



**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

Escuela de Ingeniería en Electrónica

**Desarrollo de una propuesta de un sistema de carga interno para vehículos eléctricos.**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica  
con el grado académico de Licenciatura**

Javier Alonso Barboza Valverde

II Semestre

Cartago, 22 de noviembre de 2018

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**  
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

**Defensa de Proyecto de Graduación**  
**Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica**  
**Grado Académico de Licenciatura**  
**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado Desarrollo de una propuesta de un sistema de carga interno para vehículos eléctricos, realizado por el señor Javier Alonso Barboza Valverde y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador

  
\_\_\_\_\_

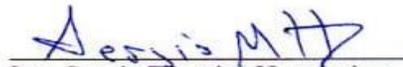
M.Sc. Miguel Hernández Rivera

Profesor lector

  
\_\_\_\_\_

Ing. Marvín Hernández Cisneros

Profesor lector

  
\_\_\_\_\_

Ing. Sergio Morales Hernández

Profesor asesor

Cartago, 22 de Noviembre, 2018

### **Declaración de autenticidad**

Declaro que el presente proyecto ha sido realizado por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema, así como la información que haya suministrado al Instituto Tecnológico de Costa Rica para que se realizará el proyecto, y aplicando e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



---

Javier Alonso Barboza Valverde  
Cédula: 2-0739-0636

Cartago, 22 de Noviembre de 2018

## Resumen

Este trabajo de fin de grado tiene como objetivo el diseño de un convertidor elevador (Boost) con corrección del factor de potencia, que servirá de base para la propuesta de un sistema de carga interno de un vehículo eléctrico, para su posterior construcción en semestres futuros.

Además, se pretende que con este proyecto, se logre entregar al Laboratorio de Investigación en Vehículos Eléctricos, una propuesta funcional de un sistema de carga de un vehículo eléctrico, para que, se impulse de gran forma la movilidad eléctrica de Costa Rica.

En este documento, se presenta el estudio completo de la solución propuesta, desde el diseño hasta su simulación en tiempo real, usando la herramienta llamada MATLAB, la cual permite controlar y aproximar este proyecto a un entorno físico.

Como principal contribución, se presenta una corrección del factor de potencia en la carga de la batería, para obtener un circuito en el cual se maximice el uso de corriente y tensión a la salida del sistema, ayudando de cierta forma a controlar mejor el voltaje y la corriente con un rizado mínimo.

Este sistema toma en cuenta distintas etapas para la obtención del proceso de carga por encima del 95% de la batería, usando una rectificación de corriente alterna a continua, un convertidor CD/CD Boost, el cual es capaz de controlar la tensión y corriente de salida.

Además, mediante el método de control de corriente promedio y el control de potencia en la salida del sistema, se ayuda a conseguir un factor de potencia de 0.99, maximizando la vida útil de la batería.

**Palabras Clave:** Convertidor CD/CD Boost, control promedio de corriente, factor de potencia, tensión, corriente, batería, MATLAB, vehículo eléctrico, corriente alterna, corriente continua, rizado, ciclo de trabajo.

## Abstract

The purpose of this project is the design of a boost converter (Boost) with correction of the power factor, which will serve as the basis for the proposal of an internal charging system of an electric vehicle, that can be implemented in future semesters.

In addition, it is intended that with this project, it is possible to deliver to the Electric Vehicle Research Laboratory, a functional proposal of a charging system for an electric vehicle, so that the electric mobility of Costa Rica can be greatly impelled.

In this document, the complete study of the proposed solution is presented, from the design to its simulation in real time, using the tool called MATLAB, which allows to control and approximate this project to a physical environment.

As a main contribution, a correction of the power factor in the battery charge is presented, to obtain a circuit in which the use of current and voltage at the output of the system is maximized, helping in some way to improve the control of the voltage and the current with a minimum ripple.

This system takes into account different stages for obtaining the charging process above 95% of the battery, using rectification of alternating current to direct current, a DC / DC converter Boost, which is able to control the voltage and current output

In addition, with the use of the average current control method and power control at the output of the system, it helps to achieve a power factor of 0.99, maximizing the useful life of the battery.

**Keywords:** DC/DC Boost converter, average current mode control, power factor, voltage, current, battery, MATLAB, electric vehicle, altern current, direct current, ripple, duty cycle.

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo principalmente a mi padre † Jorge Armando Barboza Quesada, que a pesar de nuestra distancia física, siento que está siempre conmigo y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido tan especial para él como lo es para mí.

También dedico este trabajo a mi madre Ana Lucía, mi hermano Jorge y mis hermanas María Lucía y Graciela, ya que sin su ayuda no hubiera podido llegar hasta donde lo logré, con sus esfuerzos y consejos me llevaron hacia adelante, siempre demostrándome su cariño y apoyo incondicional en todo momento.

Finalmente, a mis familiares, amigos y a mi novia que me apoyaron en todo momento, también les dedico este trabajo.

## **Agradecimientos**

Este proyecto final de grado tuvo el alcance y aporte logrado gracias a la colaboración de grandes personas, quienes me ofrecieron su amplia experiencia, amabilidad y apoyo.

Agradezco inmensamente a mi asesor Sergio Morales Hernández, quien, gracias a su apoyo y asesoramiento brindado en cada uno de los pasos de este proyecto, fue posible su finalización. Así mismo, le agradezco por su sensatez, siendo éste un gran valor adoptado para mi desarrollo profesional y personal.

Además, agradezco a mis lectores Marvin Hernández y Miguel Hernández, los cuales me brindaron ayuda, y guía para poder terminar con éxito el trabajo desarrollado.

También agradezco al ingeniero Juan Carlos Jiménez, quién gracias a su ayuda y apoyo pude lograr la comprensión de gran parte de la electrónica de potencia presente en la elaboración del proyecto.

Un especial agradecimiento a mi familia, amigos y a mi novia por su amplio apoyo, colaboración y entrega en cada una de las actividades que realicé durante esta investigación

Finalmente, agradezco a los docentes de la Escuela de Ingeniería en Electrónica, por el gran crecimiento profesional que me hicieron obtener a lo largo de los años en la carrera.

## ÍNDICE GENERAL

.....	I
.....	II
Resumen.....	III
Abstract .....	IV
Dedicatoria .....	V
Agradecimientos .....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
Capítulo 1. Introducción. ....	1
1.1. Entorno del proyecto. ....	1
1.2. Análisis del problema. ....	2
1.3. Alcances del proyecto. ....	3
Capítulo 2. Propuesta de solución. ....	4
Capítulo 3. Marco Teórico. ....	6
3.1. Estudio general de las baterías.....	6
3.1.1. Concepto de Batería .....	6
3.1.2. Terminología básica de baterías.....	7
3.2. Tipos de baterías. ....	9
3.2.1. Batería de plomo – ácido (Pb). ....	10
3.2.2. Batería de Níquel – Cadmio.....	11
3.2.3. Batería de Níquel – Hidruro Metálico (Ni-MH).....	11
3.2.4. Batería de Litio – Ion (Li-ion). ....	12
3.2.5. Ultracondensador y Condensador de Ion – Litio.....	13
3.3. Escogencia del tipo de batería.....	13
3.4. Métodos de Carga. ....	14
3.4.1. Carga por tensión constante. ....	14
3.4.2. Carga por corriente constante.....	15
3.4.3. Carga por corriente y tensión constante.....	16
3.4.4. Carga por pulsos. ....	17

3.4.5. Carga de flotación.....	17
3.4.6. Carga aleatoria.....	17
3.4.7. Otros tipos de carga .....	18
3.5. Escogencia del método de carga.....	18
3.6. Convertidores CD/CD.....	18
3.6.1. Convertidor CD/CD Buck. ....	19
3.6.2. Convertidor CD/CD Boost.....	19
3.6.3. Convertidor CD/CD PFC Boost.....	20
3.6.4. Escogencia del convertidor CD/CD.....	21
Capítulo 4. Diseño del sistema de carga interna del vehículo eléctrico.....	21
4.1. Análisis de las ecuaciones del convertidor CD/CD de tipo Boost.....	21
4.1.1. Análisis del circuito con el interruptor cerrado.....	22
4.1.2. Análisis del circuito con el interruptor abierto.....	23
4.1.3. Rizado de la tensión de salida.....	26
4.2. Requerimientos y dimensionado del convertidor CD/CD de tipo Boost.....	28
4.3. Diseño del sistema de carga interna en MATLAB.....	30
4.3.1. Etapa de rectificación con filtrado.....	32
4.3.2. Convertidor CD/CD Boost con control promedio de corriente.....	33
4.3.3. Sistema de carga del vehículo eléctrico.....	36
Capítulo 5. Análisis y resultados del sistema de carga.....	39
5.1. Proceso de carga con tensión de entrada de 250V.....	39
5.1. Proceso de carga con tensión de entrada de 110V.....	47
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.....	52
6.1. Conclusiones.....	52
6.2. Recomendaciones.....	53
Bibliografía .....	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2. Propuesta de solución.

- Figura 2. 1.** Diagrama de bloques básico de la solución propuesta..... 4  
**Figura 2. 2.** Diagrama de bloques detallado de la solución propuesta. .... 5

### Capítulo 3. Marco Teórico.

- Figura 3. 1.** Circuito equivalente simplificado de una batería [8]..... 7  
**Figura 3. 2.** Esquema simplificado de un acumulador eléctrico [8]. .... 9  
**Figura 3. 3.** Baterías de Plomo – Ácido [11]. .... 10  
**Figura 3. 4.** Proceso de carga por tensión constante [12]. .... 15  
**Figura 3. 5.** Proceso de carga por corriente constante [12]. .... 15  
**Figura 3. 6.** Proceso de carga en el método de tensión y corriente constante [12]..... 16  
**Figura 3. 7.** Proceso de carga por pulsos [12]. .... 17  
**Figura 3. 8.** Circuito convertidor CD/CD Buck [14]. .... 19  
**Figura 3. 9.** Circuito convertidor CD/CD Boost [14]. .... 20

### Capítulo 4. Diseño del sistema de carga interna del vehículo eléctrico.

- Figura 4. 1.** Topología del convertidor CD/CD Elevador o Boost. .... 21  
**Figura 4. 2.** Convertidor CD/CD Elevador con el interruptor cerrado. .... 22  
**Figura 4. 3.** Convertidor CD/CD Elevador con el interruptor abierto. .... 23  
**Figura 4. 4.** Diagrama general del funcionamiento del sistema de carga interno. .... 30  
**Figura 4. 5.** Rectificador con filtro. .... 32  
**Figura 4. 6.** Convertidor Boost con lazo de control cerrado. .... 34  
**Figura 4. 7.** Sistema de Carga de la batería. .... 36  
**Figura 4. 8.** Subsistema del sistema de carga del vehículo eléctrico..... 37  
**Figura 4. 9.** Circuito para el cálculo del factor de potencia..... 38

## Capítulo 5. Análisis y resultados del sistema de carga.

<b>Figura 5. 1.</b>	Onda rectificada con entrada de 250V.....	39
<b>Figura 5. 2.</b>	Entrada y salida del rectificador usando una tensión de alimentación de 250V. .....	40
<b>Figura 5. 3.</b>	Rizado de la tensión de salida del rectificador con tensión de entrada de 250V. .....	40
<b>Figura 5. 4.</b>	Corriente de salida del convertidor CD/CD con entrada de tensión de 250V. .....	42
<b>Figura 5. 5.</b>	Tensión de salida del convertidor CD/CD con entrada de tensión de 250V.	43
<b>Figura 5. 6.</b>	Factor de potencia del convertidor CD/CD con 250V.....	43
<b>Figura 5. 7.</b>	Nivel de carga de la batería.....	44
<b>Figura 5. 8.</b>	Tensión entregada a la batería.....	45
<b>Figura 5. 9.</b>	Corriente entregada a la batería. ....	46
<b>Figura 5. 10.</b>	Factor de potencia final en la carga del sistema del vehículo eléctrico. ....	47
<b>Figura 5. 11.</b>	Tensión de entrada y salida rectificada operando a 110V. ....	47
<b>Figura 5. 12.</b>	Rizado en la tensión de entrada rectificada operando a 110V. ....	48
<b>Figura 5. 13.</b>	Corriente de salida del convertidor CD/CD con entrada de tensión de 110V. .....	48
<b>Figura 5. 14.</b>	Tensión de salida del convertidor CD/CD con entrada de tensión de 110V. .....	49
<b>Figura 5. 15.</b>	Factor de potencia del convertidor CD/CD con 110V.....	50
<b>Figura 5. 16.</b>	Factor de potencia final en la carga del sistema del vehículo eléctrico usando una tensión de entrada de 110V.....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

