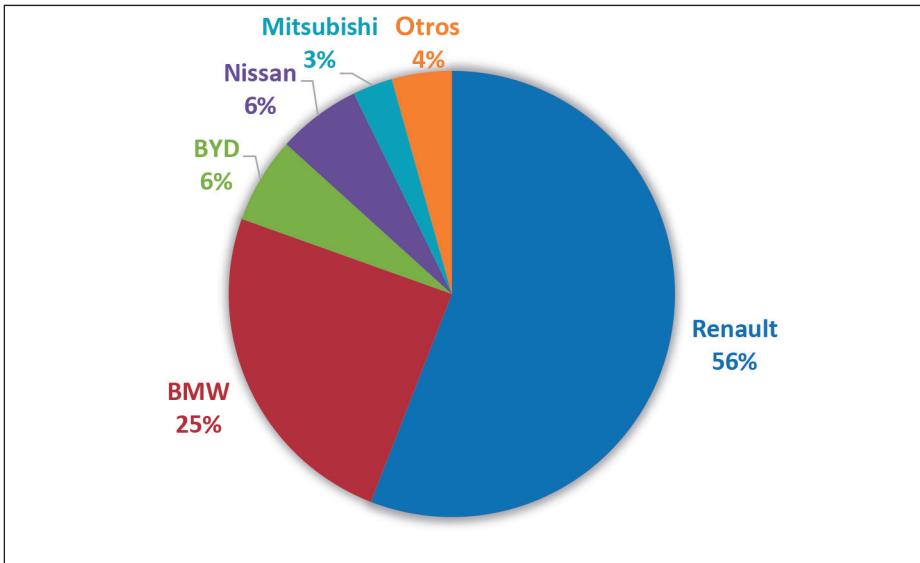
Fuente: elaboración propia a partir de [20].

Para conocer la porción específica de mercado que le corresponde a las diferentes marcas, se presenta la figura 9 en la que se evidencia porcentualmente el dominio de Renault en el mercado, con más de la mitad del parque automotor eléctrico (56%). No obstante, la marca BMW viene en sostenido crecimiento alcanzando un 25% de participación debida, aparentemente, a la confiabilidad de sus modelos y al mejoramiento de su autonomía. Sin embargo, este carro tiene un precio actual que ronda los 164 millones que lo aleja del alcance de los sectores populares. Es por ello que las diferentes marcas oferentes deben ajustar no solo sus modelos a las características topológicas del territorio nacional, sino también al poder adquisitivo de los posibles compradores.

Según Andemos, en 2019 el posicionamiento o *ranking* de las líneas más vendidas fue el siguiente: Renault Twizy Technic en la cabecera; BMW i3 en segundo lugar, BMW i3S en el tercero y Renault Zoe en el cuarto lugar. Vale

la pena mencionar que los híbridos HEV y los PHEV también tienen una presencia nacional importante con 1254 y 615 matrículas, respectivamente.

Figura 9. Participación porcentual de las diferentes marcas de VE en el mercado colombiano



Fuente: elaboración propia a partir de [20].

Estas estadísticas son reflejo de una ciudadanía más consciente del impacto medioambiental del uso de combustibles fósiles, y a su vez, producto de los diferentes incentivos otorgados a través de distintas medidas políticas de los años recientes. Entre estas sobresalen: porcentaje especial e igual a 5% para el impuesto al valor agregado (IVA) —que resulta ser 14 puntos porcentuales inferior al que tienen los vehículos de combustión—; 0% de arancel para este tipo de transporte y excepción de medidas de pico y placa, día sin carro y pico y placa medioambiental.

A finales de agosto de 2019 el gobierno sancionó la Ley 1964, en la que se plantean nuevos beneficios para los usuarios de la movilidad eléctrica detallados así: el impuesto del vehículo se liquidará como el 1% de su valor comercial —a diferencia de los vehículos tradicionales cuyo impuesto varía dependiendo de su valor comercial, que puede llegar hasta un 3.5% si dicho valor supera los 45 millones de pesos—. También establece un descuento de

10 % del precio del seguro obligatorio de accidentes de tránsito (SOAT) [21]. Estas medidas responden a estrategias que buscan una transición gradual. Mínimo el 10 % de los vehículos adquiridos por entes estatales para 2025 debe ser eléctrico hasta llegar a 2035, año en el que todo vehículo que se adquiera debe ser cero emisiones.

Selección de la batería

El Departamento de Energía de Estados Unidos creó una división denominada United States Advanced Battery Consortium (USABC) cuyo propósito es acelerar el desarrollo de baterías para vehículos eléctricos. Este consorcio ha establecido un grupo de características a mejorar que conviertan los vehículos eléctricos en una alternativa competitiva frente a sus homólogos de combustión, en términos de rangos de capacidad, precio y rendimiento. Estos esfuerzos se encuentran enfocados en las familias de baterías de plomo-ácido, NiMH, Li-ion y Litio-polímero y básicamente se centran en:

- Reducir el impacto ambiental de las baterías desechadas para alcanzar bajos índices de toxicidad y facilitar su reciclaje.
- Alta densidad de energía, lo que permitiría darle al vehículo un amplio rango de autonomía de conducción antes de que la batería requiera un ciclo de recarga. Igualmente, esta característica también posibilita el aumento de potencia de tracción del vehículo.
- Largas ciclos de vida que eviten al propietario del vehículo eléctrico la frecuente adquisición o mantenimiento de las baterías, disminuyendo así los costos de mantenimiento del vehículo.
- Bajo costo para que el automóvil sea económicamente atractivo para el consumidor.

Estos aspectos, junto con otros que se expondrán a lo largo del libro, serán tenidos en cuenta para la selección de la batería, como ejercicio que permita evidenciar una metodología a la hora de diseñar un cargador de baterías.

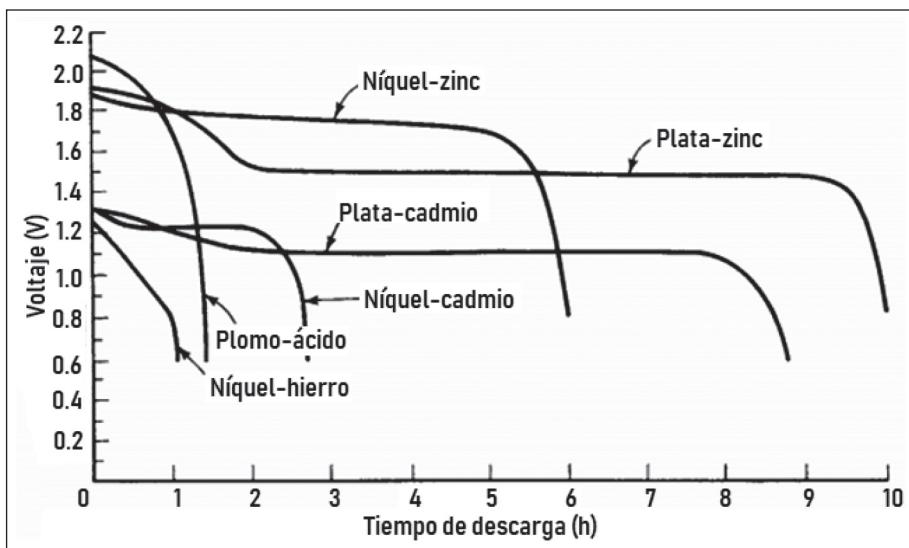
En primer lugar, el principal compuesto de las baterías de ácido-plomo es reciclado con relativa facilidad frente a los compuestos de otras baterías, debido a que se viene trabajando con este material desde hace varias décadas.

Adicionalmente, la batería de ácido-plomo presenta la mejor característica de autodescarga al tener un promedio de pérdida de carga por mes de 4% a 6%. Como ya se mencionó, las baterías de ácido-plomo tienen una gran presencia en diferentes mercados, lo cual facilita enormemente su adquisición, especialmente en términos económicos. De igual manera es una batería ampliamente estudiada sobre la que existe una gran cantidad de documentación, lo que permite desarrollar un modelo que se aproxime muy bien a su comportamiento, aspecto clave para el desarrollo y buen funcionamiento del cargador. Presenta una tensión por celda relativamente alta frente a las demás familias, lo que resulta conveniente en el momento de armar el banco de baterías.

Según la figura 10 las baterías de ácido-plomo presentan una mayor variación en la tensión de celda que muchas de las demás familias de baterías, siendo la de ion-litio la de mejor rendimiento en este aspecto. Sin embargo, tal y como se mostró en el apartado “Seguimiento tecnológico de las baterías para VE”, estas últimas presentan una gran volatilidad, implicando un gran riesgo para los usuarios que empleen este tipo de baterías, mientras que las primeras funcionan perfectamente en un amplio rango de temperaturas y son muy estables en cuanto a composición química se refiere.

Por todas estas razones se eligen las baterías de ácido-plomo, como ejemplo, para que el lector pueda apreciar el proceso de diseño del cargador de baterías. Dicho proceso puede ser aplicado a otro tipo de baterías, de acuerdo con el objetivo fundamental de las mismas dentro de la aplicación. En cuanto al nivel de tensión, se elige uno que se encuentre dentro de los valores de tensión de las baterías usadas por los carros descritos en la sección Vehículos eléctricos en Colombia. Resultado de ello se eligió como máxima tensión 240 V.

Figura 10. Tensión nominal de diferentes familias de baterías a una igual tasa de descarga



Fuente: [2].

Tecnologías complementarias

Las familias de baterías mencionadas con anterioridad tienen en común el mismo conjunto de falencias, dentro de las que destacan: una vida útil limitada a un determinado número de ciclos de recarga, lo que encarece su uso y perjudica al medioambiente debido a los elementos tóxicos de los que generalmente se componen; bajas corrientes de descarga, haciendo lento o defectuoso el arranque de ciertos elementos que usan como suministro una batería. Estas desventajas son el principal obstáculo para una mayor penetración de las baterías en diferentes dispositivos y es por ello que se está trabajando en el desarrollo de elementos que complementen el rendimiento de las baterías, mejorando las falencias mencionadas. Estos elementos son conocidos como los supercondensadores, cuyo propósito es almacenar energía eléctrica a través de la absorción de iones o las reacciones redox de superficie. Con estas tecnologías de fabricación se consiguen mayores ciclos de recarga respecto a las baterías convencionales y a su vez una mayor densidad de energía [22], brindando una respuesta más rápida al sistema de almacenamiento de energía.

A pesar de que los supercondensadores siguen teniendo bajas capacidades de carga respecto a las baterías convencionales, se presentan como complemento perfecto de los sistemas de almacenamiento energético, especialmente aquellos que requieren cambios rápidos en las corrientes de suministro [23].

Normatividad en cargadores de vehículos eléctricos

Este capítulo muestra un resumen de las recomendaciones y normatividad que rige el funcionamiento de los cargadores de baterías de vehículos eléctricos de acuerdo con sus características y condiciones de operación, enfocado en restricciones y recomendaciones referentes a niveles de potencia, sistemas de protección, conexiones y calidad de energía, evaluada a través de parámetros como la distorsión armónica total en corriente y el factor de potencia, conceptos que son de suma importancia para evaluar un cargador para VE.

Normatividad colombiana RETIE

De acuerdo con la versión más reciente del anexo general del RETIE Resolución 90708 del 30 de agosto de 2013 [24], el cual se rige por el IEC 61581, los cargadores eléctricos usados para la recarga de baterías de vehículos eléctricos (VE) se pueden clasificar según el modo de recarga así:

- Modo 1: La conexión del VE a la red eléctrica se realiza directamente por medio de un tomacorriente monofásico o trifásico tipo doméstico, con una puesta a tierra incorporada. El cargador, el sistema de control y el cable hacen parte del vehículo.
- Modo 2: La conexión del VE a la red eléctrica se realiza por medio de un tomacorriente monofásico o trifásico tipo doméstico a través de un monitor de recarga, que puede tener incorporado o no el cable de recarga. La carga se limita a 10 A.

- Modo 3: La conexión del VE a la red eléctrica se realiza a través de una base con tomacorrientes especiales que se alimenta desde un circuito dedicado. El sistema de monitoreo de la recarga está incorporado a la base.
- Modo 4: Es el caso típico de estaciones de carga. La conexión del VE a la red eléctrica se realiza en corriente continua, en tiempo corto. El cargador se encuentra fijo y tiene las funciones de monitoreo de recarga y protección.

Requisitos de producto

Los equipos cuyo propósito es la carga de baterías de vehículos eléctricos (VE) deben reunir los siguientes requisitos adaptados de las normas IEC 61851-1, SAE J1772, UL 2594, UL 2231, UL 991, UL 1998 y UL 2251 y demostrarlo mediante Certificado de Conformidad de Producto, es decir:

- Ser diseñados según las tensiones normalizadas en Colombia para ser conectados a la instalación eléctrica domiciliaria; instalaciones eléctricas industriales, estaciones de carga o sitios de parqueo.
- El cargador debe contar con sistemas de protección que impidan accidentes personales, daños del sistema de carga del vehículo o de la red de alimentación.
- Marcado y etiquetado: Debe tener una placa con marcación legible y permanente con la siguiente información o parámetros, que deben ser verificados mediante pruebas en el proceso de certificación:
 - Número de fases
 - Tensión nominal de la fuente
 - Tensión mínima y máxima de la carga
 - Tasa de carga
 - Marca registrada o nombre del producto en Colombia o del importador
 - Potencia consumida
 - Factor de potencia
 - Distorsión armónica

Requisitos de instalación

En la instalación se deben cumplir los preceptos de la norma IEC 61851-1 o de la sección 625 de la norma NTC 2050, especialmente los siguientes:

- Los cargadores de baterías de vehículos eléctricos deben ser revisados técnicamente con la periodicidad que recomiende el productor —o por lo menos una vez al año si el productor no determina la frecuencia de revisión— para validar su funcionalidad.
- En los modos de carga 3 y 4 deben tomarse precauciones para prevenir la alimentación accidental del VE al punto fijo de alimentación.
- Separación eléctrica: Una fuente no puesta a tierra que abastece un vehículo eléctrico debe tener una separación simple.
- Se debe proteger el equipo de influencias externas tales como:
 - Presencia de agua (EA): Cuando el punto de conexión está instalado al aire libre, el equipo será seleccionado con un grado de protección de al menos IPX4 para proteger contra salpicaduras de agua (AD4).
 - Presencia de cuerpos extraños sólidos (AE): Cuando el punto de conexión está instalado al aire libre, el equipo deberá ser seleccionado o provisto de un grado de protección de al menos IP4X con el fin de proteger contra el ingreso de objetos pequeños (AE3).
 - Impacto (AG): El equipo instalado en las zonas públicas y sitios de parqueo debe estar protegido contra daños mecánicos (impacto de severidad media AG2).

Igualmente, estas influencias externas se pueden controlar con sistemas de protección NEMA 3R.

La protección básica del equipo incluye las siguientes opciones:

- Cada punto de conexión debe estar protegido individualmente por un interruptor diferencial con una corriente residual de funcionamiento que no exceda 30 mA, a excepción de los circuitos que utilizan la medida de protección de la separación eléctrica. Los dispositivos seleccionados deben desconectar todos los conductores activos, incluido el neutro.

- Cada punto de conexión debe ser suministrado por un circuito individual protegido por un dispositivo de protección contra sobrecorrientes.
- Cada enchufe o conector de vehículo debe estar situado lo más cerca posible del lugar de estacionamiento del VE para su recarga.
- Un enchufe o conector de vehículo debe suministrar carga a un solo vehículo eléctrico. La parte más baja de cualquier tomacorriente debe estar colocada a una altura entre 0.5 m y 1.5 m del suelo.

Normatividad colombiana NTC

La Norma Técnica Colombiana NTC 2050 [25], principalmente en las secciones 511-8 y 511-9 hace referencia a equipos para carga de baterías y carga de vehículos eléctricos, ubicación de los cargadores para las baterías y disposición de los conectores. La sección 625 se compone, principalmente, de requerimientos y disposiciones de equipos utilizados para realizar recarga de vehículos eléctricos, medir niveles de tensión y corriente utilizados, además de algunos conductores usados para dicha recarga. Es de aclarar que estas normas no son aplicables a motocicletas, bicicletas o vehículos similares, ni a vehículos eléctricos como: carretillas industriales, grúas, elevadores, carritos de golf y relacionados (UIET-CIDET).

Generalidades

Todos los equipos y alambrado eléctricos para carga de vehículos deben estar instalados según la sección 625 de la norma NTC 2050, excepto lo modificado en los apartados *b)* y *c)*:

b) Ubicación de los conectores: No debe haber conectores instalados en lugares Clase I tal como lo define el artículo 511-3.

c) Conectores de clavija para los vehículos: Cuando haya conectores de clavija para la conexión directa a los vehículos, el punto de conexión no debe estar en un lugar de Clase I, tal como lo define el artículo 511-3. Si el cordón está suspendido del techo, debe estar colocado de modo que la posición más baja de la punta de la clavija quede como mínimo a 0.15 m por encima del suelo. Cuando exista un dispositivo automático que recoja el cordón y la clavija hasta donde no puedan sufrir daños físicos, no se exige un conector

adicional en el cable o en la salida. Con respecto a las tensiones utilizadas en los ámbitos residencial, comercial e industrial, se tiene que los equipos para sistemas de recarga se deben alimentar desde sistemas de C.A. con tensión nominal de 120 V, 120V/240V, 208Y/120, 240V, 480Y/277, 480V, 600Y/347V o 600 V. Con relación a los equipos y su respectiva certificación o rotulado, se especifica que todos los materiales eléctricos, dispositivos, accesorios y equipos asociados deben estar certificados o rotulados.

Conecotores para VE

Los elementos a través de los cuales los VE son conectados eléctricamente deben contar con ciertas especificaciones básicas, enfocadas en cuatro aspectos:

- Polaridad: Los conectores para vehículos eléctricos deben tener una polaridad y configuración tal, que no sean intercambiables con tomacorrientes de otros sistemas eléctricos del lugar. Asimismo, los conectores certificados para vehículos eléctricos protegidos por un sistema de doble aislamiento o equivalente, que cumpla lo establecido en la Sección 250, no deben ser intercambiables con conectores para vehículo eléctrico del tipo con puesta a tierra.
- Construcción e instalación: Los conectores para vehículos eléctricos deben estar construidos e instalados de modo que se evite el contacto accidental de las personas con partes del equipo de suministro del vehículo que puedan estar energizadas.
- Acople: El acople entre el conector para vehículos eléctricos y el dispositivo de entrada debe tener un medio adecuado que evite su desconexión accidental.
- Polo de puesta a tierra: El conector de suministro para los vehículos eléctricos debe tener un polo de puesta a tierra que debe ser el primer elemento a conectar y el último en desconectarse con el dispositivo de entrada del vehículo.

La norma también tiene un apartado que se refiere a la construcción de equipos que suministren energía eléctrica al vehículo relacionados,

principalmente, con las conexiones y conductores eléctricos empleados, así como con los requerimientos exigidos por el código eléctrico colombiano sobre los dispositivos de control y protección para los sistemas de recarga de vehículos eléctricos.