### **Capítulo 4. Diseño del sistema de carga interna del vehículo eléctrico.**

<b>Tabla 4. 1.</b>	Requerimientos del sistema para el proceso de diseño.....	28
<b>Tabla 4. 2.</b>	Dimensionado del convertidor CD/CD con entrada de tensión de 110V.....	29
<b>Tabla 4. 3.</b>	Dimensionamiento del convertidor CD/CD con entrada de tensión de 250V. .....	29
<b>Tabla 4. 4.</b>	Dimensiones escogidas para el convertidor CD/CD Boost. ....	30
<b>Tabla 4. 5.</b>	Valores comerciales escogidos de los componentes del convertidor CD/CD. .....	33
<b>Tabla 4. 6.</b>	Valores utilizados en los controladores para las constantes PID.....	35
<b>Tabla 4. 7.</b>	Datos utilizados en la batería del sistema de carga. ....	37

### **Capítulo 5. Análisis y resultados del sistema de carga.**

<b>Tabla 5. 1.</b>	Datos de la corriente de salida del convertidor CD/CD. ....	41
<b>Tabla 5. 2.</b>	Datos de la tensión de salida del convertidor CD/CD. ....	42
<b>Tabla 5. 3.</b>	Datos de la corriente de salida del convertidor CD/CD con 110V.....	49
<b>Tabla 5. 4.</b>	Datos de la tensión de salida del convertidor CD/CD. ....	50

## **Capítulo 1. Introducción.**

### **1.1. Entorno del proyecto.**

Las tecnologías desarrolladas en la flotilla vehicular, provocan en consecuencia el incremento en el consumo de energías, el costo de los automóviles y el impacto ambiental; por esta razón, se hace necesario, la implementación de sistemas eficientes en los vehículos, que reduzcan el costo final y que sean ecológicamente amigables. Es necesario pensar en la fabricación de los vehículos eléctricos, como una alternativa viable, ya que pueden compensar un temático costo- beneficio al usuario final, en diversas perspectivas en términos energéticos, económicos y ambientales.

El gobierno actual, ha promovido para que Costa Rica adopte el tema de los vehículos eléctricos (VE), el proyecto de ley N. 19744, Ley de incentivos y promoción para el transporte eléctrico, con ello aspira la reducción de un 67% de la industria petrolera, y dirigir el país hacia carbono neutral. Ese proyecto de Ley propone, una serie de posibles beneficios para incentivar a los costarricenses en la adquisición de este tipo de medio de transporte. A pesar de la situación favorable políticamente en el país, no hay un incentivo que motive a los fabricantes a realizar un sistema interno en el vehículo eléctrico, para reducir los costos; en contrariedad opta por la compra de estos dispositivos de diferentes empresas o instituciones internacionales, provocando un incremento en el precio y dificultad de adquisición y reposición [1].

Razones anteriores, motivan iniciativas por parte del Ing. Sergio Morales (coordinador del Laboratorio de Investigación en Vehículos Eléctricos), a darle un fortalecimiento a la movilidad eléctrica del país, impulsando su producción y demostrando una vez más que Costa Rica puede hacer este tipo de componentes para un vehículo eléctrico.

La posibilidad de adquirir un vehículo de gran escala significativamente es costoso, y en el caso particular de estudio, el Instituto Tecnológico de Costa Rica, no destina fondos de su Plan Operativo para la compra de un vehículo eléctrico, dirigido a la investigación, con el fin de someterse a pruebas y modificaciones en él. Para ello, se busca una alternativa con la Dirección de Administración de Mantenimiento y brinda para estos fines investigativos una donación de una cortadora de zacate tripulada a la Escuela de Ingeniería en Electrónica.

Se determina que este vehículo tiene las dimensiones adecuadas para alcanzar a ser un prototipo de carro eléctrico, en donde puedan generarse pruebas pertinentes y escalamiento real de los sistemas que se diseñen para ser implementados.

Es importante mencionar que el proyecto en cuestión, se desarrolló a cabo en el Laboratorio de Investigación en Vehículos Eléctricos (LIVE) que se encuentra dentro de la Escuela de Ingeniería en Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica, y es el responsable del fortalecimiento y estudio de la movilidad eléctrica dentro del TEC, impulsando el uso de tecnologías amigables con el ambiente y al mismo tiempo al país, en cuánto al avance de Costa Rica hacia la carbono neutralidad se trata [2].

En la Escuela de Ingeniería en Electrónica, existe un proyecto en el Laboratorio de Investigación en Vehículos Eléctricos (LIVE), que pretende modificar o cambiar la tecnología de la cortadora de zacate tripulada, hacia un prototipo de vehículo eléctrico. LIVE recibe colaboración de la Escuela de Ingeniería Electromecánica, para el dimensionamiento adecuado de los motores a utilizar en dicho vehículo, adicionalmente, recibe apoyo de la Escuela de Ingeniería en Diseño Industrial para el diseño de la carcasa del vehículo.

Finalmente, se pretende con este proyecto, motivar iniciativas hacia nuevas tecnologías diseñadas y fabricadas en el territorio costarricense, y se resuelva el problema de tener un alto costo de adquisición de los vehículos eléctricos y las posibles reparaciones que se requerirán si se implementan.

## **1.2. Análisis del problema.**

A nivel mundial los vehículos eléctricos fabricados traen la electrónica de potencia incorporada para realizar el proceso de carga interna de las baterías. Sin embargo, en Costa Rica, no existe una empresa o institución que se involucre en el diseño de dicha electrónica, en consecuencia, se debe traer estos sistemas interiores del vehículo, de otros países, afectando tiempo y costo al usuario final.

Además, los altos costos de los sistemas interiores para vehículos eléctricos hacen un mercado específico, provocando poca demanda para invertir en vehículos con este tipo de funcionalidad.

En el Laboratorio de Investigación en Vehículos Eléctricos, surge la inquietud de poder realizar un vehículo eléctrico desde cero, por lo que se da la unión de varias Escuelas del Instituto Tecnológico de Costa Rica para poder desarrollar esta idea.

A pesar, que se cuenta con una cortadora de zacate con las dimensiones adecuadas para un vehículo eléctrico, en el que se puedan realizar las pruebas y experimentos necesarios para LIVE, en el tema de movilidad eléctrica, ésta es de gasolina, por lo que un cambio en su diseño es urgente.

La problemática principal que tiene la cortadora de zacate para ser convertida en un vehículo eléctrico, es que ésta realiza el proceso de conversión de energía mediante el uso de gasolina y no de electricidad, por la coyuntura mundial, se hace necesario modificar la totalidad de su tecnología vehicular. Además, surge como problemática que en la entrada del sistema de carga de un vehículo eléctrico pueden llegar tensiones eléctricas de alimentación de 110V o 220V.

### **1.3. Alcances del proyecto.**

En el marco de la presente investigación, se pretende como alcance brindar al país una alternativa nacional a la tecnología electrónica presente en los vehículos eléctricos, generando una propuesta de un sistema de procesamiento y almacenamiento de energía con una alta eficiencia. La urgencia de un sistema de este tipo en Costa Rica es inminente, para disminuir costos de adquisición o de reparación, ya que un cargador de este tipo ronda los \$1200-\$1500 dólares e implementando éste en el país tendría una disminución de su valor de al menos \$600 dólares [3].

Además, se pretende como objetivo principal, poder entregarle al Laboratorio de Investigación en Vehículo Eléctricos una propuesta de un sistema de carga interno en un prototipo de vehículo eléctrico, en donde se permita un proceso de conversión y almacenamiento de la energía eléctrica, para que con ello se abran las puertas al mercado costarricense en la temática de este tipo de autos.

Adicionalmente, a nivel específico del alcance de esta investigación, se pretende poder realizar un estudio de la topología de convertidor CD/CD que cumpla con las especificaciones de la batería, así como eficiencia teórica deseada y método de carga requerida para la maximización de la vida útil de ésta. Luego de ello se diseñará un entorno de simulación para los módulos del sistema de carga interno del prototipo de vehículo eléctrico para que después, se dé la validación del proceso de carga de la batería del sistema de carga interno del prototipo de vehículo eléctrico y con ello se pueda alcanzar el cargador interno de la batería deseado para un vehículo eléctrico.

## Capítulo 2. Propuesta de solución.

En esta sección, se presenta la solución propuesta, para la ejecución del proyecto, y con ello el logro de los alcances propuestos de la sección anterior. A continuación, se detalla dicha información.

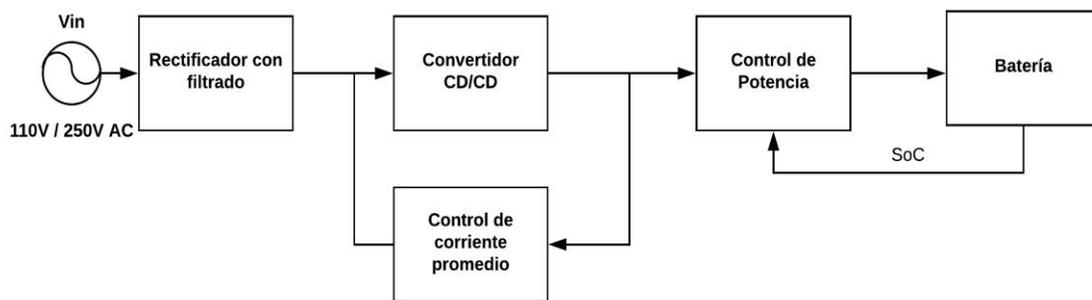
Como ya se mencionó anteriormente, se le quiere poner fin al tema de generar una propuesta viable en Costa Rica, para solucionar el tema de altos costos de envío de repuestos o de reparación de ciertos sistemas de los vehículos eléctricos. Por ello, en este proyecto se desarrolló un sistema de carga interno de un vehículo eléctrico, ya que por lo general, es uno de los sistemas que más se llega a deteriorar, debido a excesos de la carga o mal manejo de su control.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques básico con el que se pretende manejar dicha solución.



**Figura 2. 1.** Diagrama de bloques básico de la solución propuesta.

Tal y como se puede observar en la Figura 2. 1, el cargador interno del vehículo eléctrico por lo general es alimentado por un sistema de carga externo, el cual proporciona tensiones de 220V o 110V en corriente alterna (AC), según lo solicite el usuario. Además, dicho sistema interno deberá de manejar toda la parte de conversión de la energía eléctrica, en donde se tendrá que rectificar la señal de entrada, para su posterior control y de esta forma se dé el almacenamiento de la energía proporcionada por el cargador externo en la batería del vehículo eléctrico. Para una clara explicación de la solución, se procede a detallar el diagrama de bloques, la cual se puede observar en la siguiente figura.



**Figura 2. 2.** Diagrama de bloques detallado de la solución propuesta.

En la propuesta de solución se tendrá un rango de tensiones variado desde los 110V hasta los 250V AC, con los cuales el sistema de carga será alimentado para realizar el proceso de conversión y almacenamiento de la energía.

Además, se tendrá una etapa de rectificación con filtrado, la cual tendrá la función primordial de convertir la corriente alterna en continua para que así la señal sea más fácil de tratar, previniendo picos de tensión o de corriente en la batería [4].

Seguidamente, se mandará la señal rectificada a una etapa de conversión de corriente directa a corriente directa (CD/CD), utilizando un lazo de realimentación de control, esto con el fin que la señal se ajuste a los parámetros deseados de salida para lograr el proceso de carga de la mejor forma posible, maximizando el factor de potencia y por ende la corriente y voltaje de salida del sistema [5], [6].

Luego de estas acciones, se procederá a realizar un control potencia, el cual regulará lo entregado a la batería para que así, se dé el proceso de carga según el rango de tensión de la batería, el cual, se encuentra entre los 300V-436V. Dicho control, tomará en cuenta el SoC (state of charge, por sus siglas en inglés) o estado de carga de la batería, para que así, se le suministre a ésta, solo lo requerido para terminar su proceso de llenado.

Cumpliendo con lo anterior, se ayudaría a LIVE a obtener una propuesta de un sistema de carga interno de un vehículo eléctrico, el cual podrá ser desarrollado a futuro con las intenciones de generar un cambio en el mercado costarricense con esta temática tan amplia, como lo son los vehículos eléctricos, hoy en día.