625-13. Equipo de suministro para vehículos eléctricos: Se permite que este equipo esté sujeto o se pueda conectar mediante cordón y clavija. Además, es importante que el equipo no tenga partes energizadas expuestas.

625-14. Capacidad nominal: Se debe asegurar que el equipo cargador del VE tiene la capacidad nominal suficiente para suplir la batería del vehículo. Esto considerando que la operación para la recarga de un vehículo eléctrico supone una carga continua.

625-15. Rótulos: El cargador para vehículos eléctricos debe llevar un rótulo que indique “Para uso con vehículos eléctricos” (“For Use with Electric Vehicles”).

625-16. Medios de acople: Los medios de acople con el vehículo deben ser de tipo conductivo o inductivo. Las clavijas, conectores de cordón, acoplamientos y dispositivos de entrada deben estar certificados o rotulados para ese uso.

625-17. Cables: Los cables de los equipos de suministro para vehículos eléctricos deben ser de tipo EV, EVJ, EVE, EVJE, EVT o cable flexible de tipo EVJT. La longitud total de este cable no debe superar los 7.6 m. Es posible el uso de otro tipo de cables y conjuntos certificados que prueben ser adecuados para ese fin, incluyendo conjuntos híbridos con cables opcionales de comunicaciones, señales y de fibra óptica.

625-18. Enclavamiento: El dispositivo de recarga para vehículos eléctricos debe estar dotado con un medio de enclavamiento que desenergice el conector para vehículo y su cable del vehículo eléctrico, siempre que el conector se desacople del vehículo.

Excepción: Equipos de suministro portátiles conectados con cordón y clavija a salidas de tomacorriente monofásicas de 125 V y 15 A o 20 A.

625-19. Desenergización automática del cable: Si se produce alguna tensión mecánica que pudiera llevar a la rotura del cable o a la separación del cable del conector, con la consiguiente exposición de partes energizadas,

el instrumento de suministro para vehículos eléctricos o la combinación cable-conector del equipo debe dotarse de un medio automático que desenergice los conductores del cable y el conector del vehículo eléctrico.

Excepción: Equipos de suministro portátiles conectados con cordón y clavija a salidas de toma corriente monofásicas de 125 V y 15 A o 20 A.

Dispositivos de protección para el usuario

Es necesario establecer unos requisitos mínimos del dispositivo, con el fin de salvaguardar la integridad de quienes hacen uso del cargador de baterías. Dichos requisitos son:

625-21. Protección contra sobrecorriente: El sistema de protección contra sobrecorrientes de los alimentadores y circuitos ramales de los equipos de suministro para VE debe ser para uso continuo y tener una capacidad nominal no menor al 125 % de la carga máxima. Cuando haya conectadas al mismo alimentador o secundario cargas no continuas, la capacidad nominal del dispositivo de protección contra sobrecorrientes no debe ser menor a la suma de todas las cargas no continuas más el 125 % de las continuas.

625-22. Protección de las personas contra falla a tierra: El equipo de suministro para los vehículos eléctricos debe tener un sistema certificado que proteja a las personas contra descargas eléctricas. Cuando la corriente a tierra supere cierto valor preestablecido, que debe ser menor a la corriente necesaria para que se active el dispositivo de protección de sobre corriente del circuito de suministro, el sistema debe desenergizar el equipo de suministro dentro de un período previamente establecido. Si se utiliza un equipo de carga de vehículos eléctricos conectado con cordón y clavija, el interruptor de circuito por falla a tierra para protección de las personas debe formar parte integral de la clavija, o estar ubicado en el cable de alimentación y a una distancia no mayor de 30 cm de la clavija.

625-23. Medios de desconexión: la alimentación para vehículos eléctricos de más de 60 A o más de 150 V a tierra nominales, debe tener un medio de desconexión instalado en un lugar fácilmente accesible y que se pueda bloquear en posición de abierto.

625-24. Puesta a tierra: todos los equipos e instalaciones eléctricas deben estar conectados equipotencialmente y puestos a tierra.

625-25. Pérdida de la fuente primaria: se debe instalar un medio que evite que, cuando haya pérdida de tensión desde la red pública de energía u otro sistema o sistemas eléctricos, la energía eléctrica no pueda volver desde el equipo del vehículo hasta el sistema de alambrado de la propiedad. No se permite utilizar un vehículo eléctrico como fuente para suministro de reserva.

Los requisitos mencionados son de fácil cumplimiento en el país. Es decir, la verificación de estos requisitos no requiere ser probada en otros países, puede ser revisadas a nivel nacional, facilitando la respectiva homologación a la que deban ser sometidos los VE.

Estándar internacional para vehículos eléctricos

A continuación, se relacionan algunas normas internacionales que podrían tener cabida en el contexto colombiano, y deberían ser tenidas en consideración al momento de implementar sistemas de recarga de vehículos eléctricos.

Estas normas son de origen estadounidense —el sistema eléctrico colombiano es muy similar al norteamericano, por lo cual se le ha dado prioridad a esta normativa, ya que es más fácil adaptarla— y fueron diseñadas con el fin de asegurar un adecuado funcionamiento del sistema eléctrico de potencia, vigilar el desempeño de los componentes del vehículo y garantizar la seguridad de las personas.

Los sistemas de recarga toman como referencia los tres niveles de carga definidos por el Electric Power Research Institute (EPRI), codificados en el National Electric Code (NEC). Se clasifican así:

Nivel 1: sistemas de carga lenta. Tensión estándar de 120 VAC. Comúnmente, se encuentran disponibles para uso residencial o comercial, debido a que este nivel de tensión provee potencias bajas (máxima de 1.44 kW). Los tiempos de carga son prolongados.

Nivel 2: sistemas de carga semirrápida. Este nivel utiliza una tensión de 240 VAC monofásico y requiere un equipo especial que garantiza un grado de seguridad alto. Por su facilidad se usa, principalmente, en el sector privado y público.

Nivel 3: sistemas de carga rápida. Se usan en aplicaciones comerciales y públicas, y son semejantes a una estación comercial de gasolina. Este tipo de sistemas de carga utiliza un nivel de tensión de 480 VAC trifásicos. En la práctica, se pueden encontrar cargadores que están en un rango de entre 60 kW y 150 kW.

Por otra parte, se presenta la norma SAE J 1172 de octubre de 2009, la cual es un estándar norteamericano que hace referencia a los conectores eléctricos para vehículos eléctricos. Su principal finalidad es precisar un conductor estándar de carga para vehículos eléctricos que incluya las características físicas y eléctricas del conector; los requisitos de funcionamiento, requisitos dimensionales de la entrada del vehículo y el conector de acoplamiento.

Esta norma se basa en un conector diseñado por Yazaki, el cual soporta una potencia de hasta 16.8 kW, inyectados mediante corriente monofásica (120-240 VAC y 70 A). El conector tiene forma redonda, con un diámetro de 43 mm, posee 5 pines y contempla un canal de comunicaciones a través de la línea eléctrica para de esta forma identificar al vehículo y controlar su proceso de carga. Este conector está diseñado y es permitido por la norma para ser utilizado en lugares públicos como estaciones de recarga, residencialmente o en los centros de oficinas.

Cumple con las siguientes características:

- Nivel 1: 120 VAC, 1 fase, hasta 16 A
- Nivel 2: 240 VAC, 1 fase, hasta 80 A

Además del estándar norteamericano se presentan algunos estándares europeos para los diferentes modos de carga del vehículo eléctrico que pueden ser tenidos en cuenta, mostrando el nivel de tensión, corriente y potencia utilizada para la respectiva recarga.

Los siguientes modos de carga se basan en la norma International Electrotechnical Commission (IEC) “Electric Vehicle Conductive Charging System - Part 1: General Requirements, 2010. IEC 61851-1”.

Clasificación

- Modo 1 de carga AC. Se realiza carga lenta utilizando un tomacorriente común. El VE se conecta a la red eléctrica a través del tomacorriente en

baja tensión. La capacidad del tomacorriente es de 16 A (3.7 - 11 kW) a una tensión inferior de 250 V monofásica o 480 V trifásica.

- Modo 2 de carga AC. Carga lenta utilizando un conector normal, con un equipo específico de protección. El vehículo se conecta a la red eléctrica en baja tensión a través de un conector estándar mediante un cable especial. La corriente máxima que permite este modo es de 32 A a tensión de 250 V monofásica o 480 V trifásica.
- Modo 3 de carga AC. Carga lenta o rápida usando un conector específico multipines con funciones de control y protección. Este modo de recarga es el más evolucionado. El vehículo se conecta a la red de baja tensión (AC) con un conector y un tomacorriente específico hasta 70A/250V monofásico y 63A/480V trifásico a través de un circuito de uso exclusivo.
- Modo 4 de carga DC. Carga rápida usando una tecnología de carga especial. El vehículo se conecta a la red de baja tensión a través de un cargador externo que realiza la conversión AC/DC en la instalación fija. Las funciones de control y protección, así como el punto de recarga, están instalados del lado de la infraestructura fija. La corriente máxima que se puede alcanzar con este modo de carga es de 400 A (lo que genera rangos de potencia de 50 kW - 150 kW).

Para el caso europeo, los conectores para VE se encuentran regulados por IEC62196 y modificados por IEC 62196-2 e IEC 62196-3. En el mercado se encuentra una gran variedad de estos conectores, adoptados o incluso desarrollados por los mismos fabricantes de VE. No obstante, el conector Schuko tiene amplia aceptación para el caso de motocicletas eléctricas [12]. La tabla 1 muestra algunos ejemplos de los conectores usados.

Tabla 1. Conectores comunes usados según el modo

Modo	Diagrama	Pines	Tensión máxima	Corriente máxima	Norma	Imagen
1		2 L1, L2/N	250 Vac mono	16 A mono	CEE 7/4 tipo F (schuko)	
2		5 L1, L2/ PE, CP, CS	250 Vac mono	32 A mono	IEC 62196-2	
3		7 L1, L2, L3; N, PE, CP, PP	250 Vac mono 500 Vac trifásico	32 A mono 63 A trifásico	IEC 62196-2	
3		4.5 o 7. L1, L2, L3; N, PE, CP, PP	250 Vac mono 500 Vac trifásico	16/32 A mono 32 A trifásico	IEC 62196-2	
4		9 2 pot 7 señal	500 Vdc	120 Adc	IEC 62196-1 UL2551	
CCS		2 pot 5 señal	500 Vdc	200 Adc	IEC 62196-3	
CCS		2 pot 7 señal	500 Vdc	200 Adc	IEC 62196-3	

Fuente: [12].

La tabla 2 muestra un resumen de las normas estipuladas anteriormente y los temas a los que se refieren, especialmente con equipos y especificaciones técnicas para la carga de los vehículos eléctricos.

Tabla 2. Resumen de las principales normas usadas

Norma	Temas
NTC 2050, 511-8	Equipos para carga de baterías
NTC 2050, 511-9	Ubicación de conectores y conectores de clavija
NTC 2050, 625	Niveles de tensión, conectores, equipos de suministro, rótulos, conductores, desenergización y dispositivos de protección y control
EPRI y NEC	Sistema de carga (lenta, semirrápida y rápida)
SAE J 1172	Conectores eléctricos
IEC 61851-1	Modos de carga (AC y DC)

Fuente: elaboración propia.

Funciones operacionales

Mientras el cargador se encuentre operando, podrá incorporar las siguientes funciones:

- Capacidad de registro superior a diez sucesos que incluya fecha, hora, minuto, segundo, evento sucedido y valor de las magnitudes de entrada y salida en aquel instante.
- Comunicabilidad para modificación de los ajustes, transmisión de eventos y registros de forma local y a distancia. La interfase física de comunicaciones dispondrá de aislamiento galvánico y permitirá la conexión *multidrop*. El protocolo de comunicación y formato serán los que se definan para los sistemas integrados de control y protección.

Alarmas

Alarmas locales: Para facilitar la supervisión del conjunto cargador-batería se dispondrá en la puerta del armario de un panel de control formado por un *display*, pilotos y pulsadores que permitan, como mínimo, realizar las siguientes funciones:

- Indicación de presencia de red (visual y contacto seco)
- Indicación de carga de flotación
- Indicación de carga rápida (visual y contacto seco)
- Indicación de anormalidad en el cargador
- Lectura de la tensión del cargador y de la batería
- Lectura de la corriente de salida del cargador
- Lectura de la corriente de consumo
- Estado de carga de la batería en % de la capacidad nominal
- Cambio manual del programa de carga
- Polo a tierra

Supervisión remota: Para permitir telesupervisión el equipo dispondrá de tres alarmas externas mediante contactos libres de potencial, conectadas a la regleta de bornes de salida que indicarán, de forma segregada:

- Ausencia de tensión de red
- Anormalidad en el cargador (autovigilancia)
- Fusión de uno de los fusibles de salida

Especificaciones técnicas estándar IEEE del cargador DC rápido para uso con vehículos eléctricos

En los vehículos eléctricos el cargador puede estar situado a bordo (*On-board*) o fuera de bord (*Off-board*). Cuando el cargador está a bordo del vehículo, este es desarrollado para determinar el tipo y tamaño de la batería utilizada en el vehículo. La tensión AC puede ser conectada a la entrada de alimentación del cargador *On-board*. Sin embargo, puede ser difícil cargar baterías grandes rápidamente usando la tensión alterna residencial actual. Si el cargador es *Off-board*, requiere comunicación con el sistema de control de la batería. Este protocolo de comunicación puede ser diferente según el modelo de vehículo, entonces los cargadores pueden ser diseñados para soportar

múltiples tecnologías. La principal ventaja de estos o de DC es que entregan mayor energía al vehículo, lo que reduce el tiempo de carga [26].

Requisitos

Estos son los principales requisitos que debe cumplir un cargador DC de baterías para vehículos eléctricos:

a) Generales

1. El dispositivo debe ser capaz de indicar al usuario el estado del proceso de carga para tomar las acciones correctivas si es necesario.
2. El cargador y el vehículo deben estar equipados con una manera de confirmar que están física y eléctricamente conectados entre ellos durante el proceso de carga.
3. El cargador debe estar equipado con una manera para detener el proceso de carga en el de caso que se interrumpa la comunicación entre el vehículo y el cargador (esto se haría a través de la interfase de comunicación).
4. Cuando el conductor de protección entre el cargador y el vehículo es desconectado, el cargador debe parar el proceso de carga en 10 segundos.
5. El cargador debe ser capaz de detectar pérdidas de aislamiento, cortocircuito y fallas en las conexiones a tierra.
6. El cargador tiene que estar equipado con una función de protección contra sobretensiones.
7. El sistema debe ser diseñado de tal manera que un nivel de tensión dañino para el cuerpo humano no pueda ser aplicado en el conector del cargador cuando el conector no esté conectado al vehículo.
8. El sistema debe ser diseñado para evitar que los usuarios toquen partes energizadas directamente en el vehículo y el cargador. El cargador debe estar equipado con una manera de detección de fugas de corriente a tierra y desconexión automática para ayudar a prevenir descargas eléctricas.

9. El cargador o el conector del cargador debe estar equipado con medidas para reducir el riesgo de contacto con partes energizadas expuestas, como una medida contra la carga eléctrica remanente en el conector del cargador.
10. El cargador debe estar equipado con un modo de protección contra sobrecargas y cortocircuitos en el lado AC o en circuitos internos del cargador.
11. El sistema cargador debe ser diseñado de tal manera que el nivel de tensión entre cualquier parte conductora accesible, incluidos el cable y el conector de carga y cualquier conexión a tierra, disminuya a una tasa de 60 V en 1 segundo o menos, después de que el conector es removido del cargador o el vehículo.

b) Comunicaciones

Debe utilizarse una interfase de comunicación de datos para transmitir parámetros requeridos para el control del proceso de carga. El cargador y el vehículo deben intercambiar estos parámetros a través de esta interfase.

c) Funcionamiento del cargador en exteriores e interiores

El cargador debe ser diseñado para soportar las siguientes condiciones ambientales:

1. La carcasa del cargador debe tener una clasificación IP33 o mayor.
2. Temperatura ambiente (exterior): -25°C a 40°C .
3. Temperatura ambiente (interior): -5°C a 40°C .
4. Humedad ambiente: 5 % a 95 %.
5. Altitud: El cargador deberá trabajar entre las presiones atmosféricas de 860 hPa a 1060 hPa.

Recomendaciones y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos

Debido al gran número de cargas no lineales que tienen presencia en la red eléctrica domiciliaria e industrial y a su elevada tasa de crecimiento, se introducen armónicos en la red eléctrica que afectan de forma negativa el buen funcionamiento de los demás dispositivos que se encuentran conectados al sistema eléctrico. Esto es un problema generalmente tratado mediante interfases entre los dispositivos y la red que corrigen este problema haciendo que la forma de onda en la corriente sea lo más similar posible a una sinusoidal. Sin embargo, estas formas de onda no llegan a ser sinusoidales perfectas, obteniéndose un contenido armónico en la señal. Este capítulo presenta cuál debe ser el máximo contenido de armónico según el tipo de carga, de acuerdo con las recomendaciones hechas por el “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems” en su versión más reciente aprobada el 27 de marzo de 2014 [27], a fin de poder establecer las características mínimas de calidad de energía que debe poseer el cargador de baterías.

Introducción

Las cargas no lineales que se mencionaban son ampliamente compuestas por convertidores AC-DC (rectificadores). Sin embargo, también se encuentran los cicloconvertidores, controladores de fase y convertidores DC-AC, que son inversores usados para la generación distribuida y los cuales cambian la naturaleza sinusoidal de la corriente en la red eléctrica, lo que podría

generar cambios en la forma de onda de la tensión, produciendo variaciones en los procesos de rectificación de los demás equipos conectados a la red, como los equipos de comunicaciones, los cuales suelen ser especialmente sensibles a alteraciones en su alimentación.

Una solución simple a dicho problema puede ser compensar de forma estática la potencia reactiva mediante la corrección del factor de potencia a través del uso de condensadores. Sin embargo, esta solución no es la más adecuada, dado el comportamiento dinámico de las cargas que cambian las condiciones de operación en cada instante. Además, con la presencia de contenido armónico en la red de diferentes frecuencias, es posible que una de estas frecuencias excite el sistema y genere resonancia, lo que incrementaría aún más la distorsión armónica de la red.

Los correctores de factor de potencia (PFC, por sus siglas en inglés) son dispositivos convertidores de potencia que ajustan la fase entre la corriente y la tensión de tal manera que esta se aproxime a cero. Algunos de estos dispositivos también se encargan de mantener la forma de onda de la corriente lo más sinusoidal posible y de esta manera disminuir también la distorsión armónica.

A continuación se presenta un resumen de recomendaciones sugeridas por el IEEE para el contenido armónico en corriente generado por equipos eléctricos conectados a la red, según el tipo de carga, en condiciones de operación en estado estable; es decir, se establecen los rangos máximos de distorsión armónica total (*Total Harmonic Distortion*) que puede presentar una carga de forma permanente, por lo que se excluyen los valores que podrían presentarse para el THD en condiciones transitorias.

Conceptos previos

Armónico: Componente distinto de 1 en la serie de Fourier para una señal periódica y de orden entero.

Interarmónico: Componente de frecuencia de una señal periódica distinto de 1, pero de orden no entero, es decir, la frecuencia a la que pertenece este componente no es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de operación.

Notch: Perturbación de conmutación en la forma de onda de tensión de no más de 0.5 veces el ciclo de alternancia.

Distorsión armónica total (THD): Característica que ofrece información sobre la cantidad de energía de la onda perteneciente a los armónicos respecto a la total, definida matemáticamente como la raíz cuadrada de la razón entre la sumatoria de los cuadrados de las componentes armónicas sobre el cuadrado de la fundamental.

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{15} f_i^2}{f_1^2}} \quad (1)$$

Medición de armónicos

En esta sección se presentan las condiciones técnicas que deben reunir los instrumentos de medición para la distorsión armónica, según lo dicta la norma IEC 61000-4-7 [28] e IEC 61000-4-30 [29].

Ancho de la ventana de medición

Todos los instrumentos digitales de medida que usen la transformada discreta de Fourier para cumplir con su tarea deben tener un ancho de ventana de 12 ciclos, lo que corresponde a 200 ms para sistemas a 60 Hz o 10 ciclos para sistemas a 50 Hz, permitiendo obtener componentes espectrales cada 5 Hz. Este documento, al igual que el estándar guía, toma como magnitud del componente armónico el valor eficaz RMS (*Root Mean Square*) del armónico central y los dos adyacentes.

Medición de armónicos de muy corta duración

Son considerados como armónicos de muy corta duración aquellos que no se prolongan más de 3 segundos, lo que corresponde a 10 y 12 ciclos para sistemas de operación a 50 Hz y 60 Hz, respectivamente. Componentes de frecuencia individual son agrupados mediante el uso de la ecuación 2, donde F representa la señal en análisis y se usa el subíndice “vs” para indicar que son armónicos de corta duración.

$$F_{n,vs} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} F_{n,i}^2} \quad (2)$$

Medición de armónicos de corta duración

Los armónicos de corta duración son evaluados en un intervalo de 10 minutos mediante la agrupación de 200 componentes de muy corta duración consecutivos. La ecuación 3 usada para este cálculo utiliza el subíndice “sh” para indicar que es de corta duración.

$$F_{n,sh} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} F_{(n,vs),i}^2} \quad (3)$$

Medición de armónicos estáticos

Para la medición de este tipo de armónicos se deben agrupar los armónicos de corta y muy corta duración en periodos de una semana y un día respectivamente. Para medición de armónicos de muy corta duración, el noventa y nueveavo valor de percentil (es decir, el valor que es excedido por el 1% del periodo de medición) debería ser calculado cada 24 horas para la comparación con los límites de la cláusula 5. Para la medición de armónicos de corta duración, el 95th y 99th valor percentil (es decir, los valores que exceden por 5% y 1% del periodo de medida) deberían ser calculados a través de un periodo de 7 días para su posterior comparación con los límites recomendados en la cláusula 5 de la norma citada IEC 61000-4-7.

Límites de armónicos recomendados

Las recomendaciones que se hacen a continuación se aplican tanto para señales de tensión como de corriente, dado que la calidad de potencia es un asunto que involucra tanto al consumidor como a los operadores. Los límites de armónicos que se establecen en los párrafos siguientes aplican solamente a los puntos de acople común (PCC).

Distorsión de corriente para sistemas de 120 V a 69 kV

Este tipo de usuarios deben limitar su producción de armónicos así:

- Armónicos de muy corta duración deberían ser menores al doble del valor dado en la tabla 3 (diariamente).

- Armónicos de corta duración deberían ser menores a 1.5 veces el valor dado en la tabla 3 (semanalmente).
- Armónicos de corta duración (10 min) deberían ser menores a los valores presentados en la tabla 3.

Todos los valores deben ser términos porcentuales de la máxima corriente demandada. Este valor de corriente se establece en el PCC y es tomado como la suma de corrientes demandadas, donde I_{sc} : máxima corriente de corto circuito en el PCC e IL : máxima corriente de carga demandada (componente fundamental) en el PCC.

Tabla 3. Valor relativo permitido para los armónicos en corriente [27]

I_{sc}/IL	$3 \leq n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n < 50$	THD
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20<50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50<100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100<1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7.0	6	2.5	1.4	20

Selección de la topología del convertidor para el cargador de baterías

Este capítulo muestra las diferentes topologías de conversión que mejor se adaptan a los requisitos del cargador de baterías para vehículos eléctricos. Cada una presenta su esquema circuital a partir del cual se analizan diferentes características relevantes: niveles de regulación, eficiencia, número de elementos, niveles de distorsión armónica total y factor de potencia. Estos dos últimos aspectos son evaluados a partir de los resultados experimentales reportados en la literatura y sobre los que se hace especial énfasis debido a la importancia que tienen sobre la calidad de energía.

Introducción

La sección más importante del desarrollo del prototipo del cargador de baterías es el convertidor AC-DC. Este dispositivo es el encargado de tomar la energía proveniente de la red eléctrica domiciliaria y administrarla de forma eficiente hacia la batería. Durante este proceso, el convertidor AC-DC debe transformar la energía eléctrica AC de la red en una de tipo constante (DC), donde dicha transferencia de energía se debe hacer con la mayor eficiencia posible, eligiendo la topología de conversión que presente un rendimiento adecuado de acuerdo con las exigencias demandadas de calidad de energía planteadas (FP y THDi).

Análisis preliminar

En la presente sección se estudian y seleccionan distintas topologías de conversión AC-DC considerando aquellas que mejor se ajustan a la función de

operar como cargador de baterías y descartando las demás a través de las siguientes particularidades:

- Teniendo en cuenta los niveles de tensión pico de la red (α 170 VPICO) y el entregado a las baterías (α 240 VDC), es necesario que la topología tenga la capacidad de elevar dicha tensión.
- Debido a que una de las principales bondades con las que debe contar el prototipo es la eficiencia, se seleccionaron topologías con el menor número de elementos posible.
- Al estar conectado a la red eléctrica domiciliaria, el convertidor debe ser monofásico.
- Se prefieren los PFC (Power Factor Correction) activos en lugar de los pasivos, ya que estos últimos no pueden ser controlados, lo que los convierte en elementos estáticos que no responden a cambios en su entorno y en términos generales ofrecen menos prestaciones que los primeros.
- Se realizó una búsqueda en bases de datos especializadas eligiendo las topologías especialmente adaptadas como PFC, según estudios previos de desempeño.

Una vez hecha esta preselección, la atención del estudio es centrada en un pequeño grupo de convertidores tipo PFC, los cuales son analizados en más detalle destacando las siguientes características a partir de las cuales serán evaluadas y seleccionadas.

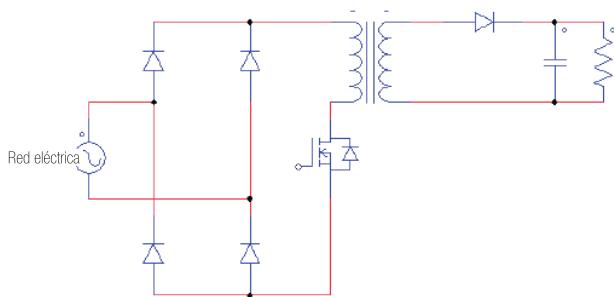
- Eficiencia
- Simplicidad
- Facilidad de control
- Protección
- Costos
- Niveles de regulación (elevar o reducir)
- Resultados previos como PFC

A continuación se evalúan las características de diferentes topologías tomando como base el estudio hecho en [30], no sin antes aclarar que se encuentran en su versión básica, esto con el fin de mostrar un panorama general al lector, y ofrecerle argumentos que le ayuden a elegir la topología de conversión, quedando abierta la posibilidad para que el lector profundice en las múltiples variaciones que posee cada una.

Flyback AC-DC

Esta topología incluye un puente rectificador en su entrada seguido de un transformador de alta frecuencia en serie con un interruptor. En el secundario del transformador es conectado un circuito serie entre un diodo de respuesta rápida y un paralelo entre la carga y el condensador (figura 11). Este circuito tiene comportamiento tipo *Buck-Boost*.

Figura 11. Topología de Flyback AC-DC



Fuente: [30].

Ventajas:

- Tiene un solo elemento de conmutación, lo que lo hace más fácil de implementar y reduce las pérdidas de conmutación.
- Posee un solo condensador.
- La bobina está incluida en la inductancia del transformador.
- Usa aislamiento galvánico.
- Tiene la capacidad de elevar y reducir.

- Tiene un diodo que impide la corriente inversa —es una de las recomendaciones dadas en el estándar (ver capítulo Normatividad en cargadores de vehículos eléctricos)—.

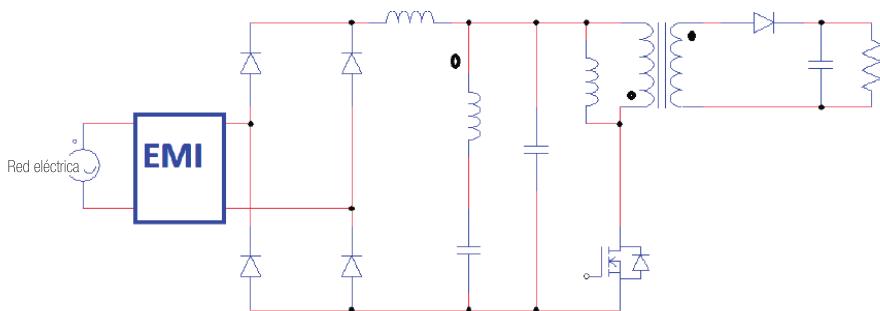
Desventajas:

- Incluye un puente rectificador de diodos, lo que podría tener problemas en los cruces por cero dependiendo de las tensiones de activación de los diodos y ciertas pérdidas de conducción.
- Tiene un proceso de rectificación completo, lo que implica varios diodos, comprometiendo la eficiencia.

Convertidor con cuasicorrector factor de potencia (QAPFC)

Esta topología es muy similar al *flyback*, pero presenta un mejoramiento en cuanto a su característica PFC al incorporar una bobina extra antes del transformador de alta frecuencia. También es acompañado, generalmente, de un filtro EMI [31]. La salida de este convertidor también es de tipo *Buck-Boost* (figura 12).

Figura 12. Esquema circuital del QAPFC



Fuente: [31].

Ventajas:

Los estudios encontrados muestran mejores resultados (respecto a *flyback*) en cuanto a la corrección del factor de potencia y distorsión armónica. Presenta las mismas ventajas que la topología *flyback*.

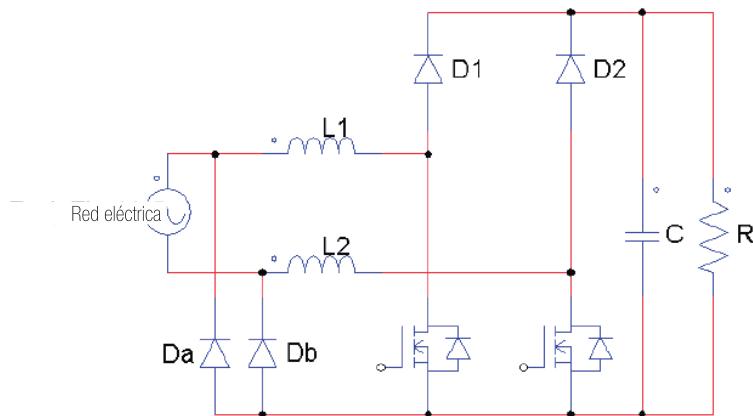
Desventajas:

Es una variación del *flyback* y tiene un mayor número de elementos pasivos, lo que podría aumentar las pérdidas de conducción en el convertidor y aumentar la dificultad en el modelamiento y control del dispositivo. Adicionalmente, este mayor número de elementos incrementa los costos de implementación. Hereda las desventajas de la topología anterior.

Convertidor *semibridgeless* de corrimiento de fase

Esta topología es una derivación del PFC *Bridgeless*, en donde se incluyen dos diodos extra —Da y Db—. Esto representa mayores pérdidas de conducción, pero es de recalcar que no siempre la corriente retorna por estos diodos extra, lo que mantiene estas pérdidas bajas [32] (ver figura 13).

Figura 13. Convertidores *semibridgeless* de corrimiento de fase



Fuente: [32].

Ventajas:

- Está compuesto de una única etapa.
- Pocos elementos respecto a otras topologías.
- Al dividir el inductor en dos respecto a su antecesora, se reporta un mejoramiento en su rendimiento de PFC.

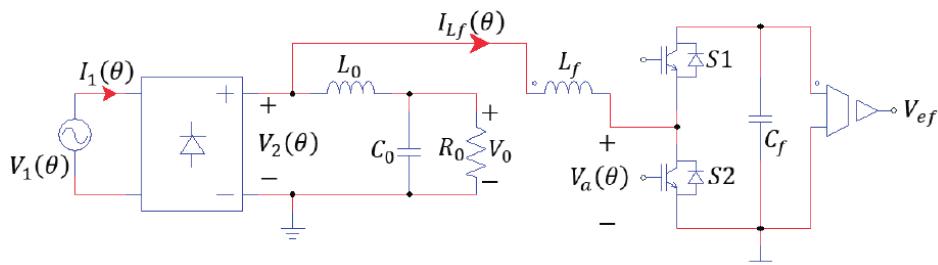
Desventajas:

- Posee dos diodos adicionales en su configuración respecto a la topología *bridgeless*, cada uno operando en uno de los ciclos de la red, generando así pérdidas de conducción.
- Se debe tener especial cuidado en la construcción del convertidor, pues al poseer dos inductores que operan en frecuencias del orden de decenas de kHz y al estar estos topológicamente cercanos, se pueden dar fenómenos de autoinducción que en principio serían indeseados y podrían conllevar comportamientos anómalos del convertidor.

Convertidor con filtro activo de dos cuadrantes en paralelo

Es un filtro activo de potencia de dos cuadrantes basado en un convertidor bidireccional DC-DC conectado a la salida del puente rectificador [33]. En este artículo se reporta una eficiencia (experimental) de 95 %, mientras es conmutado a una frecuencia igual a 100 kHz (figura 14).

Figura 14. Convertidor con filtro activo de dos cuadrantes



Fuente: [33].

Ventajas:

- Mejores prestaciones en distorsión armónica debido a su filtro activo.

Desventajas:

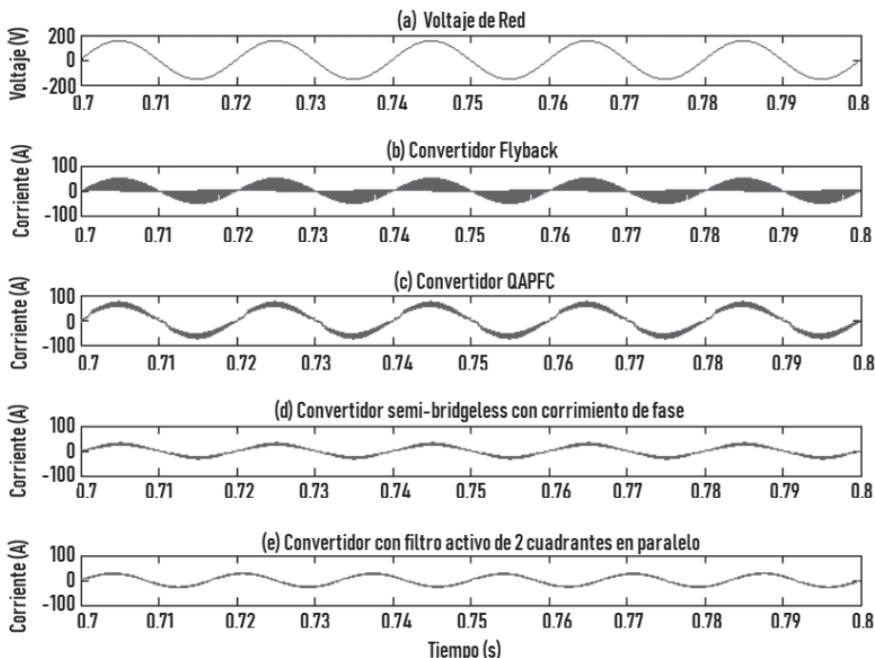
- La conexión con un filtro activo aumenta el número de elementos pero mejora el rendimiento.
- Tiene un considerable número de sensores.

- Un mayor número de variables del sistema, dificultando el modelamiento y monitoreo.
- Teniendo en cuenta que estos sistemas de conversión generan entornos muy ruidosos eléctricamente, puede causar dificultades al entrar en resonancia los filtros, lo que podría traducirse en inestabilidad.

Estudio comparativo

Esta sección presenta los resultados obtenidos en [30] para las simulaciones desarrolladas en MATLAB. Los elementos relevantes de este estudio se destacan en la figura 15, donde se presenta la tensión AC suministrada y las formas de onda de corriente de entrada de cada convertidor. Se infiere que los peores resultados de regulación en relación con la forma de onda de corriente son presentados por el *flyback*, siendo mejor los exhibidos por el PFC *Bridgeless* de corrimiento de fase y el convertidor con filtro activo de dos cuadrantes.

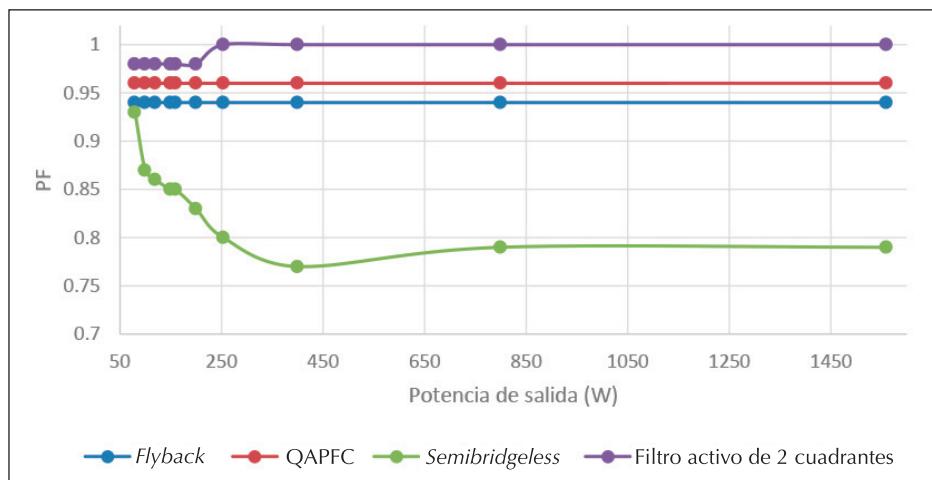
Figura 15. Formas de onda de (a) tensión de suministro; corrientes de entrada de (b) *flyback*, (c) QAPFC, (d) *semibridgeless* con corrimiento de fase, (e) con filtro activo de dos cuadrantes



Fuente: [30].

El resultado de simulación reportado por el citado estudio evalúa la fase relativa entre la forma de onda de la corriente y la tensión de entrada del PFC a través del factor de potencia (PF), mientras se hace un barrido en la potencia de salida del dispositivo. De la figura 16 se destaca el buen PF de todos los convertidores a lo largo del rango de potencias presentadas, a excepción del PFC de corrimiento de fase, el cual, para potencias superiores a 200 W, está por debajo de 0.8.