A continuación, se procederá a explicar en el siguiente capítulo, en el cual se exponen puntos y significados importantes para la comprensión del documento en su totalidad, además, en dicha sección se analizará y escogerá la mejor opción para ciertas etapas del sistema de carga interno.

### **Capítulo 3. Marco Teórico.**

Debido a que se requiere implementar un sistema de carga interno para un prototipo de vehículo eléctrico, en este capítulo, se abordan las distintas temáticas en el ámbito teórico del proyecto y lo que se requiere conocer para la solución eficiente del mismo. A continuación, se presentan las siguientes subsecciones haciendo énfasis en esto.

#### **3.1. Estudio general de las baterías.**

##### **3.1.1. Concepto de Batería.**

Una batería eléctrica o un acumulador eléctrico simplemente conocido como pila, es un dispositivo que permite transformar la energía eléctrica en química y almacenarla usando procedimientos electroquímicos, para que luego ésta pueda ser devuelta en forma de energía eléctrica casi en su totalidad cuando sea necesario, dicho ciclo puede repetirse varias veces dependiendo del tipo de batería utilizada. [7]

### 3.1.2. Terminología básica de baterías.

Cabe destacar que para el estudio de las baterías son necesarios varios conceptos previos, los cuales ayudarán a entender de una mejor forma el funcionamiento del proceso de carga para cada tipo de acumulador eléctrico, por lo que se tienen las siguientes definiciones:

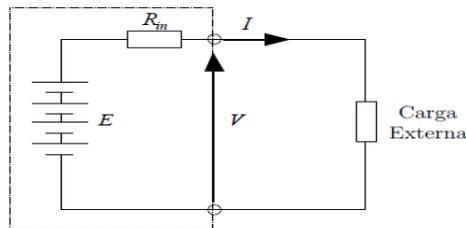
- **Tensión de las baterías y celdas (V):** Según [8], la tensión de una batería va a depender del análisis del circuito equivalente mostrado en la Figura 3. 1, en donde se cumple lo siguiente:

**E:** Representa la tensión de la celda.

**R<sub>in</sub>:** Resistencia interna de la celda.

**I:** Corriente que sale de la batería.

**V:** Tensión en los bornes de la batería.



**Figura 3. 1.** Circuito equivalente simplificado de una batería [8].

Utilizando la ley de voltajes de Kirchhoff en el circuito de la Figura 3. 1, se logra obtener la siguiente ecuación:

$$V = E - I \cdot R_{in} \quad (3.1)$$

Por lo que se tiene de esta forma, que si la celda de la batería está entregando corriente, la tensión (V) disminuye y cuando se está cargando, aumenta. Esto debido al flujo de la corriente (I).

- **Celda:** Es la unidad básica de una batería capaz de poder convertir la energía química en eléctrica. Posee dos electrodos, siendo uno de ellos positivo y el otro negativo, los cuales se encuentran sumergidos en un electrolito común, aislados por separadores y conectados entre sí [7].

- **Capacidad de Carga (C):** Corresponde a la cantidad de energía eléctrica que proporciona la batería en un período de tiempo con ciertas condiciones específicas dadas [7]. Utiliza como unidades de medida son los Ampere-hora (Ah).

Este concepto puede ser ampliado mediante el siguiente ejemplo: Según [8], si una batería tiene una capacidad de 10Ah, quiere decir que en teoría puede entregar 1 Ampere (A) por 10 horas, 2 A por 5 horas o cualquier otra combinación que al final sume los 10Ah. No obstante, la capacidad de carga en la práctica no ocurre con esta linealidad, ya que es afectada por la velocidad en que es removida la carga.

- **Energía Almacenada (E):** Se da gracias al producto de la capacidad de carga y la tensión de la celda, además ésta varía, dependiendo la velocidad con que es extraída la energía. Utiliza las unidades VAh o Watt-hora (Wh) [8]. Ésta se puede representar mediante la siguiente ecuación:

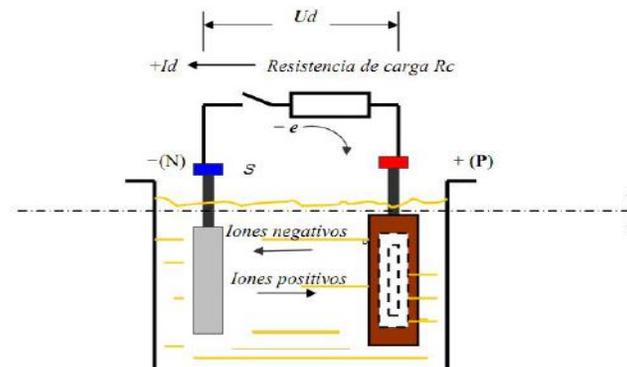
$$E = V \cdot C \quad (3.2)$$

- **Electrolito:** Es una sustancia que contiene iones libres, la cual actúa como medio conductor [7].
- **Carga:** Según [7], es el proceso de proporcionarle a las celdas de las baterías energía eléctrica, con el fin de convertirla en energía química almacenada.
- **Ciclo:** Es la secuencia de una carga y una descarga de una celda [7].
- **Descarga:** Es el proceso en el cual una celda pierde energía eléctrica, provocando un descenso de tensión en la misma [7].
- **Tensión nominal:** Es la tensión eléctrica de una celda cargada completamente [7]
- **Eficiencia de carga ( $\eta_a$ ):** Su valor varía dependiendo del tipo de batería, temperatura t velocidad de carga [8]. Además, cumple con la siguiente relación:

$$\eta_a = \frac{\text{Energía entregada por la batería}}{\text{Energía que recibe la batería}} \quad (3.3)$$

- **Ciclos de vida:** Según [9], es el número de veces en el cual una batería puede cargarse y descargarse, antes que su tensión eléctrica empiece a disminuir hasta un 80% de la capacidad nominal de la batería.
- **Resistencia Interna:** Es la oposición al flujo de corriente en el interior de una celda de la batería. Se utilizan los Ohm ( $\Omega$ ) como unidad de medida [7].

Teniendo en cuenta los anteriores conceptos, según [10] es posible ampliar la definición de batería, la cual se conforma por dos o más celdas eléctricas conectadas. Las celdas son capaces de convertir la energía química en eléctrica, además están constituidas por un electrodo positivo o cátodo, un electrodo negativo o ánodo y electrolitos, los cuales permiten que los iones se muevan entre los electrodos, ayudando a que se logre dar el flujo de corriente fuera de la batería para llevar a cabo su tarea. Esta explicación se representa mediante la Figura 3. 2.



**Figura 3. 2.** Esquema simplificado de un acumulador eléctrico [8].

### 3.2. Tipos de baterías.

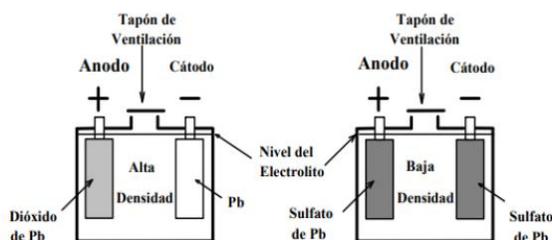
Es importante decidir cuál de las tecnologías de baterías es la más adecuada para su utilización en el prototipo de vehículo eléctrico. Algunos aspectos de los acumuladores eléctricos deberán ser tomados en cuenta para encontrar el mejor tipo de pila, por ejemplo, como lo es la velocidad de carga, el precio, ventajas y desventajas de ellas, entre otros.

Por esta razón, se presentará a continuación los distintos tipos de baterías, analizando cada una de las partes anteriormente mencionadas.

### 3.2.1. Batería de plomo – ácido (Pb).

Este tipo de acumulador eléctrico es uno de los más antiguos y comunes en los vehículos convencionales, utilizados por lo general como baterías de arranque. Las tensiones eléctricas habituales corresponden a 6 V, 12 V u otro múltiplo de 2, ya que la tensión que le es entregada a cada celda es de 2 V [10].

Además, están compuestas por un cátodo de dióxido de plomo y un ánodo de plomo, sumergidas en una solución de ácido sulfúrico y agua destilada que toma la función de electrolito [11], tal y como se observa en la Figura 3. 3. Este tipo de acumuladores eléctricos tienen elevada intensidad de corriente y, por tanto, una alta potencia. Dicha propiedad es muy útil en los periodos de aceleración en los vehículos eléctricos (VE), siendo una ventaja que es importante de rescatar [9].



**Figura 3. 3.** Baterías de Plomo – Ácido [11].

Las baterías de plomo – ácido tienen típicamente entre 400 y 800 ciclos de carga y descarga, por lo que esto reduce la vida media de estos acumuladores cuando se utilizan en vehículos eléctricos [9].

Según [11], a pesar de que estos acumuladores eléctricos tienen costos muy bajos, rendimientos elevados y tecnología fácil de implementar, poseen ciertas desventajas las cuales son importantes de recalcar, ya que éstas hacen que no sean una opción ideal para usar en vehículos eléctricos, teniendo entre ellas las siguientes:

- Baja densidad energética.
- Tiempos de recarga elevados.
- Están compuestas por materiales muy tóxicos y perjudiciales para el ambiente.
- La no admisión de sobrecargas ni descargas profundas.

### **3.2.2. Batería de Níquel – Cadmio.**

Según [11], este tipo de baterías tienen como cátodo el hidróxido de níquel y como ánodo el cadmio. Estos acumuladores presentan un buen rendimiento a bajas temperaturas y una vida útil bastante moderada, además de presentar dentro de sus principales ventajas una velocidad de carga elevada, haciéndola altamente competitiva.

Aunque presentan muchas ventajas, éstas actualmente no son utilizadas en los vehículos eléctricos, debido a la alta toxicidad del cadmio usado en la reacción química de la batería. Además, presentan un típico error en el cual, si no se realizan debidamente los ciclos de carga y descarga se suelen presentar pérdidas importantes en la capacidad de la pila [11].

Además, la tensión nominal de la celda típicamente es de 1.2 V, siendo esta tensión muy baja frente a las baterías de plomo – ácido. También, es capaz de alcanzar cerca de 1200 ciclos de carga y descarga antes que la capacidad de la pila llegue al 80% y empiece a decaer [8].

### **3.2.3. Batería de Níquel – Hidruro Metálico (Ni-MH).**

Las baterías de este tipo están conformadas por un cátodo de níquel, y un ánodo constituido por aleaciones de materiales no dañinas para el ambiente. Éstas presentan un cambio respecto a las de níquel – cadmio, puesto que al utilizar otra sustancia en el ánodo, permitió aumentar la sensibilidad a la temperatura, pero a su vez disminuyó su rendimiento, siendo esto una desventaja muy grande y que baja su competitividad frente a las otras tecnologías ya mencionadas [11].

Además, estos acumuladores reducen el daño ambiental debido a la eliminación del cadmio como cátodo, tienen una potencia y energía específica mayor que las anteriores, pero como consecuencia se da una limitación del voltaje o capacidad de recarga, haciendo que el tiempo para que la batería se cargue por completo se alargue, incrementando así la corriente y la temperatura, imposibilitando el uso de toda su energía [10].

Cada pila de Ni-MH puede llegar a un rango entre 500 y 700 ciclos de carga y descarga, siendo esto una desventaja clara para llegar a utilizar este tipo de baterías en un vehículo eléctrico. Además, el voltaje que puede proporcionar cada acumulador ronda los 1.2 V [10].

En la actualidad, estas baterías han sido utilizadas en la fabricación de vehículos híbridos de combustión interna – eléctrico, tal y como lo es el Toyota [9], pero su elevado costo y moderado número de ciclos de vida, hace que no sean una opción a considerar para un vehículo completamente eléctrico.

#### **3.2.4. Batería de Litio – Ion (Li-ion).**

Según [11], estas baterías están conformadas por lo general, por un ánodo de carbono, litio o titanato y su cátodo puede ser de ion manganeso, fosfato de hierro u óxido de cobalto, cambiando sus características específicas dependiendo de los materiales con los que fue fabricado.

Este tipo de batería es una de las más usadas actualmente para la fabricación de vehículos eléctricos, dentro de los cuales destacan el BMW i3, Nissan Leaf, Peugeot Ion, entre otros. Por lo general, estos acumuladores según [11], [10] y [9] son los más deseados por sus numerosas ventajas, dentro de las que se tienen:

- Una vida útil entre 800-2000 ciclos de carga y descarga.
- El uso y la carga del 100% de la capacidad de la batería, por lo que se supone la utilización de toda la potencia de la pila.
- Permiten cargas en cualquier momento, ya que no requieren esperar a que acabe el ciclo completo de recarga.
- El voltaje por cada celda es alto, correspondiendo a un valor aproximado de entre 3 V y 4 V.
- Acumula más carga por unidad de peso y volumen.
- Utilizan carga rápida hasta un 80% de su capacidad, pasando luego a carga lenta, para aumentar la vida útil de la batería.
- Baja toxicidad ambiental.

Aunque estas baterías son las más utilizadas actualmente para vehículos eléctricos, no son del todo ideales, puesto que, presentan ciertas desventajas dentro de las cuales se tiene: un elevado costo y una baja tolerancia al abuso, o sea que si estos acumuladores son sometidos a sobrecargas o sobredescargas tienden a dañarse o perder su capacidad en un tiempo menor al esperado. Pese a que su costo suele ser alto, éste ha ido disminuyendo con el paso del tiempo, debido al aumento de la demanda de las mismas.

### **3.2.5. Ultracondensador y Condensador de Ion – Litio.**

Las principales ventajas del ultracondensador es que poseen una alta densidad de energía, lo cual hace posible que se puedan almacenar las cargas en el campo eléctrico dentro de sus conductores, además de tener una extensa vida útil y un período de carga y descarga rápida, el cual no afecta casi en nada su rendimiento [10].

Las desventajas que hacen que los ultracondensadores no sean considerados en vehículos eléctricos según [10], son las siguientes:

- Baja densidad energética.
- La carga es liberada rápidamente.
- No toda la energía está siempre disponible.

Debido a estas desventajas citadas anteriormente, surgieron los condensadores de ion – litio, puesto que aumentan la densidad energética y la densidad de la potencia, al igual que la tensión, la cual puede estar en un rango entre 2.2 V y 3.8 V [10].

Actualmente, los condensadores de ion – litio han sido utilizados comercialmente en autobuses híbridos en Europa.

### **3.3. Escogencia del tipo de batería.**

Es muy importante la escogencia del tipo de batería, ya que, se puede saber cuáles modos de carga son los más recomendados para utilizar, logrando alargar la vida útil del acumulador eléctrico lo más posible.

Dentro de las características que se tomaron en cuenta para la escogencia del mejor tipo de batería fueron: la capacidad de la pila, el costo económico, cantidad de ciclos de carga y descarga, voltaje de cada celda, el tiempo de carga, entre otras.

La escogencia de la batería de litio-ion se debió a su fácil obtención, su bajo costo en el mercado respecto a las otras. Además, actualmente es una de las más utilizadas en la fabricación de vehículos eléctricos, por lo que abunda la información de éstas y sus modos de carga. También, su baja toxicidad al ambiente hizo la escogencia de ésta mucho más sencilla, puesto que así se disminuiría la contaminación realizada por la misma.

Además, al utilizar la carga rápida hasta un 80% de su capacidad, para cambiar luego a carga lenta, aumenta la vida útil de la batería y a su vez el período de recarga se podría controlar mejor, según el modo seleccionado [10]. Una característica también importante en su escogencia, es el aprovechamiento del 100% de la capacidad de la batería, lo cual ayuda de cierta forma al proceso de fabricación del sistema de carga interna del vehículo eléctrico, haciéndolo más eficiente para el proyecto en cuestión.

### **3.4. Métodos de Carga.**

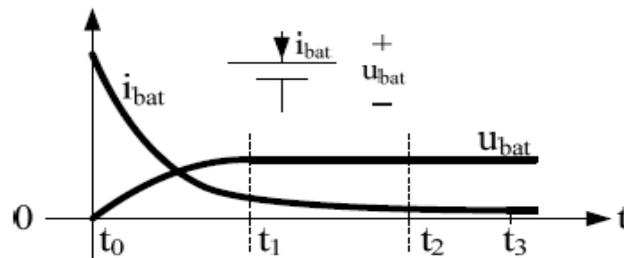
Una vez introducido los conceptos básicos de baterías y sus tipos, es importante tomar en cuenta los diferentes métodos de carga, para así poder realizar un diseño de la mejor forma posible del sistema de carga interna del vehículo eléctrico. Es importante maximizar el rendimiento de éstas, ayudando a colaborar con el proceso electroquímico y a su vez alargar su vida útil. A continuación se presentan los procesos más utilizados.

#### **3.4.1. Carga por tensión constante.**

Este método de carga corresponde prácticamente a una fuente de alimentación de corriente directa (CD), consistiendo en su forma más simple en un transformador de paso de la red con un rectificador, dando una tensión y así se puede cargar la batería [10].

El proceso de carga comienza aplicando una tensión constante, para que así la corriente fluya hacia el acumulador eléctrico, empezando con valores altos en los primeros momentos de la carga, en donde la batería se encuentra casi descargada.

Luego, dicha corriente va disminuyendo conforme el estado de la carga va aumentando, este proceso se puede evidenciar de una forma gráfica en la siguiente figura.

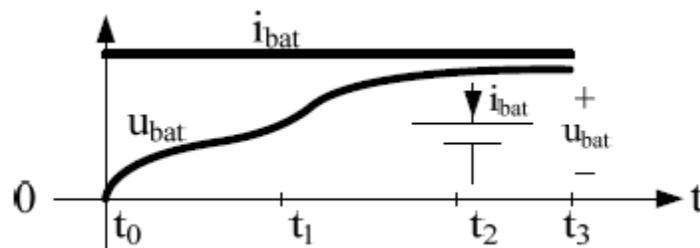


**Figura 3. 4.** Proceso de carga por tensión constante [12].

Aunque este método de carga ocurre de forma rápida, su desventaja incurre en que presenta altos valores de corriente, los cuales causarán efectos negativos en la batería, debido a que no se toman en cuenta los procesos electroquímicos en el interior del acumulador [12].

### 3.4.2. Carga por corriente constante.

Según [12], este método de carga aplica una corriente constante durante todo el proceso de carga de la batería, hasta que su tensión alcance su valor límite superior, tal y como se puede observar en la Figura 3. 5.

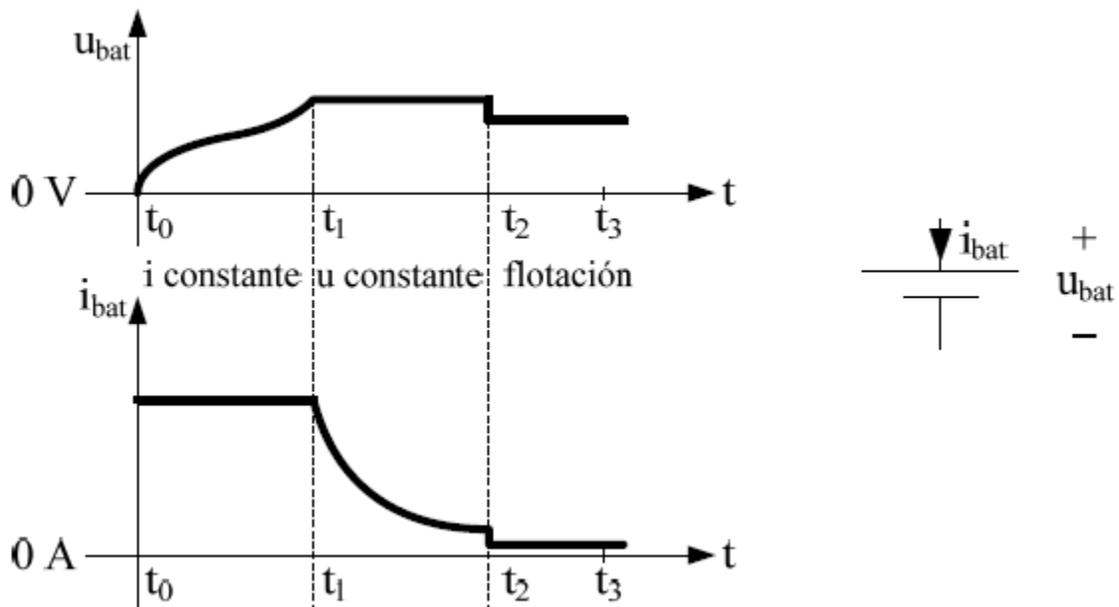


**Figura 3. 5.** Proceso de carga por corriente constante [12].

Este tipo de método utilizado no optimiza el rendimiento de la batería, ya que, presenta la dificultad de establecer el punto de carga completa. Generalmente, es utilizado en baterías de níquel – cadmio y níquel – metal – hidruro [10].

### 3.4.3. Carga por corriente y tensión constante.

Para este método de carga se hace referencia en la siguiente figura, para realizar una mejor explicación de su proceso.



**Figura 3. 6.** Proceso de carga en el método de tensión y corriente constante [12].

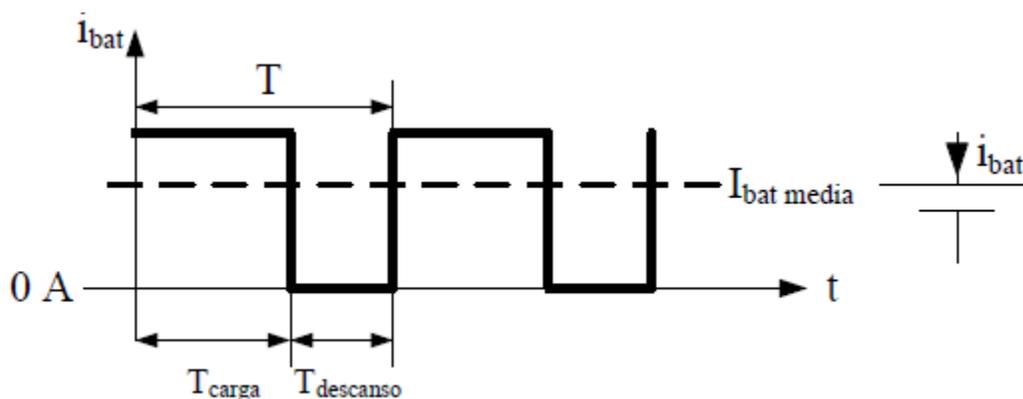
Tal y como se puede apreciar en la Figura 3. 6, el método de carga consiste en aplicar en el primer intervalo de tiempo una corriente constante, hasta que la tensión en la batería llegue al valor específico que se requiere. Luego, se cambia a una tensión constante, ayudando que la corriente se reduzca en cierto grado, y por último se llega un proceso llamado flotación, en el que se reduce un poco el voltaje hasta que se compensen las fugas de la batería [12].

Este método es uno de los más utilizados actualmente para las baterías de litio – ion, ya que ayuda a alargar la vida útil del acumulador y maximiza su proceso de carga, por lo que es la mejor opción de las que se verán en esta sección.

### 3.4.4. Carga por pulsos.

Este tipo de método se basa en poder cargar la batería mediante pulsos de corriente de una cierta duración, ayudando a incrementar el proceso de carga de una forma más eficiente [8].

El proceso de carga según [12], demostrado en la Figura 3. 7 consiste aplicarle un pulso de corriente de hasta un segundo de duración, seguido de un período de no carga de milisegundos.



**Figura 3. 7.** Proceso de carga por pulsos [12].

Además, este proceso se puede llevar a cabo de distintas maneras, cambiando su forma en que son realizados los pulsos, pero todos conservando la base de modificar únicamente la anchura con la que es realizado el pulso.

### 3.4.5. Carga de flotación.

Según [8], la carga por flotación se lleva a cabo manteniendo la batería conectada a una fuente de tensión CD con una tensión inferior al límite superior de la pila, en una forma permanente. Por lo general, solo se realiza en acumuladores de plomo – ácido.

### 3.4.6. Carga aleatoria.

El método de carga aleatoria es uno de los más utilizados en vehículos eléctricos que usan el frenado regenerativo, el cual ayuda de cierta forma al carro a recuperar parte de su carga.

Además, este proceso no se puede dar de una forma controlada, debido a que se generan grandes picos de potencia por el uso de los frenos que la pila debe de absorber, ocurriendo este modo de una manera aleatoria y difícil de predecir [10].