Figura 16. Factor de potencia de las topologías PFC en estudio vs. potencia de salida

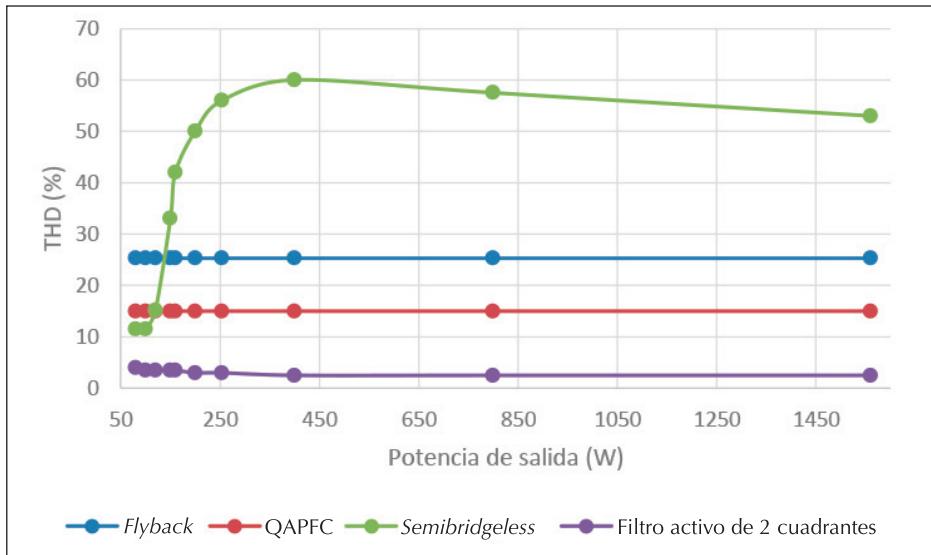


Fuente: [30].

Máximos valores de PF: 0.93, 0.95, 0.92 y 0.99 para el *flyback*, QAPFC, *semibridgeless* PFC y convertidor de filtro activo de dos cuadrantes, respectivamente.

En términos simples, la variable de relevancia para evaluación de desempeño del PFC — distorsión armónica total en corriente o THD— cuantifica la calidad sinusoidal de la corriente entre valores de 0 % a 100 %, siendo 0 % la característica de una forma sinusoidal perfecta. La figura 17 muestra el THD de acuerdo con la potencia desarrollada por cada convertidor.

Figura 17. Distorsión armónica total de las diferentes topologías en estudio vs. potencia de salida



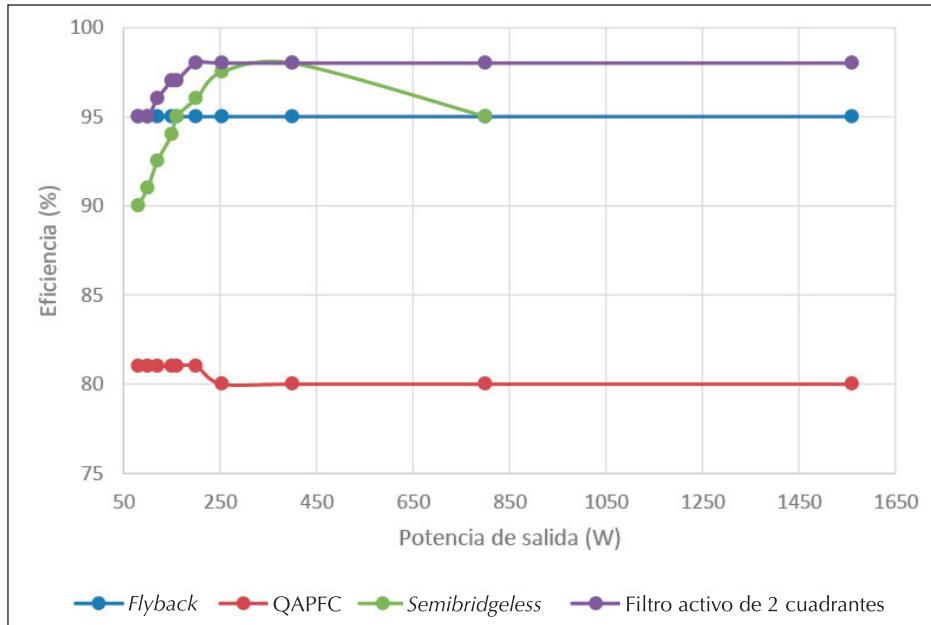
Fuente: [30].

Valores mínimos de THD:

- Flyback: 25.1 %
- QAPC: 14.4 %
- Semibridgeless con corrimiento de fase: 11.28 %
- Filtro activo de dos cuadrantes: 3 %

Como se mencionó, la eficiencia es un factor importante en la evaluación de las topologías. Para esto se muestra la figura 18, que replica la eficiencia de los convertidores a diferentes potencias de operación.

Figura 18. Eficiencia de las diferentes topologías vs. potencia de salida



Fuente: [30].

A manera de conclusión general para los tres resultados expuestos, se puede decir que estos parámetros no tienen mayor variación al cambiar la potencia en el caso del *flyback* y el *QAPFC*. Para el *semibridgeless* PF decrece y THD incrementa al aumentar la potencia.

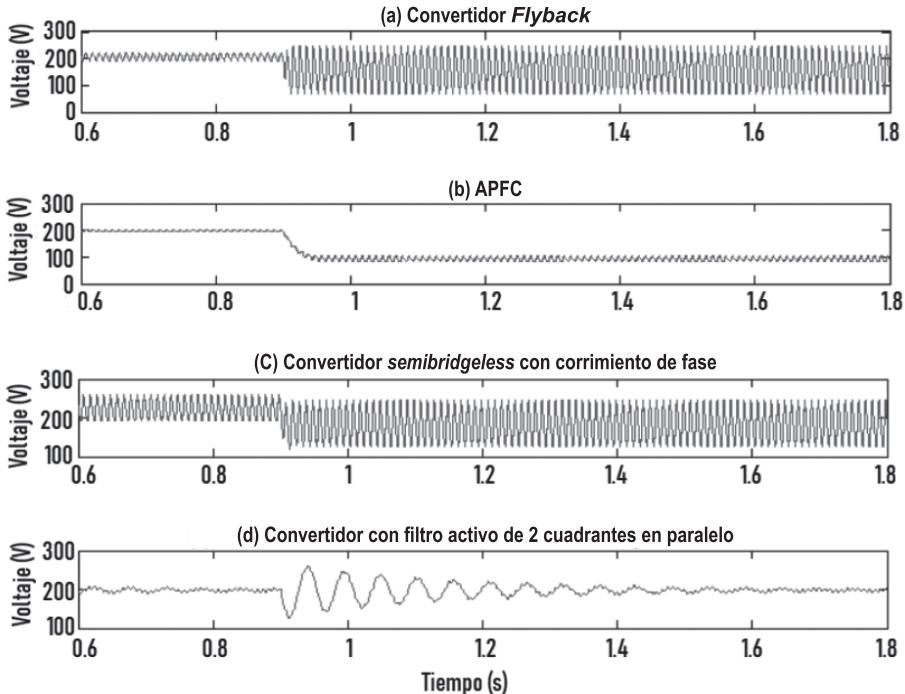
Valores máximos de eficiencia:

- *Flyback*: 95.6 %
- *QAPC*: 81 %
- *Semibridgeless* con corrimiento de fase: 93 %
- Filtro activo de dos cuadrantes: 98 %

Finalmente, se muestran los resultados de la regulación de tensión de salida en la figura 19. Para los propósitos de funcionamiento del cargador, es necesario mantener la tensión de salida en un nivel DC con el menor rizo posible, ya que, debido al bajo valor de la resistencia intrínseca de la batería, se generaría grandes rizos de corriente a la salida, que no solo estresan la

batería, sino que también podrían generar inestabilidades en el convertidor. Es de aclarar que el autor del estudio desarrolló este trabajo manteniendo en lazo abierto todos los convertidores tratados, a excepción del filtro activo de dos cuadrantes y para todos se generaron cambios tipo escalón en la carga.

Figura 19. Tensión de salida de las topologías en estudio



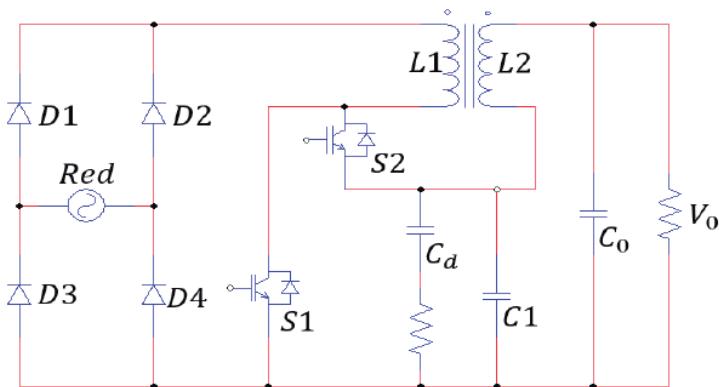
Fuente: [30].

De acuerdo con la figura 19, los mejores resultados de regulación son presentados por el PFC *bridgeless* de corrimiento de fase, pues presenta el menor rizo y el menor tiempo de transición una vez aparece el cambio en la carga. Dado que estos niveles de rizo dependerán especialmente de los valores del condensador de salida, estos resultados no pueden ser un factor determinante para evaluar la regulación en tensión de salida, pero sí pueden ser tomados como una medida de rango de linealidad de cada uno de los sistemas, excepto el filtro activo de dos cuadrantes, pues este opera con un controlador.

Convertidor PFC de fase mínima

Continuando con el estudio topológico de convertidores DC-DC que pueden ser usados como PFC, se presenta la topología en la figura 20, esta propuesta es una variación del PFC *Boost* de puente convencional que incorpora un inductor tanto a la salida como a la entrada, y ambos se encuentran acoplados magnéticamente. Además, se agregan redes pasivas tipo RC para completar el diseño [34].

Figura 20. Topología PFC de fase mínima



Fuente: [34].

Estos elementos extra le permiten tener como principal característica y como su nombre lo indica, ser de fase mínima; es decir, que no presenta ceros en la región derecha del plano complejo en su función de transferencia de tensión de salida respecto al ciclo útil, lo cual permite suministrar las corrientes de *heavy load*, a diferencia de los correctores de factor de potencia tipo *Boost* y sus derivados que podrían incurrir en inestabilidad del sistema.

Ventajas:

- Al ser un sistema de fase mínima, el diseño e implementación de los lazos de control de tensión y corriente son mucho más simples.
- De igual manera, sin este cero de fase no mínima, el convertidor puede operar con *heavy load current* debido a que, para esta condición, el cero de fase no mínima se mueve hacia frecuencias más bajas, haciéndose más

relevante en la dinámica del convertidor, suministrando corrientes superiores a 5 A.

- Debido al acoplamiento magnético de los inductores su tamaño se ve reducido y, en general, reduce el tamaño de los demás elementos.
- Sigue teniendo un inductor en la etapa AC, lo que facilita el control de corriente.
- Mejoramiento de la distorsión de cruce por cero.

Desventajas:

- Es notable el gran número de elementos que posee esta topología, por tal motivo, su modelamiento matemático resulta especialmente complejo.

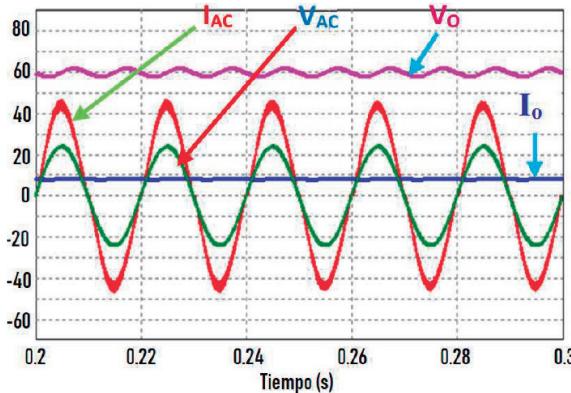
Al incluir varios elementos reactivos en el convertidor, como inductores y condensadores, se presentan múltiples frecuencias de resonancia de estas redes LC, por lo que se debe ser cuidadoso en la elección de los valores de estos elementos para que cumplan su función sin presentar frecuencias de resonancia que estén dentro de las frecuencias de operación del sistema, más aún teniendo en cuenta el ruido eléctrico que siempre está presente en los sistemas electrónicos de potencia como este.

- Como un aspecto práctico de la implementación, resalta el hecho de que el emisor de S2 no esté referido a la tierra del circuito, pues esto hace necesario el uso de un *driver* aislado, que es en general más complejo de construir, o en su defecto más costoso. Así mismo, este *driver* requiere una fuente de disparo adicional.

Resultado experimental

En [34] también se realiza una evaluación de simulación con los siguientes parámetros: tensión de entrada AC con un valor de 24 V pico; se fija la referencia de tensión de salida a 60 V para desarrollar una potencia de 500 W, conmutando a 100 kHz. Esto genera un valor estacionario de ciclo útil de $D = 0.6$. La figura 21 muestra el resultado de simulación, en el que se aprecia una tensión de salida (V_o) de valor promedio 60 V y una corriente de entrada de 43 A pico que desarrolla un factor de potencia de 0.9972.

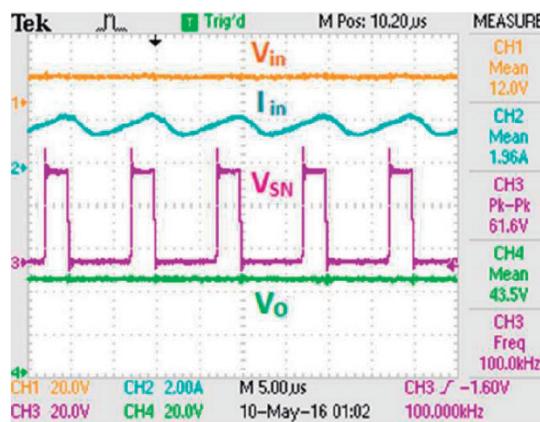
Figura 21. Resultado de simulación del *Boost* de fase no mínima



Fuente: [34].

Para la fase experimental de este desarrollo, el prototipo es escalado para desarrollar una menor potencia. Se prueba el convertidor, con una tensión de entrada DC de 12 V de amplitud, se fija la referencia de la tensión de salida en 48 V, generando una potencia de 25 W. La figura 22 muestra el resultado experimental de la implementación mencionada y algunas de las variables de interés, dentro de las que se encuentra la corriente en el inductor, teniendo un valor medio de 1.96 A y cuyo rizo está alrededor del 25 %. En cuanto a la tensión de salida se tiene un valor de 43.5 V con un rizo casi despreciable, pues su valor es de 3 %.

Figura 22. Resultado experimental a escala



Fuente: [34].

Ventajas:

- Presenta características similares al PFC *bridgeless* expuesto anteriormente. Sin embargo, agrega algunos elementos que hacen que no tenga ceros con parte real positiva, convirtiéndolo en un sistema de fase mínima. Aunque las respuestas indeseadas de los sistemas de fase no mínima pueden ser mejoradas por un controlador bien diseñado, esto puede suponer una facilidad en el desarrollo de los sistemas de control.

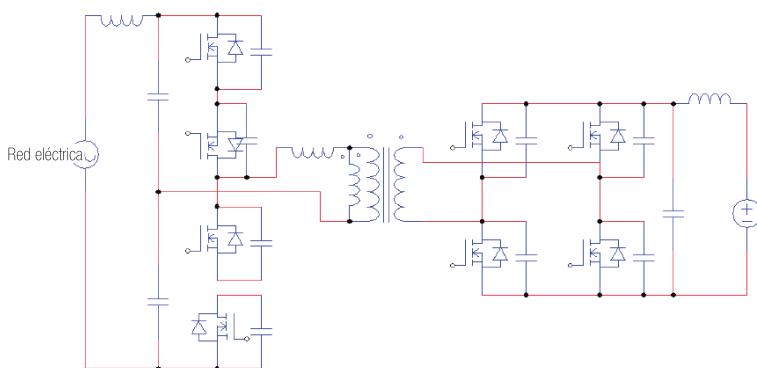
Desventajas:

- Posee un mayor número de elementos, lo que implica más variables y pérdidas.
- La constante de acoplamiento no es una variable de fácil manipulación y mediarla a alta frecuencia resulta también complejo, lo que dificulta el modelamiento del sistema usado para la posterior construcción del controlador.

Dual Active Bridge (DAB)

En los diferentes motores de búsqueda resulta recurrente el uso del DAB, cuyo esquema se muestra en la figura 23. La razón de tal recurrencia para diversas aplicaciones es su versatilidad y relativamente bajo número de elementos, aclarando que el esquema mostrado en la figura 23 es una versión mejorada presentada en [35].

Figura 23. Topología de conversión del DAB

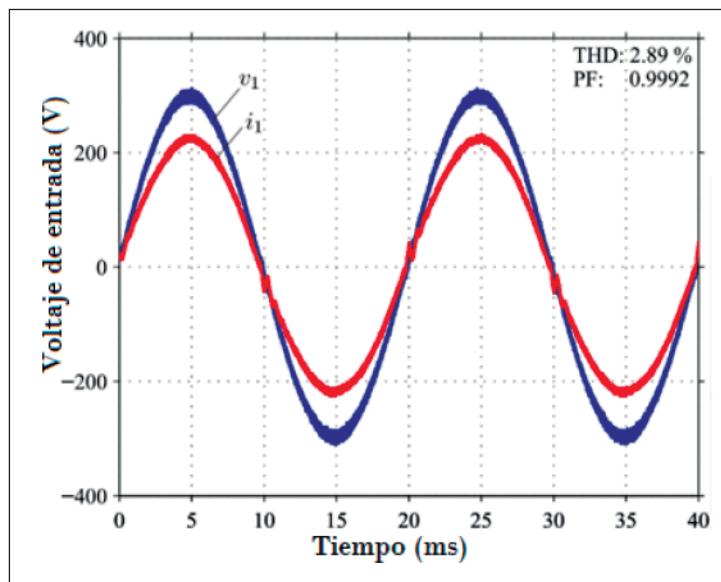


Fuente: [35].

Resultados experimentales

Para validar las características incorporadas, en [35] se construye un prototípo con tensión de entrada de $230 \text{ V}_{\text{RMS}}$ y tensión de salida de 350 V. Dentro de los resultados experimentales más relevantes se destaca la forma de onda de la corriente de entrada, la cual se presenta en la figura 24, donde resalta una forma de onda para la corriente muy similar a una seno y con fase cero respecto a la tensión de línea, lo que se puede cuantificar con un valor de THD igual a 2.89 % y un factor de potencia de 0.9992.

Figura 24. Resultado experimental: Tensión de salida
350 V, tensión de entrada de $230 \text{ V}_{\text{RMS}}$

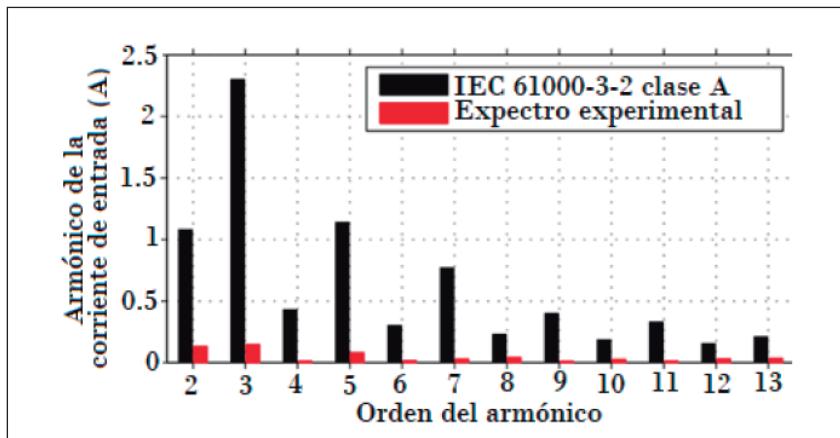


Fuente: [35].

Por otro lado, en el artículo citado también se obtiene la composición espectral de la corriente de línea y luego se compara con la que establece el estándar IEC 61000-3-2 clase A, que es como corresponde de acuerdo con el

nivel de potencia que entrega el convertidor. Dicha comparación se muestra en la figura 25.

Figura 25. Comparación del espectro de la forma de onda de la corriente con el sugerido por el estándar



Fuente: [35].

En la figura 25 se ve claramente que el dispositivo posee armónicos de amplitud muy inferiores a lo recomendado por el estándar, lo que lo califica como un elemento de muy buena calidad de energía.

Ventajas:

- Esta topología presenta alta densidad de potencia, es decir que puede desarrollar grandes potencias, siendo su tamaño muy reducido.
- Ofrece aislamiento galvánico entre la carga y la entrada, lo que incrementa niveles de seguridad según como se reportó en el capítulo Normatividad en cargadores de vehículos eléctricos.
- De acuerdo con lo reportado en el mencionado trabajo y en muchos otros encontrados en bases de datos especializadas, este tipo de convertidor presenta buenos resultados experimentales en cuanto a THD y PF.
- Soporta varios esquemas de modulación (por ejemplo: *phase-shift*, triangular y modo de corriente trapezoidal), haciéndolo muy versátil.

Desventajas:

- Al implementar este tipo de convertidores para esquemas de modulación baja ZVS y ZCS, se pueden generar grandes picos de corriente en el transformador afectando la eficiencia y deteriorando su vida útil.

Como puede apreciarse en la figura 25, esta topología requiere ocho interruptores, lo que no solo implica una mayor cantidad de *drivers*, sino también una estructura de control y disparo un poco más compleja, y dispositivos digitales (en los que se implementa el controlador) con mayor número de salidas de este tipo.

- Como consecuencia de la operación de los interruptores, en la implementación se debe prestar atención al disparo de los transistores e implementar los tiempos muertos que se necesitan entre la conmutación de los distintos interruptores. Esto se realiza dependiendo de la estrategia de control adoptada.

Topologías PFC sin puente

A partir de la información suministrada por el estudio anterior, donde se analizaron brevemente las topologías más representativas de cada grupo y se hizo un análisis de las ventajas y desventajas de cada una, en donde a pesar de que a primera vista destaca la topología de filtro activo de dos cuadrantes, hay que resaltar que, en ese estudio, era la única topología que no estaba en lazo abierto, lo que le da una notable ventaja. Pero al analizar las demás características, el *semibridgeless* con corrimiento de fase ofrece grandes prestaciones en su pertinencia, simplicidad y eficiencia derivadas de las siguientes consideraciones.

- Reduce las pérdidas tanto de conducción al tener pocos elementos pasivos e interruptores, como las pérdidas de conmutación.
- Teniendo en cuenta el rango de tensiones de las baterías a recargar, el convertidor requiere elevar en la mayoría de los casos, lo que se ajusta muy bien a la relación entrada-salida de este tipo de convertidores.
- Presenta un inductor en la entrada, lo que facilita la regulación de corriente y por ende en el control del THD y PF.

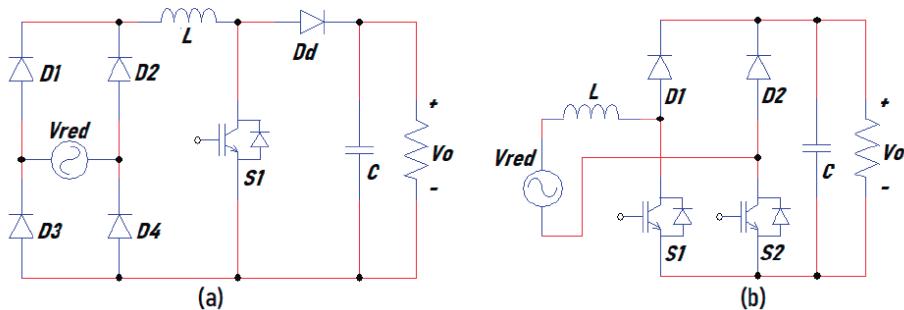
Por esta razón se decide ahondar en el estudio de todas las topologías PFC que derivan de la topología clásica *Boost*, ya que según el análisis anterior este grupo de convertidores se adapta mejor a los requerimientos de un cargador de baterías para VE. Por tanto, basados en [36], la sección “Análisis comparativo de características” presenta las topologías que más atención han recibido de acuerdo con sus prestaciones como correctoras de factor de potencia.

Análisis comparativo de características

Rectificador bridgeless y clásico

El PFC sin puente básico, mostrado en la figura 26b, tiene la ventaja frente al rectificador tipo *Boost*, ilustrado en la figura 26a, de eliminar un diodo del camino de conducción hacia la carga, por lo que la corriente solo fluye por dos semiconductores a la vez, pero con la ventaja de mantener ese diodo de protección de corriente inversa que sugiere el estándar (ver capítulo Normatividad en cargadores de vehículos eléctricos).

Figura 26. (a) PFC sin puente básico; (b) rectificador PFC tipo *Boost*

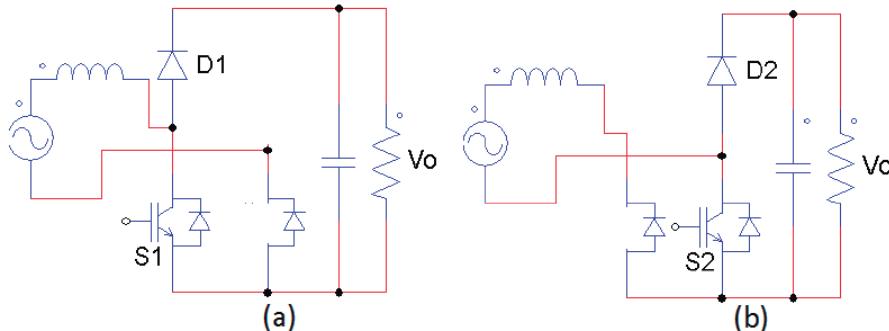


Fuente: [36]

A pesar de la gran ventaja en la reducción del número de elementos, el PFC sin puente básico presenta un mayor ruido en modo común que el rectificador PFC: en el rectificador *Boost* el negativo de la salida siempre está conectado a la fuente AC mediante el puente rectificador, mientras que para el PFC sin puente, la salida está conectada con la fuente AC solo en el semiciclo positivo a través del diodo del interruptor S2 y en el ciclo negativo, el negativo de la salida es pulsante respecto a la fuente AC (alta frecuencia)

tal y como lo muestra la figura 27. Esta alta frecuencia en la pulsación en la tensión carga y descarga la capacitancia parásita entre el negativo de la salida y la fuente AC, lo que incrementa el ruido a modo común.

Figura 27. Funcionamiento del PFC sin puente básico

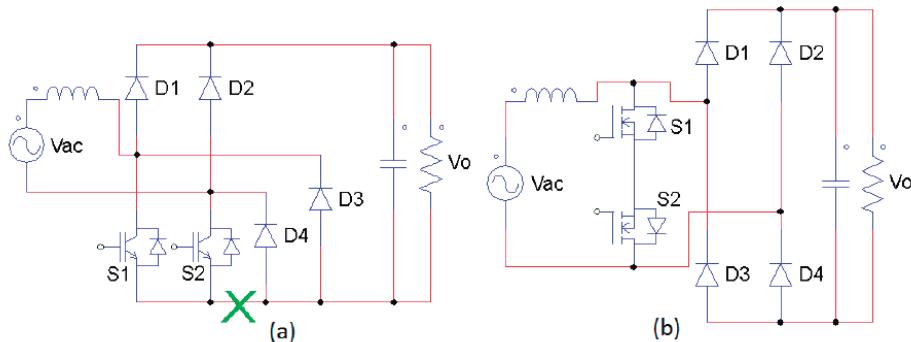


Fuente: [36].

PFC *bridgeless* con interruptor bidireccional

Para proporcionar un camino de baja frecuencia entre la fuente AC y la salida se hace necesario una modificación como la propuesta en la figura 28a en la que se incluyen los diodos D3 y D4. En esta figura el nodo común de los interruptores S1 y S2 es desconectado del negativo de la salida y se puede redibujar el circuito como se muestra en la figura 28b [37].

Figura 28. Funcionamiento del PFC *bridgeless* con interruptor bidireccional



Fuente: [36].

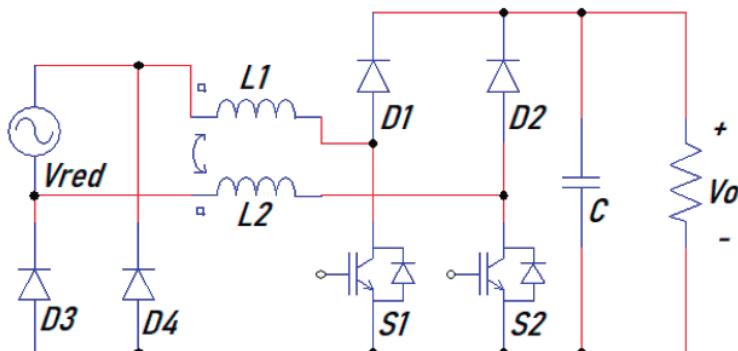
Es de notar que los diodos D1 y D3 son *fast-recovery* (de conmutación), mientras que los diodos D2 y D4 son *slow-recovery* (rectificadores). Además, durante el ciclo positivo la fuente AC es conectada al negativo de la carga a través del diodo D4 y durante el ciclo negativo la fuente AC se conecta al positivo de la carga mediante D2.

PFC Boost Bridgeless con dos convertidores DC/DC Boost

Expuesta la dificultad existente para la topología anterior, una alternativa es agregar un segundo inductor, como se muestra en la figura 29, lo que básicamente resulta en dos circuitos *Boost* (uno por cada ciclo). Donde es de resaltar que D3 y D4 son *slow recovery*.

Funcionamiento: L1-S1-D1 se activan a través de D4 conectando la fuente AC y el negativo de la carga. Durante el ciclo negativo L2-S2-D2 se activan a través de D3, el cual conecta la fuente con el negativo de la carga [38].

Figura 29. Topología de conversión DC-DC con dos convertidores *Boost*



Fuente: [36].

Ventajas:

- Los interruptores S1 y S2 en los dos convertidores *Boost* sin puente se controlan con la misma señal de PWM, solo teniendo en cuenta que únicamente conmuta un interruptor en cada semiciclo, lo que simplifica la tarea de control.

- Mejor rendimiento térmico al tener dos inductores, pues se genera un menor calentamiento en los núcleos, lo que a su vez implica menores pérdidas.
- Menos sensible al ruido porque los *gate drivers* están referidos a tierra. Adicionalmente, solo se requiere una fuente DC para el disparo de dichos interruptores.

Desventajas:

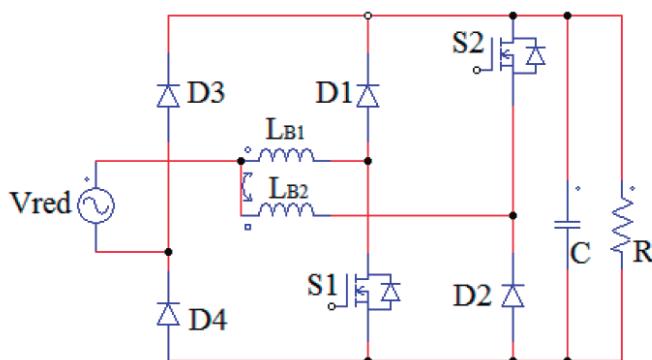
- Se incluyen dos elementos más respecto a la topología PFC *bridgeless*, incrementando pérdidas de conducción y precios de implementación.
- Al tener las dos bobinas acopladas se incrementa el orden del sistema, lo que además aumenta el esfuerzo al desarrollar el modelamiento del convertidor.

Pseudo totem-pole bridgeless PFC Boost rectifier

Otra variación perteneciente a esta familia de convertidores es la que se presenta en la figura 30, esta se denomina pseudo *totem-pole* debido a la disposición de sus elementos.

Funcionamiento: durante el semiciclo positivo el circuito *Boost* LB1-S1-D1 es activado a través del diodo D4, el cual conecta la fuente AC con el negativo de la salida. Durante el semiciclo negativo LB2-S2-D2 son activados a través de D3, que conecta la fuente AC al positivo de la fuente.

Figura 30. Topología pseudo *totem-pole*



Fuente: [36].

Ventajas:

- Posee una estructura simple con solo dos elementos reactivos que actúan en cada semiciclo.
- Debido a la posición de S2, se requiere de un *driver* aislado y una fuente de disparo adicional, lo que necesita más elementos para la implementación, pero adicionalmente lo hace sensible al ruido al no estar el *source* de este transistor referido a tierra.

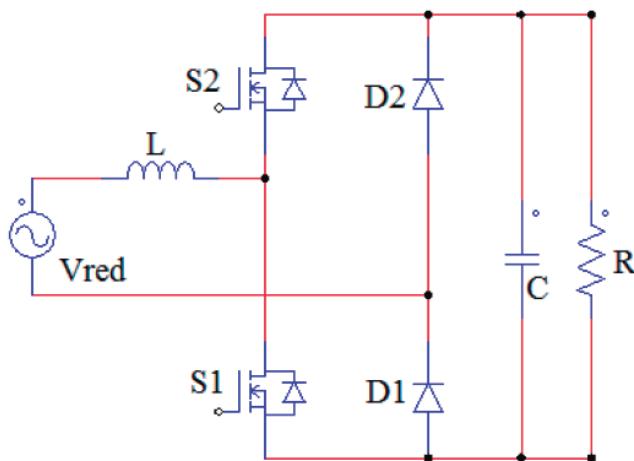
Desventajas:

- S1 y S2 no usan la misma señal de PWM, lo que da una mayor complejidad en la estructura de control y disparo de los interruptores.
- El interruptor S2 requiere un *gate driver* aislado.

PFC *totem-pole*

El PFC *totem-pole* es también una variación importante de los PFC *bridgeless* cuya disposición de elementos se muestra en la figura 31 en la que hay que aclarar que D1 y D2 son *slow recovery*.

Figura 31. PFC tipo *totem-pole*



Fuente: [36].

Funcionamiento: durante el ciclo positivo (mayor potencial en el terminal con punto de la fuente AC) la fuente AC se conecta con el negativo de la

carga mediante D1, mientras que durante el ciclo positivo, la fuente AC se conecta con el positivo de la carga a través de D2.

Ventajas:

- Posee un reducido número de elementos, igual cantidad que el PFC *bridgeless*, lo cual facilita su implementación y modelamiento.

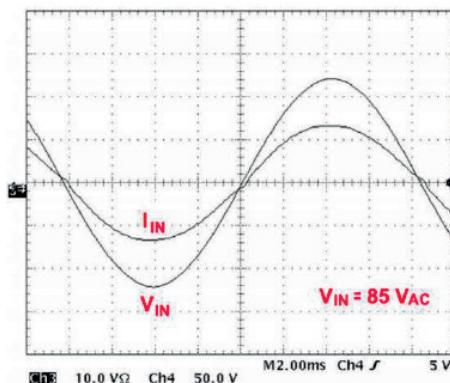
Desventajas:

- A diferencia de todos los PFC *bridgeless*, debido a la disposición de los interruptores, esta topología solo puede ser operada en DCM (modo de conducción discontinuo) y BCM (modo de conducción crítico). De hecho, la recuperación inversa de los diodos de cuerpo de los interruptores “S” hacen la operación CCM (modo de conducción en continuo) impráctica.
- Al operar en DCM se dificulta el modelamiento, control y manejo del THD, pues la forma de onda de la corriente varía entre un valor pico y un valor mínimo cercano a cero.

Comparación experimental

Esta sección recoge los resultados experimentales obtenidos en [36], donde se evalúa un prototipo de 750 W que conmuta a una frecuencia de 110 kHz y tensión de salida igual a 400 V. La exhibición de resultados inicia con la figura 32 en la que se aprecia la tensión de entrada VIN y la corriente de línea IIN.

Figura 32. Tensión y corriente de línea del PFC con dos circuitos *Boost*, operando a 750 W a 85 V_{RMS}



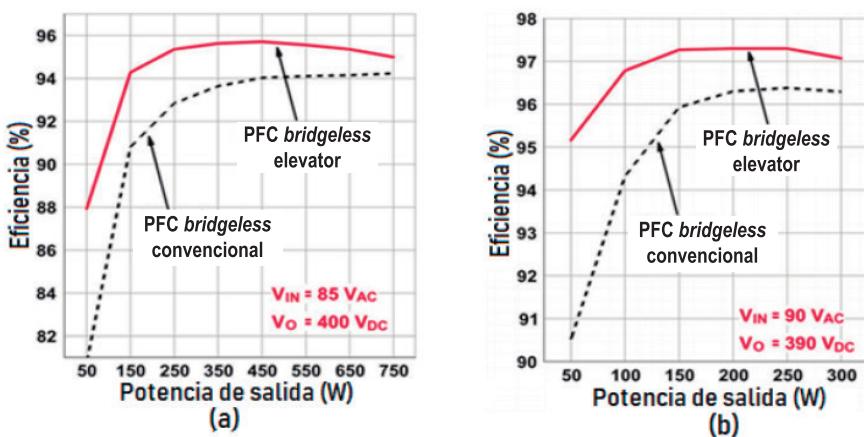
Fuente: [36].

Como se puede ver en la figura 32, los resultados en la forma de onda de la corriente son completamente satisfactorios desde el punto de vista cualitativo, apreciación que se confirma con el valor de THD igual 3.5 % y PF de 99.9 %.

Comparación de eficiencia

Debido a que la eficiencia resulta ser una característica de gran importancia para el desarrollo del prototipo, se incluye una comparación hecha en el mencionado documento entre el PFC convencional y el PFC *bridgeless* elevador. La figura 33 compara dos diferentes tensiones de entrada y salida. De la parte (a) y (b) la eficiencia de PFC *bridgeless* elevador es mayor para potencias entre 50 W y 750 W. Para las dos situaciones de prueba, la diferencia de eficiencias se hace más marcada para potencias bajas cercanas a los 50 W, en donde la diferencia es de alrededor del 7 %. Por otro lado, mientras se aumenta la potencia que desarrolla el convertidor, la diferencia se va estrechando hasta llegar a valores cercanos al 1 %. Se destaca la proximidad que existe entre estos valores experimentales y los teóricos obtenidos a partir del modelamiento hecho en dicho artículo, no obstante, a bajas potencias esta eficiencia resulta ser ligeramente menor que la que arroja el modelo. Esto puede ser justificado por el hecho de que las pérdidas del apagado de los interruptores (que no fueron consideradas) se vuelven apreciables para bajas potencias.