En este tipo de aplicaciones se requieren métodos de control más complicados, debido a la limitación de la corriente de carga o niveles de tensión que se requieren, para que la batería los pueda tolerar y no dañarse [8].

#### **3.4.7. Otros tipos de carga**

Existen otros métodos de carga bastante importantes, los cuales no se toman en cuenta debido a que son especialmente para baterías de plomo – ácido, tal y como la carga IUI, o el método de carga de goteo.

#### **3.5. Escogencia del método de carga.**

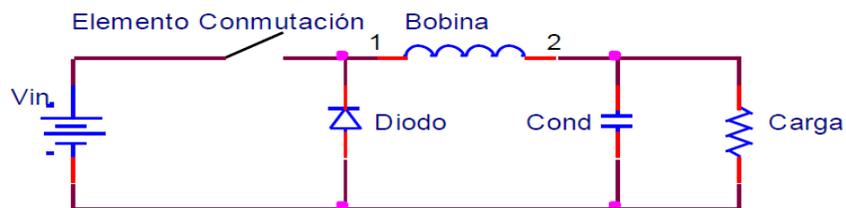
Se requiere un proceso que maximice la vida útil de la batería de litio – ion escogida, al igual que aproveche al mismo tiempo el 100% de la capacidad de la batería, ayudándola en los procesos electroquímicos que ésta tiene, por lo que la opción seleccionada, es el método de carga por corriente y tensión constante.

#### **3.6. Convertidores CD/CD.**

El requerimiento de un convertidor CD/CD en el sistema, que sea altamente eficiente de forma teórica, y que eleve la tensión de salida en un rango de 300V - 436V se vuelve imprescindible en este proyecto. Por lo que, a continuación se presentan los convertidores CD/CD más utilizados en un proceso de carga de un vehículo eléctrico, para que así se dé la debida escogencia de uno de ellos, para la solución implementada.

### 3.6.1. Convertidor CD/CD Buck.

Uno de los convertidores más simples debido a la poca utilización de componentes en su diseño y muy usado, debido a su alto rendimiento es el convertidor CD/CD Buck o Reductor. La función principal de éste es mantener una tensión de salida inferior a la percibida en la entrada del circuito [10], [6], [13]. Este tipo de convertidor por lo general, tiene una eficiencia teórica arriba del 95% permitiendo un gran aprovechamiento de los recursos presentes, además, su esquema básico es presentado en la siguiente figura.

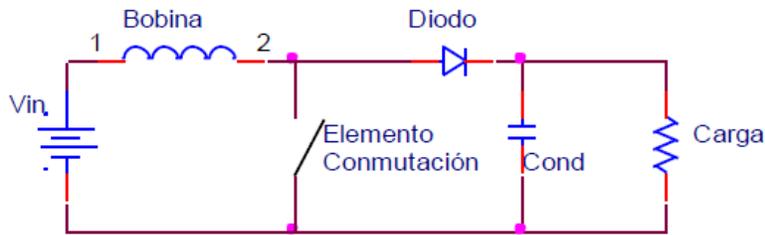


**Figura 3. 8.** Circuito convertidor CD/CD Buck [14].

Este convertidor puede utilizar cualquier método de control citado anteriormente. El único inconveniente y desventaja con esta topología es que no permitirá elevar la tensión por encima de la entrada del sistema, haciéndolo descartable para el proyecto del sistema de carga interno.

### 3.6.2. Convertidor CD/CD Boost.

El convertidor CD/CD Boost o Elevador según [6] y [15], permite elevar la tensión de salida por encima de la entrada, llegándola a rango de voltajes realmente altos según sea deseado y permitido por el ciclo de trabajo. Esta topología presenta una eficiencia teórica mayor al 95% y permite la utilización de los distintos métodos de carga explicados anteriormente. Su configuración básica está representada en la siguiente figura.



**Figura 3. 9.** Circuito convertidor CD/CD Boost [14].

Según [16] este tipo de convertidor utiliza las características del inductor y capacitor para elevar corriente proveniente de la fuente de alimentación, y usarla para inyectarla en el capacitor, produciendo así niveles de tensión mayores que los de la entrada.

Además, el poco uso de componentes electrónicos en su configuración hace que sea una opción viable a utilizar para la fabricación del cargador interno del vehículo eléctrico.

### 3.6.3. Convertidor CD/CD PFC Boost.

Esta topología de convertidor CD/CD es muy similar al Boost Simple, con la mejora que se puede realizar una corrección del factor de potencia. Además, éste permite una reducción de la corriente de carga, de la inductancia a utilizar en el modelo y el estrés en la salida del capacitor, pero tiene la leve desventaja que limita lo que es el nivel de potencia [10].

Aunque su eficiencia teórica está por encima del 97%, es un convertidor muy complejo en estructura, por lo que el uso de más componentes será imprescindible, haciéndolo muy costoso y poco viable para implementar en un sistema de carga, en el cual se pretende realizarlo al costo más bajo posible para competir en el mercado [17].

Además, este convertidor permite trabajar con los métodos de carga citados anteriormente y adicionalmente trabaja un rango de tensiones muy elevadas, por lo que es muy utilizado en la industria de cargadores rápidos de vehículos eléctricos, para procurar dar una eficiencia alta en el sistema, maximizando la carga en el auto.

### 3.6.4. Escogencia del convertidor CD/CD.

La escogencia del convertidor CD/CD se basó en términos de eficiencia teórica, modo de trabajo, y ventajas en cuanto a costo-beneficio y métodos de carga, además de poder cumplir dentro del rango de trabajo de los 300V a los 436V.

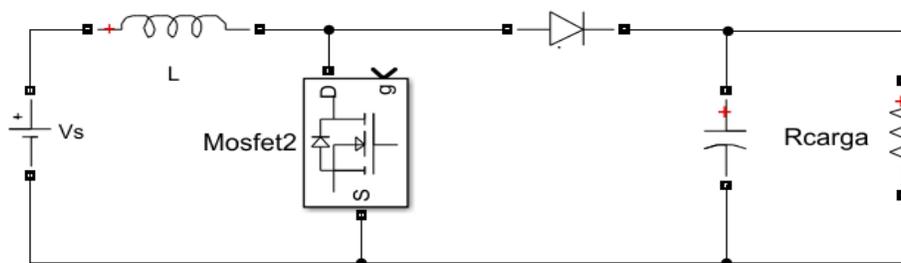
El convertidor seleccionado fue el Boost, ya que éste permite un método de corrección del factor de potencia utilizando un lazo de control promedio de corriente, por lo cual se ahorrarán más componentes y a la vez se maximizará la carga de la batería a valores muy altos. Además, su eficiencia teórica por encima del 95%, lo hizo más funcional de acuerdo a lo que se requiere en el sistema de carga del vehículo eléctrico.

## Capítulo 4. Diseño del sistema de carga interna del vehículo eléctrico.

En la presente sección, se hace hincapié en el diseño del sistema de carga interna del vehículo eléctrico, desde el dimensionamiento del convertidor CD/CD de tipo Boost, hasta el manejo del control de la carga de la batería. Por lo que, a continuación se presentará un análisis de las ecuaciones utilizadas para la escogencia de los componentes del sistema.

### 4.1. Análisis de las ecuaciones del convertidor CD/CD de tipo Boost.

Tomando como referencia el circuito de la Figura 4. 1 y la explicación de los autores de [6], [13] y [14], se realizará el siguiente análisis de la estructura del convertidor CD/CD de tipo Elevador o Boost.



**Figura 4. 1.** Topología del convertidor CD/CD Elevador o Boost.

La estructura del convertidor Elevador se puede observar en la Figura 4. 1, en donde se logra denotar que éste consta de un inductor y un condensador, ubicados en la salida del circuito, los cuales ayudan a mantener la tensión y minimizar el rizado presente en la salida [14].

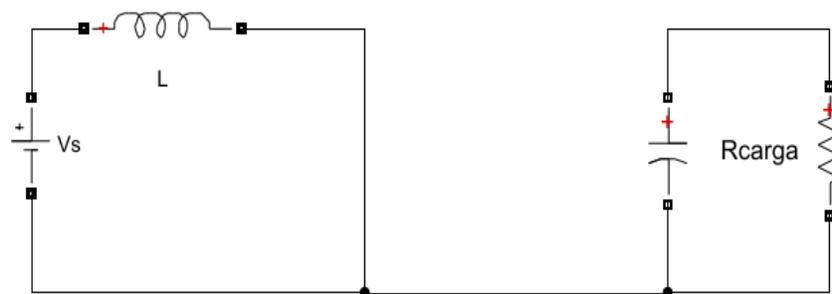
Este convertidor CD/CD utiliza el MOSFET como si fuera un interruptor electrónico, el cual se abre y se cierra en un determinado período de conmutación (T). Se llama de esta forma debido a que la tensión de salida es mayor que la de entrada [6].

El funcionamiento de este convertidor implica dos estados distintos dependiendo de la posición del interruptor electrónico. Los cuales son analizados a continuación:

#### 4.1.1. Análisis del circuito con el interruptor cerrado.

Cuando el interruptor pasa a la posición de cerrado se generan las siguientes acciones según [6] y [14]:

- El diodo queda polarizado en inversa, por lo que la corriente en el inductor aumenta de forma lineal, almacenando energía sin transferirla a la carga, mientras que el condensador se comporta como fuente de alimentación, dando de su energía a la carga y ayudando a que se dé el comportamiento esperado de un elevador.



**Figura 4. 2.** Convertidor CD/CD Elevador con el interruptor cerrado.

Para el análisis de este circuito se toma como referencia la Figura 4. 2. Cuando el interruptor está cerrado genera la siguiente condición en el convertidor:

$$VL = V_s = L \cdot \frac{diL}{dt} \quad (4.1)$$

O también:

$$\frac{diL}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (4.2)$$

Además, la variación de la corriente del inductor es constante, por lo que ésta aumenta linealmente, tal y como se mencionó anteriormente.

$$\frac{\Delta iL}{\Delta t} = \frac{\Delta iL}{DT} = \frac{V_s}{L} \quad (4.3)$$

En donde D es el ciclo de trabajo,  $\Delta iL$  es la variación de la corriente en la bobina y  $V_s$  la tensión en la entrada. Ahora despejando de la ecuación anterior  $(\Delta iL)_{\text{cerrado}}$  se tiene:

$$(\Delta iL)_{\text{Cerrado}} = \frac{V_s \cdot D \cdot T}{L} \quad (4.4)$$

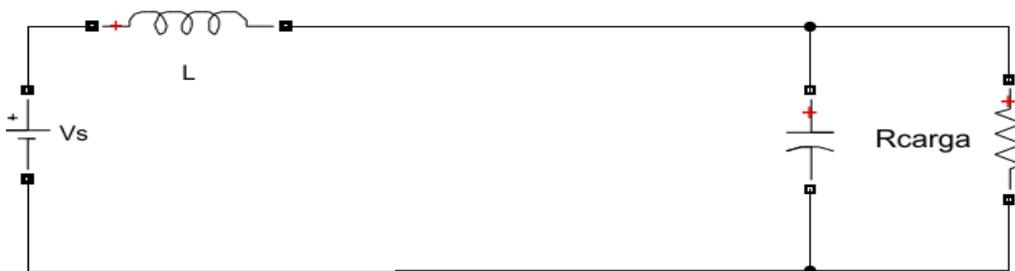
En donde T es el período de conmutación y se puede representar por medio de la siguiente ecuación:

$$T = \frac{1}{f} \quad (4.5)$$

Siendo f la frecuencia de conmutación.