Figura 33. Eficiencia (a) CCM (b) BCM



Fuente: [36].

Resumen topologías tipo *Boost*

Ya evaluadas las diferentes características funcionales de las distintas topologías de conversión *Boost*, se pretende obtener un criterio más de escogencia que permita hacer la mejor elección. Es por esto y por la proyección económica, que resulta importante valorar estos convertidores de acuerdo con el número de elementos y su tipo, pues ante una eventual producción en masa, conviene mantener baja la cantidad de elementos, lo que implica una menor inversión, sin que esto llegue a comprometer el funcionamiento del cargador.

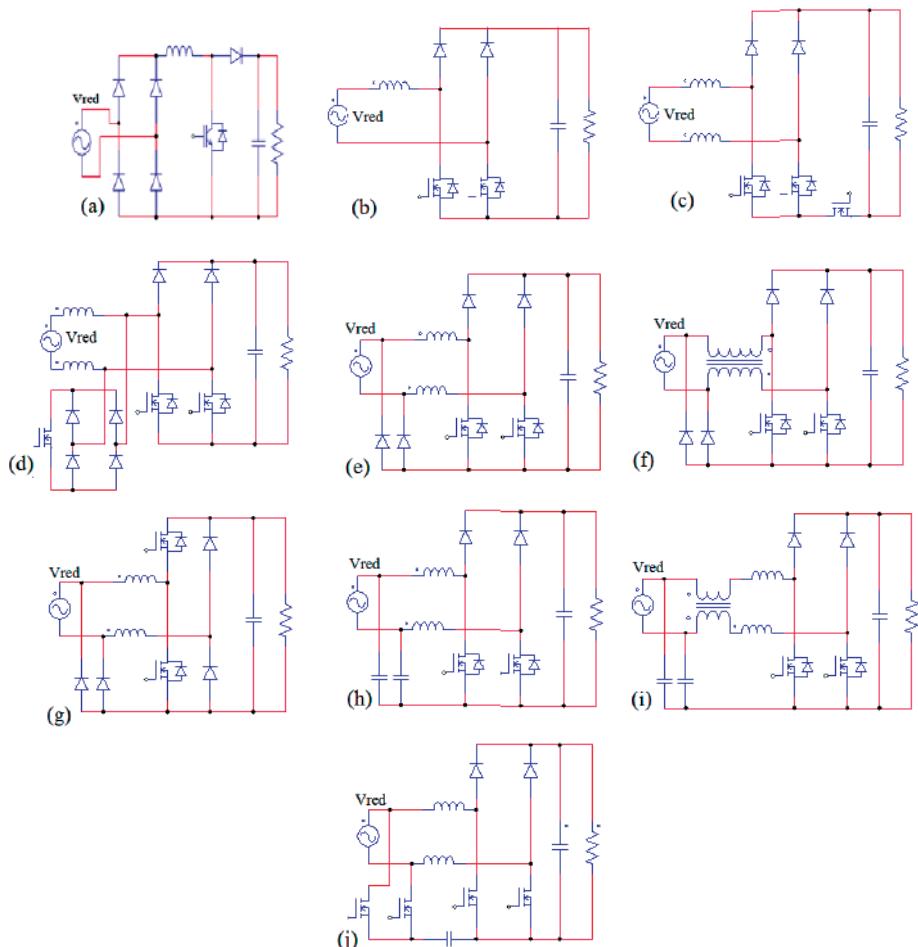
Para cumplir con lo expuesto, se presenta un breve resumen extraído de [39]. Este resumen se centra en los datos consignados en el artículo, cuya información presenta el número de componentes semiconductores y su tipo (baja o alta frecuencia), para cada uno de los PFC mostrados en la figura 34, identificados con una letra inferior y que aparece en la primera columna de la mencionada tabla (ID). Adicionalmente, se incluye la eficiencia de cada convertidor en este análisis, por lo que se organiza la tabla 4, mostrando el número de elementos que se encuentran activos en los estados *On* y *Off* de los interruptores presentes para generar una idea de las pérdidas de conducción.

Tabla 4. Resumen comparativo de las topologías Boost, de acuerdo con el número de elementos y su tipo

ID	Topología	Estado ON		Estado OFF		Semicongductores LF	Semicongductores HF	Componentes Extra
		Diodo	MOSFET	Diodo	MOSFET			
a	PFC convencional	2	1	3	0	4	2	0
b	BPFC convencional	0	2	1	1	0	4	0
c	BPFC con switch adicional	0	2	1	2	0	5	0
d	BPFC con rama activa cero	2	1	1	1	0	9	0
e	BPFC diodo Clamped	1	1	2	0	2	4	0
f	BPFC diodo Clamped con inducción de núcleo común	1	1	2	0	2	4	0
g	Totem-pole	1	1	1	1	2	2	0
h	BPFC clamped(C)	0	2	1	1	0	4	2
i	BPFC clamped(C) con inductor de acoplamiento	0	2	1	1	0	4	3
j	BPFC con tierra virtual activa	0	2	1	1	2	4	1

Al comparar los resultados expuestos en la tabla 4, la topología BPFC convencional resalta como una de las que posee el menor número de elementos semiconductores, pues solo tiene 4 de estos, todos de alta frecuencia. Las otras dos topologías con solo cuatro componentes semiconductores de alta frecuencia son BPFC *clamped* (C) con inductor de acoplamiento y BPFC *clamped* (C), pero estos tienen dos y hasta tres elementos extra que incrementan el costo de implementación.

Figura 34. Esquemas de las principales topologías PFC tipo *Boost*



Fuente: [39].

Simulación de topologías seleccionadas

En este capítulo se presenta la selección de las topologías de conversión AC-DC, discutidas en el capítulo Selección de la topología del convertidor para el cargador de baterías, de acuerdo con las características de cada una. Una vez seleccionadas, se hace un rápido diseño y control para cada una de ellas, con el fin de evidenciar preliminarmente su comportamiento y desempeño. Hecho esto, se simulan los convertidores y se evalúan los resultados, dando como resultado que las dos topologías seleccionadas no cumplen satisfactoriamente los requerimientos necesarios para satisfacer los objetivos propuestos, lo que implica que se hace necesario usar una topología en cascada de tipo elevadora junto a una topología reductora.

Selección de topologías

En el capítulo Selección de la topología del convertidor para el cargador de baterías se establecieron las ventajas, inconvenientes y principales características de las topologías en estudio. A partir de este análisis previo, se concluyó que las topologías tipo *Boost* cumplen con gran parte de los requerimientos que se impusieron, pues como se mostró antes, tienen la menor cantidad de elementos posibles, lo que conlleva tener una menor cantidad de pérdidas, convirtiéndolos en dispositivos altamente eficientes. Dentro de esta familia de convertidores el que más destaca es el convertidor *bridgeless*, pues además no requiere una etapa previa de rectificación, haciéndolo aún más eficiente. Además, tiene la bobina en la entrada del convertidor, lo que facilita el control de corriente de entrada del cargador, por lo que se esperan muy buenos resultados de THD y PF.

Dentro de las desventajas inherentes a esta topología está el ruido en modo común, sin embargo, teniendo en cuenta las consideraciones de diseño para circuitos impresos y demás prácticas asociadas a la compatibilidad electromagnética es posible mitigar su efecto. Otro de los principales inconvenientes de esta topología es la presencia de un cero de fase no mínima, cuyo efecto característico en la salida del sistema es la presencia de un *undershoot* causando una deformación indeseada sobre la misma. Este defecto puede ser mitigado con el controlador adecuado, de tal forma que este haga un corrimiento del cero en cuestión, a zonas de alta frecuencia y así su efecto no sea apreciable.

Recordando que se pretende que el cargador sea capaz de recargar un grupo considerable de baterías, este debe suministrar un rango amplio de tensiones de salida, sin embargo, como el proceso de rectificación se hace al valor pico de la tensión de red (170 V caso colombiano), se presenta una limitación inherente a la hora de recargar baterías de menor tensión a la de la red. Este inconveniente impulsa a probar una topología adicional, que brinde una solución a esta problemática, acercándose a las demás bondades del convertidor *bridgeless*. Del estudio anterior, se sugiere como alternativa el convertidor tipo SEPIC, pues este posee pocos elementos pasivos, un solo interruptor, originando pocas pérdidas de conmutación, tiene una inductancia a su entrada, entre otros aspectos.

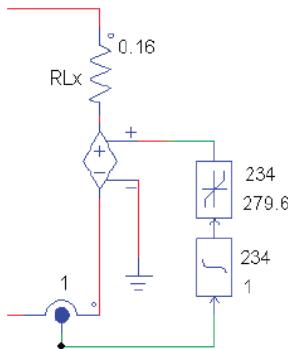
En lo que sigue se presentan las simulaciones de cada uno de estos convertidores operados con un determinado número de controladores que fueron sintonizados para fijar las variables relevantes del problema a los valores deseados, más concretamente tensión y corriente de entrada y salida.

Modelo de batería

Buscando que la simulación para evaluar el funcionamiento de los dos convertidores ya mencionados se acerque a la situación real en la que la carga será una batería, es necesario un modelo simple pero funcional de esta. Como razón a ello se elige el modelo mostrado por la figura 35, en ella se puede ver a la batería, representada circuitalmente por una resistencia equivalente, que para el caso de la batería de pruebas se espera tenga un valor de 0.16Ω aproximadamente, además de una fuente de tensión controlada por la integral de

la corriente que ingresa en ella. Con esto último lo que se busca es de cierta forma medir la carga neta que ingresa en la batería. Por último, se hace uso de un saturador que fija los valores de tensión a lo que establece el fabricante en la hoja de datos del dispositivo de almacenamiento seleccionado.

Figura 35. Modelo simplificado de batería

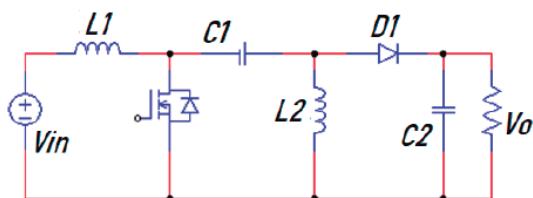


Fuente: elaboración propia.

Convertidor SEPIC

Como se mencionó, este convertidor compuesto por dos bobinas, dos condensadores, un interruptor y un diodo, permite generar tensiones mayores, menores o iguales a la de la entrada, todo esto manteniendo la misma polaridad a la salida. La disposición de estos elementos en el diagrama circuital para su versión básica se muestra en la figura 36.

Figura 36. Topología del convertidor SEPIC



Fuente: elaboración propia.

Es de recalcar las desventajas con las que habría que lidiar ante una eventual implementación de este convertidor, dentro de las que sobresalen [40]:

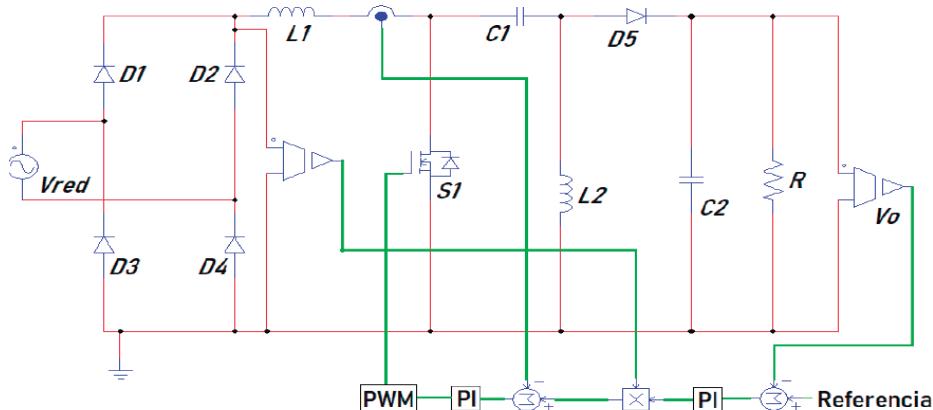
- Tiene varios elementos pasivos
- Posee una corriente de salida pulsante
- Tener cuatro elementos reactivos lo convierte en un sistema de cuarto orden que dificulta la tarea de control.

Puesto que como lo muestra la figura 36, la energía transferida de la entrada a la salida tiene que pasar en su totalidad a través del condensador en serie C_1 , se requiere un alto valor de capacitancia.

La herramienta usada para la simulación de estos convertidores es PSIM, que es un *software* especializado para este tipo de sistemas.

El esquema mostrado en la figura 36 debe ser modificado para así poder operar el SEPIC como un corrector de factor de potencia, las modificaciones hechas para ello son mostradas en el esquema de la figura 37. Esta figura incluye a manera de diagrama de bloques el esquema de control del sistema, el cual es explicado con mayor detalle en la sección de resultados de simulación. Por último, se aclara que para mayor simplicidad se han omitido los sistemas de acondicionamiento y muestreo de cada una de las señales usadas para el control del convertidor.

Figura 37. Esquema circuitual y de control del convertidor SEPIC



Fuente: elaboración propia.

La tabla 5 muestra los parámetros eléctricos del convertidor SEPIC diseñado en un punto nominal de potencia igual a 2 kW y operando a una frecuencia de conmutación de 50 kHz.

Tabla 5. Parámetros eléctricos del convertidor SEPIC

Parámetro	Valor
Tensión de la red (V_{red})	120 VRMS, 60 Hz
Tensión de salida (VO)	240 VDC
Inductancia de entrada ($L1$)	500 μ H
Inductancia de salida ($L2$)	100 μ H
Condensador de entrada ($C1$)	10 μ F
Condensador de salida ($C2$)	4.1 mF
Frecuencia de conmutación (f_s)	50 kHz
Resistencia de carga (R)	29 Ω

Fuente: elaboración propia.

Resultados de simulación

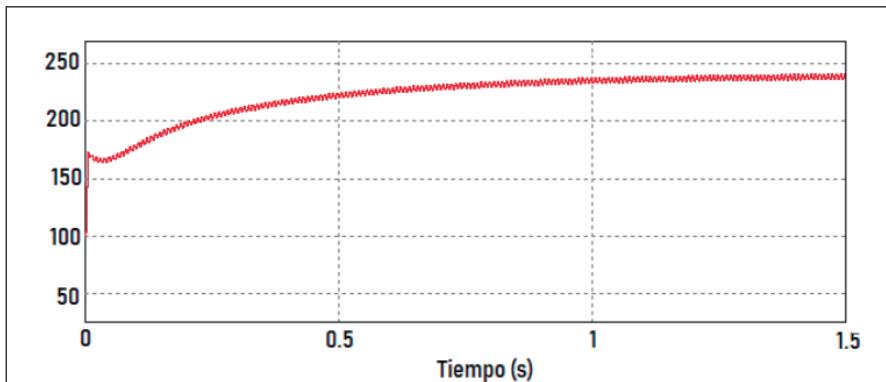
La estrategia de control adoptada para este convertidor es de tensión constante a su salida, soportada por una estructura de doble lazo anidado, en el que el lazo interno con un ancho de banda de 5 kHz controla la corriente y recibe la referencia de la multiplicación entre la tensión rectificada y la salida del lazo externo que controla la tensión de salida del convertidor, tal y como se muestra en la figura 37. Por otra parte, en la tabla 6 se presentan las características de los controladores implementados (controladores tipo PI). La simulación del sistema permite obtener la tensión de salida del convertidor mostrada en la figura 38. Esta figura exhibe el cumplimiento del valor estacionario de esta variable, el cual fue fijado a una referencia de 240 V, aclarando que el condensador de salida fue precargado a 100 V.

Tabla 6. Características de los controladores para el SEPIC

Lazo interno			
<i>Ganancia proporcional (K_p_1)</i>	<i>Ganancia integral (K_i_1)</i>	<i>Margen de fase</i>	<i>Ancho de banda</i>
0.0000023	0.04	40°	5 kHz
Lazo externo			
(K _p _2): 0.0023	(K _i _2): 1.45	47°	500 Hz

Fuente: elaboración propia.

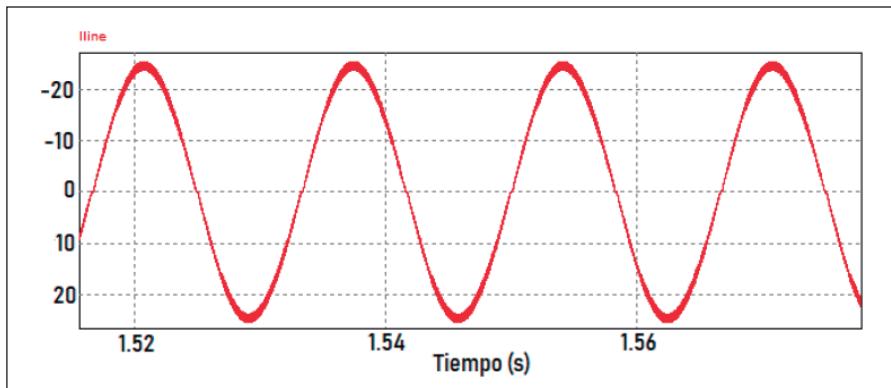
Figura 38. Tensión de salida del convertidor SEPIC



Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se evalúa la forma de onda de corriente de entrada del cargador logrando el resultado mostrado en la figura 39, evidenciando un carácter de tipo armónico, tal y como se espera debido a su correspondiente control. Además, según los valores reportados por el *software* de simulación, esta forma de onda posee un desfase muy pequeño respecto a la tensión de línea, pues el factor de potencia es igual a 0.956.

Finalmente, el valor promedio de la distorsión armónica total en corriente una vez se ha superado la etapa transitoria es de 5.2 %, lo que da cuenta de la alta concentración de energía de la forma de onda en el primer armónico, aproximándola muy bien a una forma puramente sinusoidal.

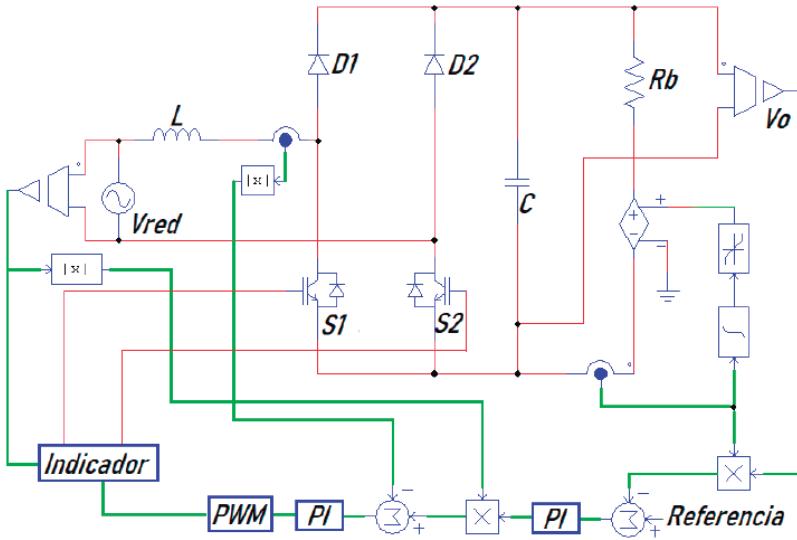
Figura 39. Corriente de entrada del convertidor SEPIC

Fuente: elaboración propia.

Convertidor Boost

En condiciones similares a las que fue simulado el convertidor SEPIC, se simulará el convertidor *Boost*, pero con un cambio en la estrategia de control, pues esta vez no se hará a tensión constante, sino que se buscará recargar la batería a potencia constante. El esquema usado para la simulación de este PFC se muestra en la figura 40, donde se indica el diagrama de bloques del sistema de control, el modelo de la batería y la representación del subsistema usado para la activación de cada transistor de acuerdo con el ciclo de la red. En el esquema de control se realiza la multiplicación entre la corriente y la tensión de salida para así obtener la potencia entregada a la batería. Este valor es restado del valor de referencia, dicha diferencia pasa a través del controlador PI, cuya salida se multiplica por el valor absoluto de la tensión de red para así generar la referencia del lazo de corriente, que luego se le resta el valor absoluto de la corriente en la bobina para que posteriormente dicho valor pase por un controlador PI. Este último valor se entrega al módulo PWM y a su vez pasa por el módulo indicador, quien, según la lectura de la tensión de red, activa S1 o S2.

Figura 40. Esquema circuital y de control del convertidor *Boost*



Fuente: elaboración propia.

Resultados de simulación

Para verificar el desempeño del convertidor, se realiza el diseño de los elementos del mismo, hallando el valor de la inductancia y capacitancia necesarias para operar a una potencia de 2 kW con un rizo de 3% para la tensión y uno de 5% para la corriente de la entrada, los valores y características eléctricas del convertidor se encuentran registradas en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros eléctricos del convertidor *Boost*

Parámetro	Valor
Tensión de la red (V_{red})	120 VRMS, 60 Hz
Potencia de salida (VO)	2 kW
Condensador de salida (C)	110 mF
Inductancia de entrada (L)	1 mH
Frecuencia de conmutación (f_s)	100 kHz

Fuente: elaboración propia.

Luego, se realiza el diseño del controlador con la estructura explicada en el apartado “Convertidor *Boost*” con el fin de lograr el desempeño buscado. Los valores numéricos de cada uno de estos elementos son reportados en la tabla 8. Se debe hacer hincapié en que el condensador de salida necesario para el rizo deseado es en realidad 3.4 mF, sin embargo, se recomienda un valor varias veces mayor con el fin de obtener un rizo mucho más bajo en la tensión de salida, y así obtener un rizo de corriente lo más bajo posible.

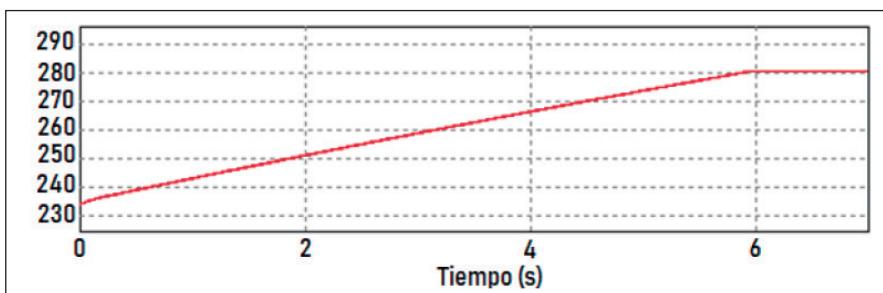
Tabla 8. Características de los controladores para el *Boost*

Lazo interno			
<i>Ganancia proporcional</i> (K_p_1)	<i>Ganancia integral</i> (K_i_1)	<i>Margen de fase</i>	<i>Ancho de banda</i>
70	1000	52°	10.2 kHz
Lazo externo			
(K_p_2): 0,00000022	(K_i_2): 0.0012	42°	1 Hz

Fuente: elaboración propia.

El perfil de la tensión de salida del cargador al emplear un convertidor tipo *Boost bridgeless* con una estrategia de potencia constante se muestra en la figura 41. Es de notar que para esta estrategia la tensión crece de forma lineal hasta llegar al valor de saturación impuesto (279 V). Además, hay que resaltar lo pequeño del rizo para la tensión, lo que es muy importante si se tiene en cuenta los valores de rizo exigidos por estándares internacionales, tal y como lo reporta el capítulo “Normatividad en cargadores de vehículos eléctricos”.

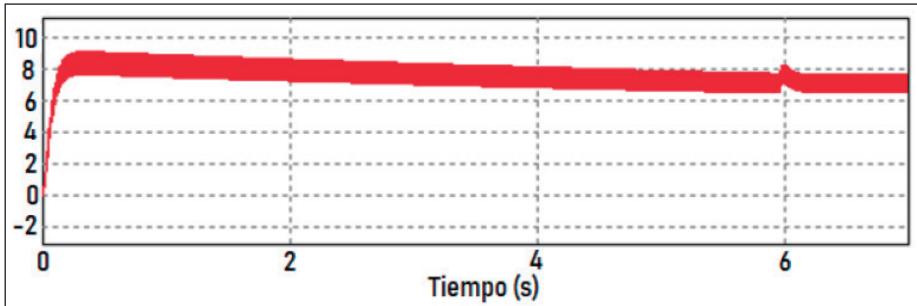
Figura 41. Tensión de salida del convertidor *Boost*



Fuente: elaboración propia.

El comportamiento de la corriente de salida puede verse en la figura 42, esta muestra un valor que en promedio decrece con el tiempo. A pesar de no tener un valor constante, el rizo que posee no supera el 1.7 App.

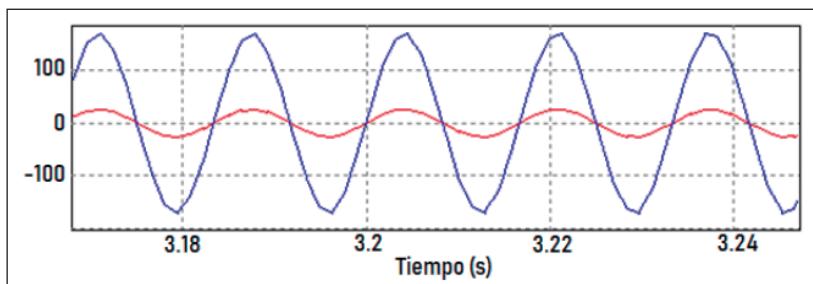
Figura 42. Corriente de salida del convertidor *Boost*



Fuente: elaboración propia.

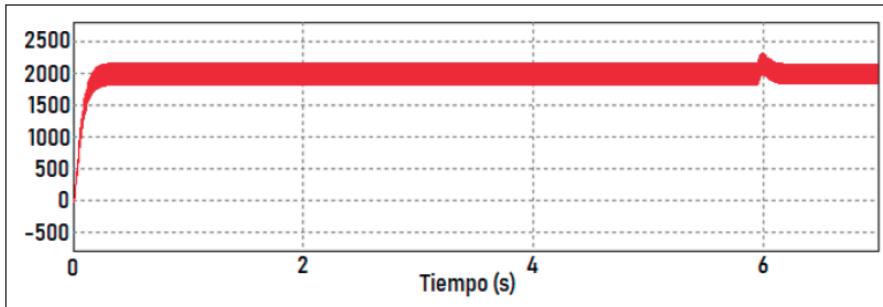
En cuanto a la corriente de entrada se obtiene un valor de factor de potencia igual a 0.9979 y un THD de 2.07%. Estos datos son respaldados por la figura 43, la cual muestra la tensión y corriente de línea casi en fase y con una forma de onda de corriente prácticamente sinusoidal.

Figura 43. Corriente de entrada del convertidor *Boost*



Fuente: elaboración propia.

Por último, la figura 44 muestra la potencia de salida entregada por el cargador a la batería. Como se puede apreciar, el tiempo que tarda en establecerse es muy corto y lo hace sin sobrepicos, lo que preserva la integridad de la batería. El valor al cual se establece fue fijado en 2 kW.

Figura 44. Potencia de salida del convertidor *Boost*

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la limitante ya reportada, que hace referencia a la mínima tensión de salida lograda por este convertidor y que está fijada por la tensión pico de entrada, se sugieren dos alternativas. La primera de ellas es la utilización de un transformador reductor a la entrada del convertidor, el cual tenga la relación adecuada para que reduzca la tensión a la entrada del convertidor a los niveles requeridos por la tensión de la batería que se quiere recargar. El tamaño de dicho transformador dependerá de la potencia que desarrolle el cargador, que al tratarse de baterías para VE, se espera que sea una potencia considerable, haciendo que el transformador no solo sea voluminoso y pesado, sino también costoso.

Otra alternativa un poco más elaborada es la conexión en cascada de otro convertidor que reduzca la tensión entregada por el PFC, adaptándola a la tensión requerida por la batería. Con esta solución se tendrían rangos de operación más amplios que con el transformador, pero también se desarrollaría un sistema más compacto y barato. El desempeño total estaría dado por la topología reductora elegida.

Desarrollo de vehículos eléctricos y su infraestructura en el país

En esta sección se explora el estado de la técnica en Colombia, reportando los diferentes resultados de investigación obtenidos por los grupos académicos e industrias nacionales en el campo de la movilidad eléctrica y la recarga de VE durante los últimos 12 años.

Vehículos eléctricos y sus cargadores

Quizá lo más destacable en el ámbito nacional es el desarrollo del primer vehículo eléctrico diseñado y construido en Colombia. Liderada por los ingenieros Javier Roldán y Wilmar Villarraga, junto con el apoyo de la Uniminuto y Colciencias, se desarrolló la primera versión de este carro a finales de 2017 mostrada en la figura 45, la cual además de ser completamente eléctrica, cuenta con un sistema de recuperación energética que consta de un generador eólico ubicado en la parte delantera del vehículo, el cual produce energía eléctrica convirtiendo la energía cinética del viento que impacta la parte frontal del vehículo. Actualmente, el equipo de ingenieros se encuentra trabajando en una versión mejorada del vehículo, que incluye mejoras en el diseño aerodinámico y en la eficiencia de la turbina generadora. Se espera tener una versión comercial de dicho automóvil en los próximos años [41].

Figura 45. Eolo, el primer vehículo eléctrico colombiano



Fuente: [41].

Por otra parte, como resultado de una etapa previa del trabajo de investigación en el que se enmarca el desarrollo de este libro, se elaboró el trabajo [42], que muestra todo el proceso de diseño, simulación y construcción de un prototipo de cargador de baterías que funciona como corrector de factor de potencia, desarrolla bajo THDi y opera con elevada eficiencia. El cargador que se desarrolla aquí es usado para recargar una batería de ácido-plomo de 12 V a 26 Ah, mediante la siguiente estructura: un transformador reductor que adecúa la tensión de la red (170 Vpico) a una tensión de 28.33 Vpico; el secundario del transformador se conecta a un puente rectificador de diodos, cuya salida se conecta a la entrada de un convertidor tipo *Boost* convencional que incluye su respectivo condensador de salida. Esta última etapa se conecta en cascada a un convertidor *Buck* y finalmente es esta quien suministra la energía a la batería. Despues de presentar todo el proceso de diseño de los componentes del cargador y su sistema de control para cada una de sus etapas, se presentan los resultados experimentales al recargar la batería ya mencionada mediante corriente-tensión constante, en el que se inicia el proceso con una corriente fija de 8 A y una vez se alcanzan los 15 V

en los terminales de la batería, se opera a tensión constante hasta terminar el proceso de carga. El THDi promedio generado durante todo el proceso de carga fue de 5.7% y un factor de potencia de 0.976. Una vez el sistema inicia la carga a tensión constante, el valor del factor de potencia disminuye y su THD tiende a aumentar. Esto debido al distanciamiento que hay entre la potencia desarrollada y la nominal para la que fue construido el cargador. A pesar de esto, el cargador cumple con el estándar IEC 61000-3-2, como se muestra en la comparación del contenido armónico del cargador y del mencionado estándar.

Dispositivos y desarrollos relacionados

Rectificadores de potencia

Más allá del trabajo mostrado en la sección anterior, no se encuentra reportado ningún otro cargador para vehículos eléctricos con características de PFC y bajo contenido armónico que haya sido desarrollado por la academia nacional. Sin embargo, sí hay algunas aproximaciones como lo pueden ser los rectificadores convencionales que eventualmente y con algunas características adicionales, pueden funcionar como cargadores de baterías. Por ejemplo, en [43] se presenta el uso de un controlador repetitivo impar de alto orden para controlar los lazos de corrientes de un rectificador trifásico con un desempeño considerablemente superior a otras alternativas tradicionalmente implementadas en este campo. Este controlador permite el rechazo de los armónicos impares introducidos en el sistema, lo que mantiene una complejidad computacional similar a la obtenida con los controladores repetitivos convencionales con la ventaja de incrementar la robustez cuando la frecuencia de la señal varíe. Las simulaciones y los resultados experimentales muestran un alto desempeño aun cuando se presenten desviaciones de la frecuencia de la red respecto a su valor nominal.

Otro ejemplo se presenta en [44], donde utilizan una de las topologías vistas en la sección Topologías PFC sin puente denominada BPFC *diode clamped*. Aunque no lo utilizan como cargador de baterías propiamente, sino que lo presentan de forma general como un rectificador. En ese trabajo se presenta todo el proceso de diseño de los elementos del convertidor, además

de la estructura de control, la cual es la típica estructura de PFC de doble lazo anidado, siendo la tensión de salida el lazo externo y la corriente de línea el lazo interno, y cuya referencia se multiplica por el valor absoluto de la tensión de línea. Para verificarlo experimentalmente se implementó un prototipo que conmuta a 40 kHz, de 0.9 kW. Las pruebas se realizaron haciendo un barrido de potencia que arrancó en 200 W y terminó en 900 W. Los resultados de factor de potencia mostraron su mejor valor en un punto cercano a los 400 W, alcanzando un valor de 0.9974, mientras que a 200 W tuvieron su peor valor que fue de 0.9936. De acuerdo con el autor, se obtuvo una eficiencia máxima en 200 W e igual a 99.16 % y un mínimo de 88.97 % a 900 W. El valor de THD también varía con la potencia desarrollada, teniendo un valor mínimo de 3.9 %.

En [45] se implementa un rectificador síncrono trifásico en un rectificador trifásico de propósito general, en la que se prueban tres diferentes controladores difusos de estructura variable, que se basan en el controlador PI difuso Takagi-Sugeno. En la etapa experimental se usa una referencia de corriente de línea de 5 A pico. Para el primer controlador (PI difuso) se obtiene un THD de 3.16 %. Para el segundo controlador (controlador de estructura variable de segundo orden) se obtiene un THD de 2.9 %, mientras que para el controlador de tercer orden de estructura variable se obtuvo un THD de 3.57 %. Siendo estos valores, el promedio de las tres fases.

Existen otros trabajos en los que se construyen PFC a los que les dan aplicaciones concretas y distintas, como en [46], en el que se diseña y construye un PFC que alimenta un sistema de iluminación LED residencial que consta de un filtro EMI a la entrada, luego pasa por un rectificador de puente completo y posteriormente por un convertidor *Buck-Boost*. El convertidor es simulado para las condiciones de modo de conducción continuo y modo de conducción crítico, obteniendo los mejores resultados para este último modo, por lo que se procede a su implementación en modo de conducción crítico. Este prototipo mostró un THDi de entre 14.88 % y 16.8 % y fue comparado con algunos sistemas similares que se encuentran en el mercado colombiano.

Un ejemplo más se presenta en el artículo [47], en el que se desarrolla el modelado de un rectificador monofásico con factor de potencia unitario en

configuración medio puente. El modelo propuesto se obtiene a través de la técnica de promedio móvil y análisis cuasiestático. Con esta metodología se encuentran las funciones de transferencia que contienen la información dinámica del convertidor. Finalmente, el equipo es implementado y controlado mediante un dispositivo de procesamiento digital (DSP).

En [48] se usa un rectificador de medio puente tipo *Boost* monofásico que opera como corrector de factor de potencia. Se presenta todo el proceso de diseño del convertidor y luego se muestra el diseño de control, en cuya estrategia se incluye un controlador PI para lidiar con el desbalance de tensión entre los dos condensadores de salida del convertidor (debido al *offset* del controlador de corriente). El prototipo fue testeado a una tensión de línea de 120 V_{RMS}, desarrolla una potencia de 80 W y una tensión de salida de 450 V, obteniendo un factor de potencia de 0.99 y un THD de 2.5 %.

También se han trabajado algunos prototipos a menor escala, como por ejemplo: en [47] se desarrolla el modelo lineal de un rectificador monofásico con estructura de medio puente que funciona además como corrector de factor de potencia y que desarrolla potencias de 240 W (12 V- 20 A a la salida); en [49] se analiza el modelo matemático y el diseño de controladores para el convertidor DC-DC tipo *Boost*, enfocado en la corrección del factor de potencia con un manejo de 24 W, cuya fase de simulación e implementación obtuvo resultados satisfactorios. Por último, [50] presenta un resultado de investigación financiado con recursos propios en el que se expone un modelo en espacio de estados de un rectificador trifásico controlado *active front end*, con el que se deriva una ley de control orientada a la tensión (VOC), enfocada en el comportamiento como carga resistiva, factor de potencia unitario, el cual es probado mediante simulación. Usa el Toolbox SimPowerSystems en Simulink de Matlab®.

Finalmente, en [51] se propone el uso de la técnica de control de predicción de ancho de pulsos en un convertidor AC-DC con corrección de factor de potencia para una topología *Boost* de medio puente. Como se vio en la sección Análisis comparativo de características, esta topología presenta una alta eficiencia, dado que usa un reducido número de semiconductores comparada con otras. En esta técnica el ciclo de trabajo es predicho al procesar los valores promedio de las variables de entrada y estado del convertidor,

usando únicamente cuatro multiplicaciones y cinco adiciones, lo que significa menos complejidad de procesamiento en el dispositivo digital para su implementación. Se realizaron simulaciones utilizando Matlab® Simulink, donde fue posible observar valores de factor de potencia y THD comparables con otros métodos de control como control de portadora no lineal y control convencional análogo.

Cargadores de baterías

También se han desarrollado prototipos de cargadores de baterías como el de este primer artículo, en el que se reporta un dispositivo desarrollado con el esquema de recuperación de energía, en el que se construye un artefacto que a través de una placa de 16 cm de longitud, suministra energía cinética al cargador, luego multiplica por 14 la velocidad del movimiento mediante un sistema de engranes que se conectan al generador DC (modelo PC280LG-022) y almacena esta energía en un conjunto de supercapacitores, que mediante un circuito de control recargan la batería. La palanca puede ser adaptada a alguna rueda en movimiento del vehículo, por ejemplo. Para este estudio se usó una batería NiMH de tamaño AAA de 1.2 V y 700 mAh. La eficiencia alcanzada en la etapa electromecánica (conversión de energía mecánica a eléctrica) es de alrededor de 26 %, mientras que la eficiencia de la etapa eléctrica (de los supercondensadores a la batería) supera el 80 % [52]. Evidentemente, este dispositivo no sería viable para recargar una batería de gran capacidad como la de los VE, sin embargo, se puede considerar como una aproximación a la construcción de cargadores a través de diferentes paradigmas.