#### 4.1.2. Análisis del circuito con el interruptor abierto.

Para el análisis del circuito convertidor CD/CD de tipo Elevador con el interruptor en la posición de abierto, se utiliza la siguiente figura:



**Figura 4. 3.** Convertidor CD/CD Elevador con el interruptor abierto.

Tal y como se logra observar en la Figura 4. 3, cuando el interruptor está abierto, la corriente en la bobina no puede variar de forma inmediata, por lo que el diodo se ve polarizado en directa alimentando el resto del circuito. Además, la tensión en la bobina será afectada de la siguiente manera:

$$V_L = V_S - V_O = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (4.6)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L} \quad (4.7)$$

Ahora, se sabe que el ritmo de variación en la bobina es constante, por lo que la corriente variará de forma lineal, dicha variación se representa por medio de:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D) \cdot T} = \frac{V_S - V_O}{L} \quad (4.8)$$

$$(\Delta i_L)_{\text{Abierto}} = \frac{(V_S - V_O) \cdot (1-D) \cdot T}{L} \quad (4.9)$$

En régimen permanente, la variación de  $i_L$  debe de ser igual a cero, por lo que:

$$(\Delta i_L)_{\text{Cerrado}} + (\Delta i_L)_{\text{Abierto}} = 0 \quad (4.10)$$

Sustituyendo el valor de la corriente de la bobina con el interruptor en abierto al igual que en cerrado, se tiene lo siguiente:

$$\frac{V_S \cdot D \cdot T}{L} + \frac{(V_S - V_O) \cdot (1-D) \cdot T}{L} = 0 \quad (4.11)$$

Despejando  $V_O$  de la anterior ecuación, se tiene:

$$V_S(D + 1 - D) - V_O(1 - D) = 0 \quad (4.12)$$

$$\boxed{V_O = \frac{V_S}{1-D}} \quad (4.13)$$

Con la ecuación anterior, se puede observar como la tensión de salida es totalmente dependiente de la entrada de voltaje al sistema y el ciclo de trabajo.

Además, la tensión media en la bobina debe ser cero cuando operen en régimen permanente. La tensión media en bobina ( $V_L$ ) en un período de conmutación es:

$$V_L = V_S \cdot D + (V_S - V_O)(1 - D) = 0 \quad (4.14)$$

Despejando  $V_O$  se obtiene:

$$V_S(D + 1 - D) - V_O(1 - D) = 0 \quad (4.15)$$

$$V_O = \frac{V_S}{1 - D} \quad (4.16)$$

Tanto la ecuación 4.13 como la 4.16 demuestran que si el circuito está con el interruptor en estado abierto y el ciclo de trabajo es igual a cero, la tensión de salida será igual a la tensión de entrada. Conforme se aumenta el ciclo de trabajo, el denominador disminuirá y la salida será mayor que la entrada, lo cual demuestra el comportamiento típico de un convertidor CD/CD de tipo elevador [6].

Ahora bien, se sabe que la corriente media en la bobina se puede calcular tomando como base que la potencia entregada por la fuente debe de ser igual a la potencia absorbida por la carga. Por lo que, la potencia en corriente continua en la salida corresponde a:

$$P_O = \frac{V_O^2}{R} \quad (4.17)$$

Y su potencia de entrada corresponde a:

$$V_S \cdot i_S = V_S \cdot i_L \quad (4.18)$$

Igualando ambas potencias, se tiene:

$$V_S \cdot i_L = \frac{V_O^2}{R} = \frac{\left(\frac{V_S}{1 - D}\right)^2}{R} = \frac{V_S^2}{(1 - D)^2 \cdot R} \quad (4.18)$$

Ahora, despejando  $i_L$ :

$$i_L = \frac{V_S}{(1 - D)^2 \cdot R} \quad (4.19)$$

La corriente máxima y mínima en la bobina se determinan usando el valor medio y la variación de la corriente:

$$I_{max} = iL + \frac{\Delta iL}{2} = \frac{V_s}{(1-D)^2 \cdot R} + \frac{V_s \cdot D \cdot T}{2L} \quad (4.20)$$

$$I_{min} = iL - \frac{\Delta iL}{2} = \frac{V_s}{(1-D)^2 \cdot R} - \frac{V_s \cdot D \cdot T}{2L} \quad (4.21)$$

Las ecuaciones 4.13 y 4.16, se hicieron suponiendo que  $iL$  era permanente y positiva, y para que  $iL$  sea permanente se necesita que la corriente mínima sea positiva [6]. Por lo que, este límite entre las corrientes permanente y discontinua en la bobina se calculan con:

$$I_{min} = 0 = \frac{V_s}{(1-D)^2 \cdot R} - \frac{V_s \cdot D \cdot T}{2L} \quad (4.22)$$

O también:

$$\frac{V_s}{(1-D)^2 \cdot R} = \frac{V_s \cdot D \cdot T}{2L} = \frac{V_s \cdot D}{2L \cdot f} \quad (4.23)$$

Por tanto, la combinación mínima de la inductancia y la frecuencia de conmutación para obtener la corriente permanente en el convertidor será:

$$(Lf)_{min} = \frac{D(1-D)^2 \cdot R}{2} \quad (4.24)$$

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 \cdot R}{2f} \quad (4.25)$$

### 4.1.3. Rizado de la tensión de salida.

Por lo general, cuando se lleva un circuito a la práctica o la implementación física se producirá una fluctuación o rizado en la tensión de salida, la cual debe de ser prevenida desde la simulación, por lo que ahora se realiza un análisis con ello, para encontrar la ecuación necesaria para el dimensionamiento del capacitor del convertidor Boost.

El rizado en la tensión de salida puede calcularse a partir de la forma de onda de la corriente en el capacitor y gracias a ello, se sabe que la variación de la carga del condensador, se puede calcular utilizando:

$$|\Delta Q| = \left(\frac{V_o}{R}\right) \cdot D \cdot T = C \cdot \Delta V_o \quad (4.26)$$

En donde, la expresión del rizado es:

$$\Delta V_o = \frac{V_o \cdot D \cdot T}{R \cdot C} = \frac{V_o \cdot D}{R \cdot C \cdot f} \quad (4.27)$$

Siendo  $f$ , la frecuencia de conmutación en Hertz. Además:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{R \cdot C \cdot f} \quad (4.28)$$

Con lo cual, se puede hallar el valor mínimo del capacitor con:

$$C > \frac{D}{R \cdot f \cdot \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right)} \quad (4.29)$$

Por último, dos ecuaciones muy importantes para obtener el ciclo de trabajo mínimo y el máximo en el circuito son:

$$D_{max} = 1 - \frac{V_{smin} \cdot \eta}{V_o} \quad (4.30)$$

$$D_{min} = 1 - \frac{V_{smax} \cdot \eta}{V_o} \quad (4.31)$$

En donde  $\eta$  es la eficiencia del sistema deseada.

De igual forma, las siguientes ecuaciones pueden utilizarse para el dimensionamiento de los componentes del convertidor CD/CD Boost:

$$C_{outmin} = \frac{I_{outmax} \cdot D}{f \cdot \Delta V_{orizado}} \quad (4.32)$$

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta i_L \cdot f} \quad (4.33)$$

$$Rcarga = \frac{V_o^2}{P_o} \quad (4.34)$$

Además, es importante seleccionar el  $\Delta iL$  tal que éste se encuentre dentro del rango de 20% a 40% de la corriente de salida máxima. Teniendo todo esto en cuenta, se procede a mostrar los requerimientos deseados del sistema y su dimensionado.

#### 4.2. Requerimientos y dimensionado del convertidor CD/CD de tipo Boost.

Para cumplir con las características necesarias del convertidor CD/CD, se enlistan los siguientes requerimientos del sistema, para que con ello se dé una aproximación teórica de lo deseado.

**Tabla 4. 1.** Requerimientos del sistema para el proceso de diseño.

Variables	Valores
Rango de tensión de entrada	110V-250V
Frecuencia de conmutación deseada	20kHz
Tensión de salida máxima	436V
Rizado de la tensión de salida máxima	3% de la tensión máxima (13.08V)
Rizado de la corriente de salida máxima	1A
Potencia de salida	Mayor a 3.5kW
Eficiencia esperada	0.99

Elaboración propia.

A continuación se presenta dos tablas resumen de cálculos para el dimensionamiento del convertidor CD/CD Boost, utilizando primeramente una tensión de entrada de 110V y luego otra de 250V para la segunda tabla:

**Tabla 4. 2.** Dimensionado del convertidor CD/CD con entrada de tensión de 110V.

Variabes	Cálculos	Resultado
Ciclo de trabajo máximo	$D_{max} = 1 - \frac{V_{smin} \cdot \eta}{V_o} = 1 - \frac{110 \cdot 0.99}{436}$	Dmax = 0.750229358
Resistencia de carga	$R_{carga} = \frac{V_o^2}{P_o} = \frac{436^2}{4.36 \times 10^3}$	R = 43.6 Ω
Inductor	$L_{min} = \frac{D(1 - D)^2 \cdot R}{2f} = \frac{0.75(1 - 0.75)^2 \cdot 43.6}{2 \cdot 20 \times 10^3}$	Lmin = 51 μH
Condensador	$C > \frac{0.75}{43.6 \cdot 20 \times 10^3 \cdot 0.03}$	C = 86.04 μF

Elaboración propia.

**Tabla 4. 3.** Dimensionamiento del convertidor CD/CD con entrada de tensión de 250V.

Variabes	Cálculos	Resultado
Ciclo de trabajo máximo	$D_{max} = 1 - \frac{V_{smin} \cdot \eta}{V_o} = 1 - \frac{250 \cdot 0.99}{436}$	Dmax = 0.4323394495
Resistencia de carga	$R_{carga} = \frac{V_o^2}{P_o} = \frac{436^2}{4.36 \times 10^3}$	R = 43.6 Ω
Inductor	$L_{min} = \frac{D(1 - D)^2 \cdot R}{2f} = \frac{0.43(1 - 0.43)^2 \cdot 43.6}{2 \cdot 20 \times 10^3}$	Lmin = 267.51 μH
Condensador	$C = \frac{D}{R \cdot f \cdot \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right)} = \frac{0.43}{43.6 \cdot 20 \times 10^3 \cdot 0.03}$	C = 49.58 μF

Elaboración propia.

Se determinó usar una frecuencia de 20 kHz, ya que se encuentra en el espectro no audible para una persona según [18] y [19], ya que en la práctica el inductor suele realizar ciertos ruidos al iniciar el funcionamiento del mismo, los cuales tienden a ser muy molestos y poco deseables en un sistema de este tipo.

Además, se dimensionó el rizado de la tensión a 3%, debido a ciertos documentos como en [20], en donde se recomienda que el rango óptimo para éste sea desde el 1% hasta el 5%. En los cálculos realizados anteriormente para el dimensionado del convertidor CD/CD, se escogió el peor de los casos tanto para el inductor como para el capacitor. Los valores seleccionados para el sistema son los siguientes:

**Tabla 4. 4.** Dimensiones escogidas para el convertidor CD/CD Boost.

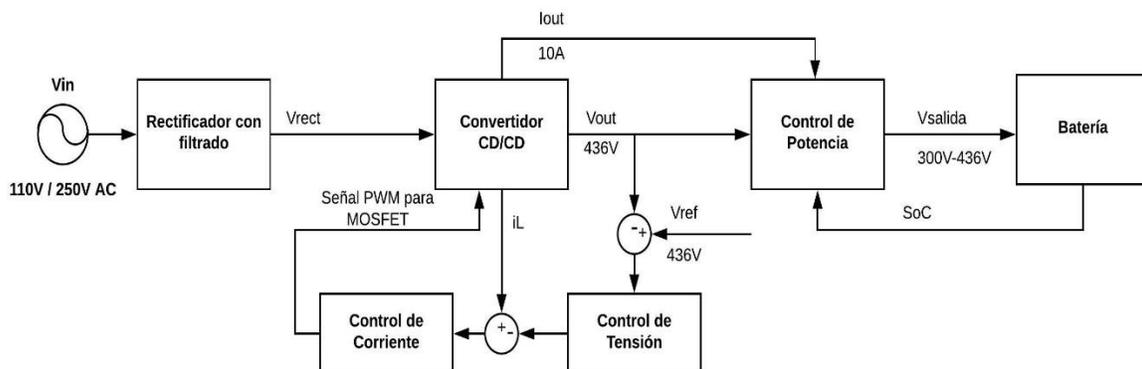
Variables	Usando Dmin	Usando Dmax
Ciclo de trabajo	0.43	0.75
Valor del inductor	267.51 $\mu\text{H}$	
Valor del capacitor	86.04 $\mu\text{F}$	
Resistencia de carga	43.6 $\Omega$	

Elaboración propia.

### 4.3. Diseño del sistema de carga interna en MATLAB.

Para el diseño del sistema de carga interno del vehículo eléctrico, es importante tener la idea general del funcionamiento del circuito muy clara, ya que, con eso se logra un mejor entendimiento de cada parte del cargador.

En la siguiente figura, se detalla con claridad un diagrama de bloques más específico que los vistos en el capítulo 2. A continuación, se realizará una explicación sobre la forma de trabajar del sistema.