Otro acercamiento a la construcción de cargadores de baterías se ejemplifica en [53], donde se realiza el diseño y simulación de un cargador de baterías con aplicación a sistemas fotovoltaicos. El convertidor usado para este trabajo es de tipo *Buck* y usa la técnica perturbar y observar (P&O) para así operar como un seguidor del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés). Este MPPT genera la referencia de tensión para el lazo externo, compuesto por un regulador proporcional. Este último da la referencia de corriente con la que se recargan las baterías y cuyo controlador posee un limitador de derivada y una estructura de control por modo deslizante.

Modelamiento de demanda y perfiles de carga de VE

En [54] se propone un procedimiento general para calcular el perfil de demanda de un estacionamiento donde la flota de buses se recarga dividida en tres etapas. En la primera se usa el método Monte Carlo y características de las rutas para modelar el uso energético diario de las baterías. En la segunda etapa se modela el proceso de carga de estos buses mediante la simulación de eventos discretos usados para simular las filas de buses recargados por cierto número de estaciones. La tercer y última etapa calcula el perfil de demanda final. Este procedimiento permite calcular el número de cargadores de baterías requerido y el perfil de la demanda de la flota de buses.

En [55] se propone un algoritmo de consumo de un cargador de baterías de vehículo eléctrico en un entorno residencial. Este algoritmo se realiza en un escenario de tarificación en tiempo real y busca minimizar el costo total de la recarga del VE. Para este algoritmo de recarga se divide el proceso en intervalos de tiempo de una hora de duración, se tienen en consideración todas las combinaciones posibles a lo largo de la franja horaria disponible para realizar la recarga, encontrando el valor que minimiza el costo. La conducta del conductor se modela mediante variables aleatorias para así determinar el tiempo del que se dispone para realizar la recarga. Aunque finalmente se concluye que el ahorro que representa el uso del algoritmo es dependiente de la conducta del usuario, se estima que siempre resulta útil este algoritmo al representar un ahorro determinado.

Estaciones de recarga

La creciente demanda de vehículos eléctricos en el país, justificada en las cifras presentadas en la sección “Las cifras de los VE en Colombia”, ha llamado la atención de ciertos sectores industriales nacionales. Un ejemplo de ello fue la unión temporal entre dos empresas colombianas: Celsia y Haceb que durante 12 meses trabajaron en la primera y hasta el momento única estación de recarga de VE desarrollada en Latinoamérica. Este dispositivo—disponible en el mercado desde principios de junio de 2019—brinda a los usuarios la posibilidad de recargar su vehículo eléctrico en su propia casa y sin restricciones de horario. Adicionalmente, la estación de recarga se adapta a las diferentes configuraciones vehiculares presentes y cumple con todos

los requerimientos técnicos de acuerdo con la normatividad nacional. Es de fácil instalación y cuenta con el soporte técnico de Haceb. Aunque no ofrece mayor información técnica, dependiendo de la configuración del vehículo, la recarga puede tomar entre 4 y 8 horas. El equipo puede ser instalado en exteriores al tener protección contra agua y radiación UV [56].

Para el caso concreto de Bogotá, la empresa de energía Enel-Codensa cuenta con 55 equipos de recarga para diferentes proyectos de movilidad eléctrica, 34 de los cuales fueron dispuestos para la recarga de los taxis eléctricos de la ciudad, distribuidos en 4 sectores diferentes. De igual manera, ha instalado 250 equipos de recarga en distintos hogares o empresas que hacen uso de la movilidad eléctrica. El costo de este tipo de instalaciones, incluyendo el equipo y la obra, es de alrededor de 5 millones, lo cual sigue siendo elevando, pero según proyecciones de Enel-Codensa, se espera que para 2021 se hayan instalado y vendido más de 2000 puntos de recarga particulares [57].

Conclusiones

En este libro se abordaron temáticas relacionadas con las consideraciones de diseño preliminar que se deben tener en cuenta a la hora de construir un cargador de baterías de mediana y baja capacidad, capaz de operar en diferentes condiciones, en un amplio rango de tensiones, haciéndolo útil para distintas aplicaciones, domésticas e industriales. Además, se resaltó la importancia de salvaguardar las condiciones de calidad de energía de la red eléctrica, teniendo en cuenta que el cargador es en sí una carga no lineal.

En consecuencia, el libro presentó de manera clara, sistemática y conducente aspectos claves como tipos de baterías utilizadas en VE; vehículos eléctricos más comunes en el mercado colombiano, normatividad nacional e internacional en relación con los cargadores de baterías y su efecto sobre la calidad de la energía. Para finalizar, se realizó un análisis comparativo de las topologías de conversión de potencia más comunes a usar en el cargador, basándose en argumentos económicos, electrónicos, de eficiencia y conveniencia, además de estudios previos realizados por la comunidad científica.

Dicho análisis comparativo permitió, a nivel de simulación, identificar que la topología *bridgeless* es la que mejor rendimiento presenta para cada una de las variables a evaluar, además de ofrecer mayor facilidad en el control. Sin embargo, al considerar el valor de los elementos, especialmente el del condensador de salida, se ve la dificultad su implementación, pues su valor es del orden de cientos de milifaradios y si se suma al hecho de que debe soportar tensiones superiores a los 400 V, hace que dicha topología se vuelva inviable.

Por otra parte, teniendo en cuenta el buen desempeño presentado por el *Boost*, pese a que su mayor inconveniente es que la tensión de salida es igual o superior a la tensión de entrada, se hace conveniente conectar en cascada otro convertidor que permita la regulación de la tensión de salida a valores propios de la carga, esperando de esta forma una reducción del valor de la capacitancia de salida que presenta el convertidor *bridgeless*, mientras se reduce la eficiencia. Esta etapa de conversión conectada en cascada debería ser en principio de tipo reductor (*Buck*) y se deja al lector su exploración.

Referencias

- [1] S. Dhameja, *Electric Vehicle Battery System*, Boston, Oxford, Johannesburg. Newnes, vol. 1, pp. 44-45.
- [2] J. C. Viera, *Carga rápida de baterías de Ni-Cd y Ni-MH de media y gran capacidad, análisis síntesis y comparación de nuevos métodos*, tesis Ph. D., Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Sistemas. Universidad de Oviedo, España. 2003.
- [3] Lu, X. et al., *Liquid-Metal Electrode to Enable Ultra-Low Temperature Sodium–Beta Alumina Batteries for Renewable Energy Storage*, Nature communications, pp. 1-8, ag. 2014.
- [4] S. Ali, “Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives”, *Illinois Institute of Technology, INCEMIC 2005. 10th International Conference on*, vol. 1, no. 1, pp. 24-25 nov. 2008.
- [5] D. Linden, T. Reddy, *Handbook of Batteries*, McGraw Hill handbooks. Tercera edición. 2002.
- [6] E. Karden, S. Buller, R. De Doncker, *A Method for Measurement and Interpretation of Impedance Spectra for Industrial Batteries*. ISEA. 2004.
- [7] K. Rajashekara, “Present Status and Future Trends in Electric Vehicle Propulsion Technologies”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, no. 1, pp. 3-10, mzo. 2013.
- [8] H. Zhang, Y. Wang, H. Qi, J. Zhang, “Active Battery Equalization Method Based on Redundant Battery for Electric Vehicles”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 8, pp. 7531-7543, ag. 2019.
- [9] M.A. Hannan, M.S.H. Lipu, A. Hussain, A. Mohamed, “A Review of Lithium-Ion Battery State of Charge Estimation and Management System in Electric Vehicle Applications: Challenges and Recommendations”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 834-854, oct. 2017.

- [10] R. Xiong, Y. Zhang, J. Wang, H. He, S. Peng, M. Pecht, “Lithium-Ion Battery Health Prognosis Based on a Real Battery Management System Used in Electric Vehicles”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 5, pp. 4110- 4121, my. 2019.
- [11] H.-F. Wang, Q. Xu, *Materials Design for Rechargeable Metal-Air Batteries*, Matter, vol. 1, no. 3, pp. 565-595, sept. 2019.
- [12] J. Martínez-Lao, F. G. Montoya, M. G. Montoya, F. Manzano-Agugliaro, “Electric Vehicles in Spain: An Overview of Charging Systems”, *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 970-983, sept. 2017.
- [13] B. Sun, X. Sun, D. H. K. Tsang, W. Whitt, “Optimal Battery Purchasing and Charging Strategy at Electric Vehicle Battery Swap Stations”, *European Journal of Operational Research*, vol. 279, no. 2, pp. 524-539, 2019.
- [14] Sitio oficial de Renault. [Internet]. Disponible en <https://www.renault.co.uk/electric-vehicles/twizy/equipment.html>
- [15] Sitio oficial de BYD. [Internet]. Disponible en <http://HYPERLINK%20http://www.byd.com/la/auto/e6.html>
- [16] Sitio oficial de Mitsubishi. [Internet]. Disponible en <http://www.mitsubishicars.com/imiev/features/safety-and-warranty>
- [17] Sitio oficial de BMW. [Internet]. Disponible en <http://www.bmwusa.com/bmw/bmwi/i3>
- [18] Diario Motor, “Renault ZOE” (2019). [Internet]. Disponible en <https://www.diariomotor.com/coche/renault-zoe/>
- [19] ANDI Colombia, “Informe del sector automotriz”, ANDI, my. 2019. [Internet]. Disponible en <http://www.andi.com.co/Uploads/INFORME%20CARROS%20MAYO%202019.pdf>
- [20] Andemos Colombia, “Informe de vehículos 2019-08”, Andemos, ag. 2019. [Internet]. Disponible en <http://www.andemos.org/index.php/2019/09/10/agosto-7/>
- [21] Ministerio de Transporte, Colombia, (28 de agosto de 2019) “Presidente Duque lanza Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica y Sostenible por la calidad del aire y el transporte eficiente”. [Internet]. Disponible en <https://mintransporte.gov.co/publicaciones/7692/>

- presidente-duque-lanza-estrategia-nacional-de-movilidad-electrica-y-sostenible-por-la-calidad-del-aire-y-el-transporte- eficiente/
- [22] A. Burke, *Electrochim. Acta* 53 (2007) 1083 e1091.
- [23] H. J. Kim, S.-Y. Lee, L. H. Sinh, C. S. Yeo, “Maximizing Volumetric Energy Density of All-Graphene-Oxidesupercapacitors and Their Potential Applications for Energy Harvest”, *Journal of Power Source*, vol. 346, pp. 113-119. 2016.
- [24] RETIE Resolución 9 0708 del 30 de agosto de 2013. [Internet]. Disponible en <https://www.retiepdf.com/download/retrie%20actualizado.pdf>
- [25] Norma Técnica Colombiana NTC 2050. [Internet]. Disponible en <https://idrd.gov.co/sitio/idrd/sites/default/files/imagenes/ntc%2020500.pdf>
- [26] IEEE Standard technical specifications of a DC quick charger for use with electric vehicles. IEEE vehicular technology society. 2015.
- [27] IEEE 519-2014 - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.
- [28] IEC Standard 61000-4-7, General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurement and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto.
- [29] IEC Standard 61000-4-30, Power Quality Measurement Methods.
- [30] M. Rashad, D. Mustafa Minhas, M. Ashraf, S. Hussain, “PFC Topologies for AC to DC Converters in DC Micro-Grid”, en *18th Mediterranean Electrotechnical Conference*, pp. 1-6. 2016.
- [31] H. S. Athab, D. D.-C. Lu, “A High Efficiency AC/DC Converter with Quasi Active Power Factor Correction”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 5, pp. 1103-1109, my. 2010.
- [32] A. Marcos P. E. Vidal, A. Cid, L. Martínez, “Loss-free Resistor- Based Power Factor Correction Using a Semi-Bridgeless Boost Rectifier in Sliding-Mode Control”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 10, pp. 5843-5853, oct. 2015.
- [33] S. H. Pini, I. Barbi, “A single-phase high-power-factor rectifier, based on a two-quadrant shunt active filter”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 11, pp. 3131-3143, nov. 2011.

- [34] B. Vinod Kumar, R. K. Singh, R. Mahanty, “Minimum Phase PFC Boost Converter”, *42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 3733-3738. 2016.
- [35] F. Jauch, J. Biela, “Combined Phase-Shift and Frequency Modulation of a Dual-Active-Bridge AC-DC Converter With PFC”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 12, pp. 8387-8397, dic. 2016.
- [36] L. Huber, Y. Jang, M. M. Jovanovic, “Performance Evaluation of Bridgeless PFC Boost Rectifiers”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1381-1390, my. 2008.
- [37] D. Tollik, A. Pietkiewicz, “Comparative Analysis of 1-phase Active Power Factor Correction Topologies”, *14th International Telecommunications Energy Conference*, pp. 515-523. 1992.
- [38] A. F. Souza and I. Barbi, “High Power Factor Rectifier with Reduced Conduction and Commutation Losses”, *Telecommunication Energy Conference INTELEC '99. The 21st International*, 1999, pp. 5.
- [39] K. K.M. Siu, C. N. M. Ho, “A Critical Review of Bridgeless PFC Boost Rectifiers with Common-mode Voltage Mitigation”, *42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2016, pp. 3654-3659.
- [40] J. A. Flores, “Modelado, diseño y simulación de un convertidor CC-CC SEPIC para su utilización en sistemas portátiles (PDAs)”, M. S. tesis. Universidad Carlos III de Madrid, España, 2013.
- [41] Dirección Nacional de Mercadeo y Comunicaciones Uniminuto, (2017), “El Minuto de Dios construye el primer carro eléctrico en Colombia”. [Internet]. Disponible en <http://noticias.uniminuto.edu/-/el-minuto-de-dios-construye-el-primer-carro-electrico-en-colombia?inheritRedirect=true>
- [42] J. Sánchez-Choachi, M. Dávila, C. L. Trujillo, “Development of a High Performance Batteries Charger with low THD, High Power Factor, and High Efficiency”, DYNA, vol. 85, no. 205, pp. 76-82, jun. 2018.
- [43] G. Ramos, I. Melo-Lagos, J. Cifuentes, “High Performance Control of a Three-Phase PWM Rectifier Using Odd Harmonic High Order Repetitive Control”, DYNA, vol. 83, no. 198, pp. 27-36, sept. de 2016.
- [44] G. Mejía-Ruiz, N. Muñoz-Galeano, J. López-Lezama, “Modeling and Development of a Bridgeless PFC Boost Rectifier”, *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 82, pp. 9-21, mzo. 2017.

- [45] A. Berzoy-Llerena, V. Guzman-Arguis, M. Giménez, *et al.*, “Fuzzy Control Techniques Applied to a Three Phase Synchronous Rectifier Current Loop”, *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 74, pp. 23-36, mzo. 2015.
- [46] C. Trujillo, G. Henao, J. Castro, A. Narváez, “Design and Development of a LED Driver Prototype with a Single-Stage PFC and Low Current Harmonic Distortion”, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 8, pp. 1368-1375, ag. 2017.
- [47] A. Fajardo-Jaimes, F. Ojeda-Ruiz, A. Hay-Harb, *et al.*, “Modelamiento de un rectificador en configuración de medio puente con factor de potencia unitario”, *Ingeniería y Universidad*, vol. 13, no. 1, pp. 71-89, ene. 2009.
- [48] J. Bayona, J. Parra, J. Vera, J. Avendaño, “Modeling, Analysis, and Control of a Rectifier With Power Factor Correction in Half-Bridge Configuration”, *Tecciencia*, vol. 8, no. 15, pp. 36-42, jul. 2013.
- [49] L. Hernández, D. Gómez, O. Hernández, “Rectificador monofásico con corrección del factor de potencia usando un convertidor Boost”, *Tecnura*, vol. 16, no. 33, pp. 23-34, jul. 2012.
- [50] D. Campo, H. Vásquez, J. Quintero, “Análisis y simulación de un rectificador trifásico controlado Active Front End (AFE)”, *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 14, no. 27, pp. 257-271, dic. 2015.
- [51] J. Bayona, J. Guarnizo, N. Gélvez, “Pulse Width Prediction Control Technique Applied to a Half-Bridge Boost”, *Tecciencia*, vol. 13, no. 25, pp. 47-54, jun. 2019.
- [52] J. Vanegas, M. Latorre, J. Rairán, “Manual Battery Charger: An Academic Prototype”, *Ingeniería*, vol. 21, no. 1, pp. 83-95, ene. 2016.
- [53] C. Ramos-Paja, A. Saavedra-Montes, J. Bastidas-Rodríguez, “Cargador de baterías fotovoltaico con control por modos deslizantes y limitación de la derivada de corriente de carga”, *TecnoLógicas*, vol. 21, no. 42, pp. 129-145, ag. 2018.
- [54] M. A. Ríos, N. M. Peña, G. A. Ramos, “Load Demand Profile for a Large Charging Station of a Fleet Of All-Electric Plug-In Buses”, *The Journal of Engineering*, vol. 2014, no. 8, pp. 379-387, jun. 2014.
- [55] M. Dávila, C. Trujillo, E. Gaona, “Algoritmo de programación para gestionar la demanda de cargadores de baterías para vehículos eléctricos

en un esquema de tarificación variable”, *Información Tecnológica*, vol. 30, no. 4, pp. 135-146, ag. 2019.

- [56] Celcia Colombia, (2019, jun.15), “Celsia y Haceb lanzan la primera estación de recarga de vehículos eléctricos para hogares, hecha en Latinoamérica”. [Internet]. Disponible en <https://www.celsia.com/es/sala-prensa/celsia-y-haceb-lanzan-la-primer-a-estaci243n-de-re-carga-de-veh237culos-el233ctricos-para-hogares-hecha-en-latinoam233rica>
- [57] Portafolio Colombia, (2019, jul. 4), “Colombia lidera el mercado de vehículos eléctricos particulares”. [Internet]. Disponible en <https://www.portafolio.co/economia/colombia-lidera-el-mercado-de-vehiculos-electricos-en-la-region-531242>

Autores

César L. Trujillo R.

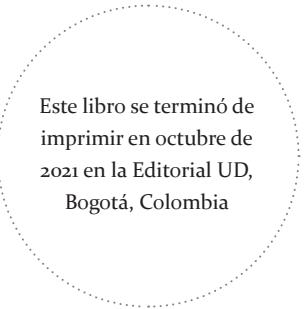
Profesor titular de la Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Johan S. Sánchez C.

Ingeniero electrónico. Investigador del grupo de investigación Laboratorio de Investigación de Fuentes Alternativas de Energía (LIFAE), Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Miguel Á. Dávila R.

Ingeniero electrónico, investigador del grupo de investigación Laboratorio de Investigación de Fuentes Alternativas de Energía (LIFAE), Universidad Distrital Francisco José de Caldas.



Este libro se terminó de
imprimir en octubre de
2021 en la Editorial UD,
Bogotá, Colombia