**Figura 4. 4.** Diagrama general del funcionamiento del sistema de carga interno.

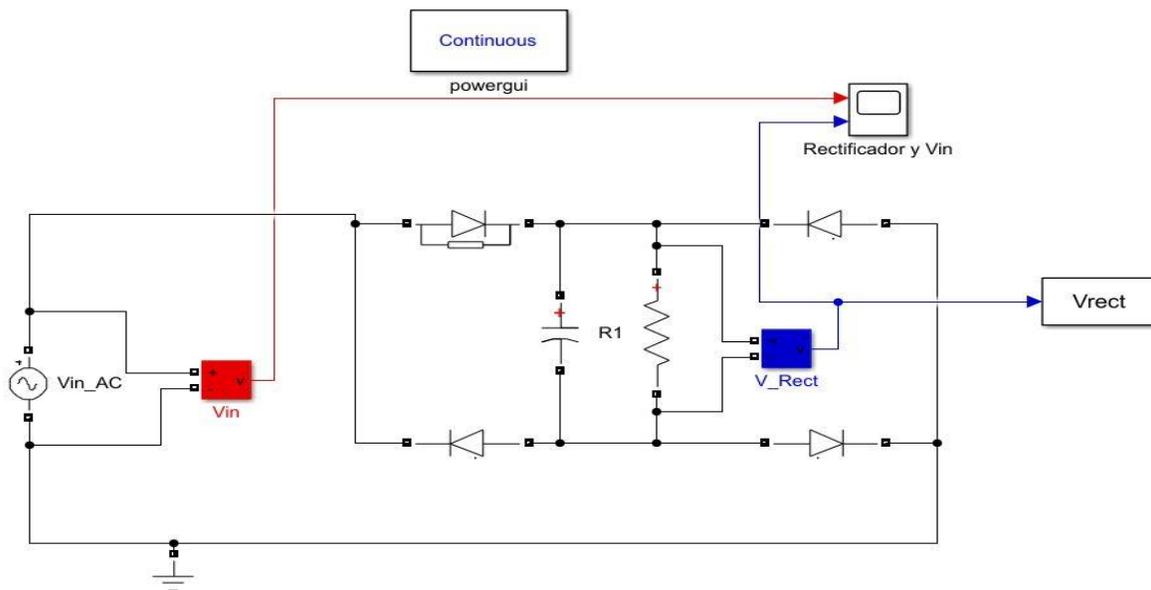
Tal y como se logra apreciar en la Figura 4. 4, la tensión de entrada ( $V_{in}$ ) tiene un rango de trabajo desde los 110V hasta los 250V en corriente alterna. Dicho voltaje es obtenido de un cargador externo al vehículo, el cual podrá dar al sistema 110V ó 220V AC. Posterior a esta etapa, se procede a un proceso de rectificado de la señal, en donde se pasará de corriente alterna a corriente continua para un mejor manejo del sistema a la hora de operar.

Seguidamente, la tensión  $V_{rect}$  alimenta al convertidor CD/CD de tipo Boost, el cuál trata de conseguir una tensión de salida de 436V, mediante un control de lazo cerrado. El lazo para manejar esta tensión al valor deseado es llamado control promedio de corriente, el cual está constituido por dos controles, uno de voltaje y el otro de corriente, y será el responsable de mandar el pulso necesario para variar el PWM, tal que la corriente en el inductor sea controlada y no haya picos de corriente extraños en él y la tensión de salida se regule a los 436V. El funcionamiento de esta parte de control será explicado más adelante con más detalle.

Controlada la tensión de salida al nivel deseado, pasa a una etapa de control de potencia en donde se estará monitoreando el nivel de carga de la batería (SoC), al igual que la tensión y la corriente de entrada en ella, para así variar la carga del sistema según las formas de onda de un método de carga corriente constante - tensión constante.

A continuación se detalla cómo se diseñaron las etapas del sistema, en la herramienta de simulación MATLAB.

### 4.3.1. Etapa de rectificación con filtrado.



**Figura 4. 5.** Rectificador con filtro.

En esta etapa se encuentra la conversión de corriente alterna a corriente continua. Para el diseño de ésta se utilizó un capacitor de  $3600 \mu\text{F}$  y una resistencia de  $300\Omega$  que funcionaron como filtro y a la vez sirvieron para que se mantuviera una tensión CD con un pequeño rizado en la salida de éste.

Además, en el sistema debe de haber un bloque llamado “powergui”, el cuál ayuda a escoger el método de solución que se quiere realizar para el circuito, ya sea en tiempo continuo, discreto o para fasores. Dicho bloque también permite abrir herramientas para el análisis de resultados de estado estable, simulación y diseño avanzado de parámetros [21].

Debido a complicaciones con la herramienta MATLAB, no se pudieron unir los bloques del sistema, tal es el caso del rectificador con el convertidor CD/CD. Esto se debió a que “powergui” solo permite un modo de solución del circuito, y al ser el rectificador solucionado por tiempo continuo y el convertidor en tiempo discreto, hubo una especie de choque de información por lo que se generaban datos extraños en la simulación.

Por la razón anterior se ideó utilizar “simout”, este bloque de MATLAB permite grabar información de una simulación en el workspace, guardando todos los datos en tiempo real dentro de una variable, llamada en este caso Vrect, la cual se puede observar al final del diagrama de la Figura 4. 5 [22].

Luego, dicha variable es llamada de nuevo en el convertidor CD/CD Boost, utilizando otro bloque en MATLAB llamado “simin”, el cual sustrae todos los datos guardados anteriormente en el workspace dentro de la variable Vrect, e ingresa la información obtenida para que se continúe con la simulación en el convertidor, solucionando así el problema de conexión de bloques [23].

#### 4.3.2. Convertidor CD/CD Boost con control promedio de corriente.

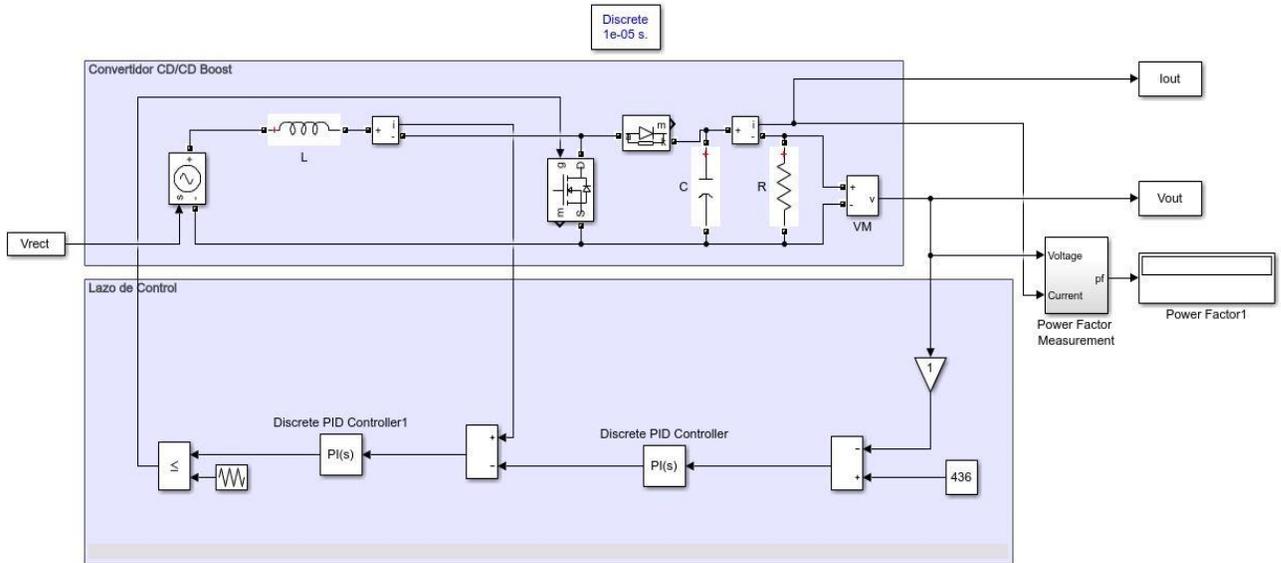
Primeramente para el uso del convertidor CD/CD Boost se aproximaron los valores calculados de la sección 4.2 a valores comerciales de componentes, los cuales son desplegados en la siguiente tabla.

**Tabla 4. 5.** Valores comerciales escogidos de los componentes del convertidor CD/CD.

Componentes	Valor calculado	Valor comercial	% Error
Inductor	267.51 $\mu$ H	270 $\mu$ H	0.93
Resistencia	43.6 $\Omega$	39 $\Omega$	10.55
Capacitor	86.04 $\mu$ F	100 $\mu$ F	16.22

Elaboración propia.

Aunque el porcentaje de error es alto en la escogencia de la resistencia y capacitor, se recuerda que el dimensionamiento se realizó con el mínimo permitido para el peor de los casos, por lo que, no afectará de manera directa al circuito. El único valor que fue redondeado a un valor comercial más bajo de lo buscado fue la resistencia, ya que ésta limita la potencia entregada a la batería, por lo que entre más bajo sea su valor, más alta será la potencia al sistema de carga y la batería cargará más rápido sin provocar daños en ella. La siguiente figura, muestra el convertidor CD/CD con su lazo de control de corriente promedio.



**Figura 4. 6.** Convertidor Boost con lazo de control cerrado.

Tal y como se puede observar en la Figura 4. 6, la variable de entrada Vrect trae todos los datos guardados del workspace y los ingresa al convertidor CD/CD para poder seguir la simulación con la información real del sistema.

Dentro del lazo del convertidor CD/CD se encuentra un inductor, un MOSFET, un diodo, un capacitor y una resistencia de carga, los cuales en conjunto ayudan a conseguir que la tensión se eleve por encima de lo que recibe en la entrada, generando el comportamiento típico de un Boost [6]. Se omite la explicación del accionar de este tipo de convertidor debido a que en la sección 4.1 y el capítulo 3 se habló de éste.

Una curiosidad de este tipo de convertidores es que pueden llegar a trabajar en modo continuo, al igual que en modo discontinuo, dependiendo de cómo se dimensionen los componentes, por lo que para controlar eso con mayor precisión, se buscó implementar un control promedio de corriente, el cual no importa en cual modo opere el circuito, éste siempre va a actuar sobre él de la mejor forma posible sin generar ruido alguno ni pérdida de velocidad o información [6], [24].

Ahora observando el lazo de control de la Figura 4. 6, se determina que es necesario comparar la tensión de salida con una referencia establecida a 436V, los cuales ingresan a un sumador para calcular un error de tensión, con lo cual entrará el primer control PI (Discrete PID Controller) a regular dicho voltaje. Seguidamente, del inductor se toma una señal para ser comparada de nuevo con lo que ajustó el PI, esto con el fin de que se tome en cuenta en la corriente en la bobina los errores, armónicos y distorsiones de la tensión de salida y haga un seguimiento de ésta para así regular el factor de potencia al valor deseado,

Luego, este valor llega al segundo controlador PI (Discrete PID Controller 1) y manda una señal inmediatamente al MOSFET para que conmute el ciclo de trabajo y así haga cambiar la tensión de salida y corriente en el inductor, evitando picos de corriente en él o voltajes bruscos en la salida [24], [25], [26] .

El bloque “powergui” en el convertidor CD/CD se tuvo que utilizar de forma discreta a un tiempo de muestreo de  $1 \times 10^{-5}$  segundos, debido a los controles presentes en el sistema. Cabe destacar que los controles PI se ajustaron según la herramienta MATLAB, al mejor ajuste posible usando un autotune, generando las siguientes constantes del controlador.

**Tabla 4. 6.** Valores utilizados en los controladores para las constantes PID.

Constantes	Primer controlador (Discrete PID Controller)	Segundo controlador (Discrete PID Controller 1)
Proporcional (P)	1	0.1
Integral (I)	35	3.5
Derivativa (D)	0	0

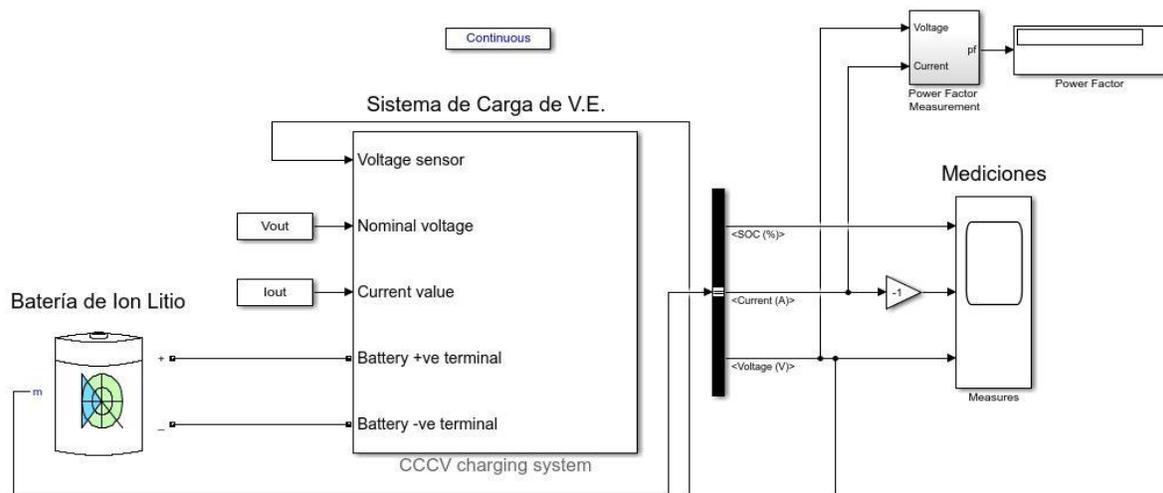
Elaboración propia.

Por último, se vuelve a utilizar “simout” y “simin” para conectar los bloques del convertidor CD/CD junto con el del sistema de carga y poder realizar la simulación completa, tal y como se esperaba. En esta vez se utilizaron las variables Iout y Vout para seguir con el proceso de carga.

Cabe mencionar que se utilizó el controlador promedio de corriente debido a que ayuda a mejorar el factor de potencia en el circuito, debido a su doble lazo de control, siendo el primero de tensión y el segundo de corriente, maximizando a éste a un valor alto y a la vez implica menos corriente desperdiciada a la hora de cargar el vehículo eléctrico, incrementando la eficiencia del sistema [24].

También se calculó el factor de potencia a la salida del convertidor CD/CD Boost, para así poder mostrar de forma visual el resultado obtenido de la simulación.

### 4.3.3. Sistema de carga del vehículo eléctrico.



**Figura 4. 7.** Sistema de Carga de la batería.

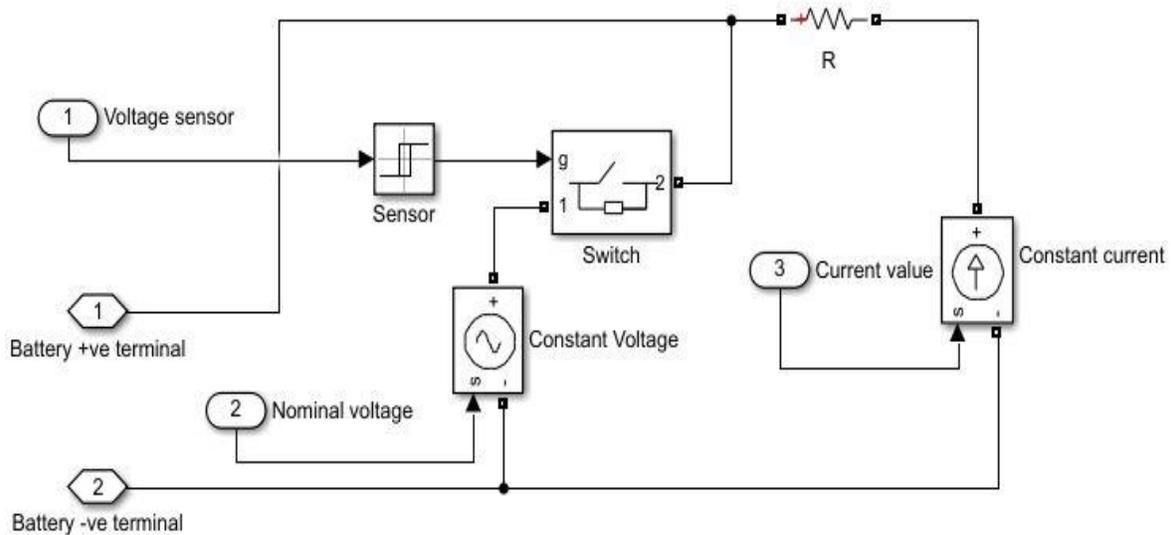
En la Figura 4. 7, se puede observar como Iout y Vout tomados desde el workspace actúan sobre el proceso final de carga de la batería del vehículo eléctrico, ayudando a accionar el subsistema de carga llamado CCCV charging system, el cual, ayuda a realizar una especie de controlador de potencia, esto con el fin de suministrarle a la batería lo que esta necesite para su debida carga. La batería en cuestión, se simuló según los datos mostrados en la siguiente tabla.

**Tabla 4. 7.** Datos utilizados en la batería del sistema de carga.

Variable	Dato
Tipo de batería	Ion-litio
Potencia de la batería	24kW
Tensión nominal de la batería	400V
Capacidad nominal o máxima capacidad	60Ah
Tensión de carga completamente cargada	465.5949V
Resistencia interna	0.066667 $\Omega$
Capacidad a la tensión nominal	54.2609Ah
Corriente nominal de descarga	26.087A
Temperatura	25°C
Tiempo de respuesta de la batería	30s

Elaboración propia.

Además, en el siguiente diagrama se muestra el subcircuito presente dentro del sistema de carga del vehículo eléctrico, el cual se encarga de controlar la potencia entregada a la batería.

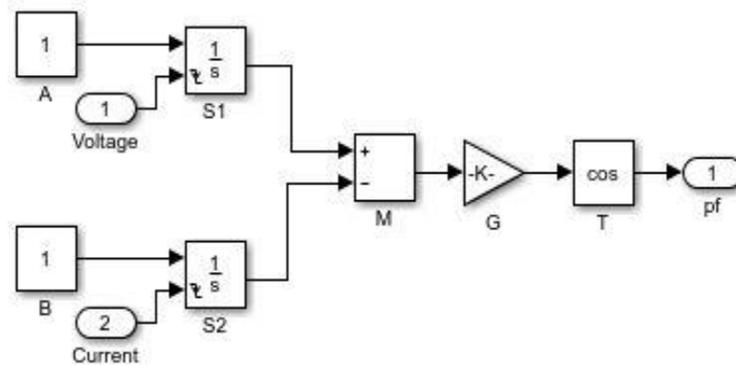


**Figura 4. 8.** Subsistema del sistema de carga del vehículo eléctrico.

El funcionamiento del subsistema de la Figura 4. 8 depende de la tensión nominal de entrada ( $V_{out}$ ), y del valor de la corriente ( $I_{out}$ ). Este circuito dependiendo del estado de carga de la batería (SoC, State of Charge por sus siglas en inglés) hace que ésta reciba más tensión o menos corriente.

El método de carga se basa en el de corriente constante, tensión constante, en donde en el primer lapso de carga se procede a aplicar una corriente de carga de 10A mientras que la tensión sube desde los 300V hasta los 436V, cuando la tensión en la batería alcanza su valor máximo (436V) el método de carga conmuta al segundo lapso de carga en el cual se usa tensión constante conforme la corriente decrece para que la carga en la batería se pueda realizar por arriba del 95% de su capacidad máxima.

Por último pero no menos importante, se puede observar en la Figura 4. 9 el circuito para el cálculo del factor de potencia, en donde se ingresa la tensión y la corriente a medir. El bloque integrador en él, calcula una integración de 1 hasta que la corriente o la tensión lleguen a cero, entonces el valor de la integración inicia de nuevo. Esto realiza un cálculo del desfase de voltaje y corriente en cada tiempo determinado y llega a mostrar en tiempo real del valor del factor de potencia.



**Figura 4. 9.** Circuito para el cálculo del factor de potencia.

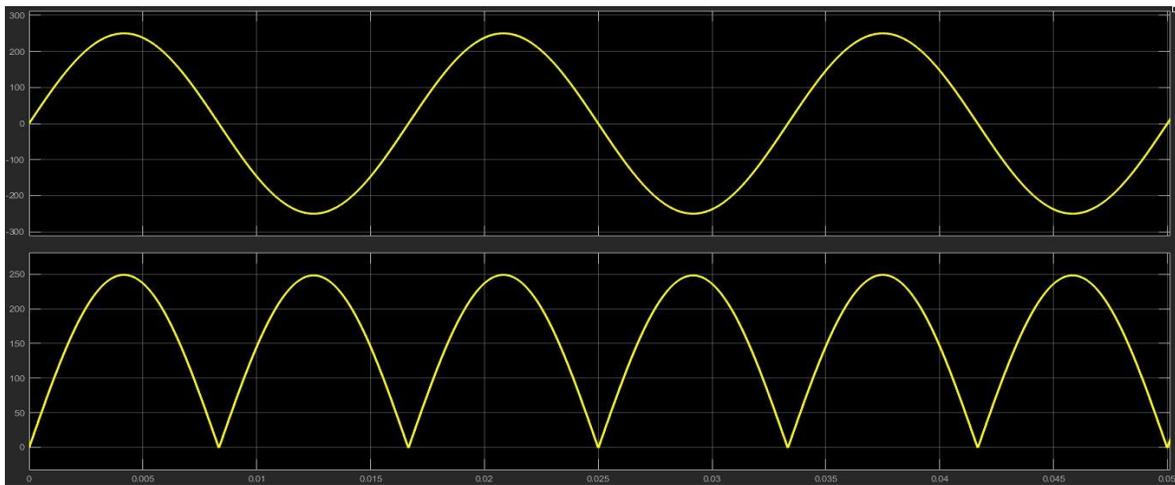
## Capítulo 5. Análisis y resultados del sistema de carga.

En este capítulo se realizaron dos pruebas al sistema de carga con distintas entradas de tensión una con 250V y otra con 110V. Se usaron estos voltajes debido a que son los límites del proyecto y se quería comprobar que el sistema funcionaba desde el rango más pequeño hasta el más elevado. Además, se procede a realizar un análisis de los resultados obtenidos.

A continuación, se presentan las dos pruebas realizadas al sistema. Cabe destacar que la simulación completa se hizo solo con la tensión de 250V, ya que por llegar al sistema de carga la tensión  $V_{out}$  e  $I_{out}$ , el control de potencia se encarga de dar los 3.5kW siempre a la batería, por lo que no variaría dicho proceso.

### 5.1. Proceso de carga con tensión de entrada de 250V.

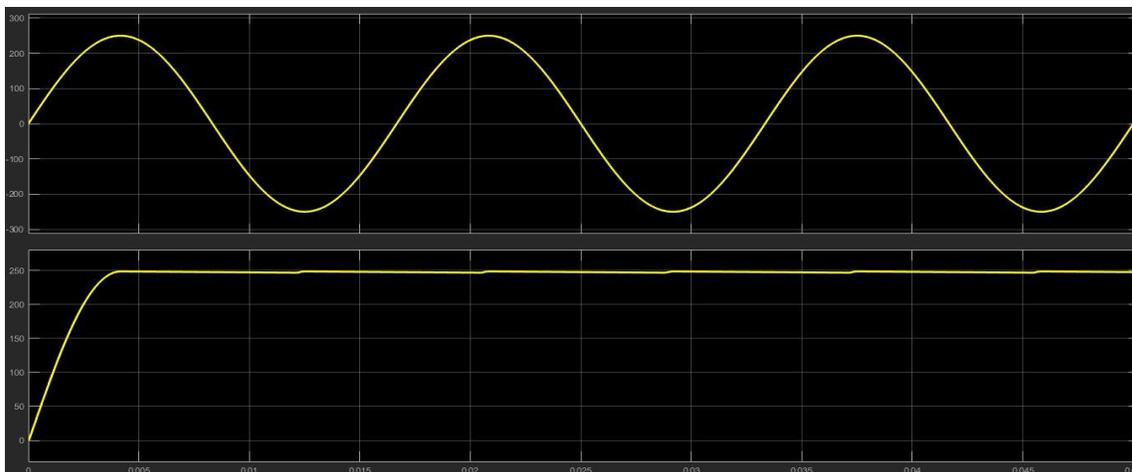
Al ingresar 250V en corriente alterna como entrada del sistema, el rectificador sin filtro funciona según lo mostrado en la Figura 5. 1.



**Figura 5. 1.** Onda rectificada con entrada de 250V.

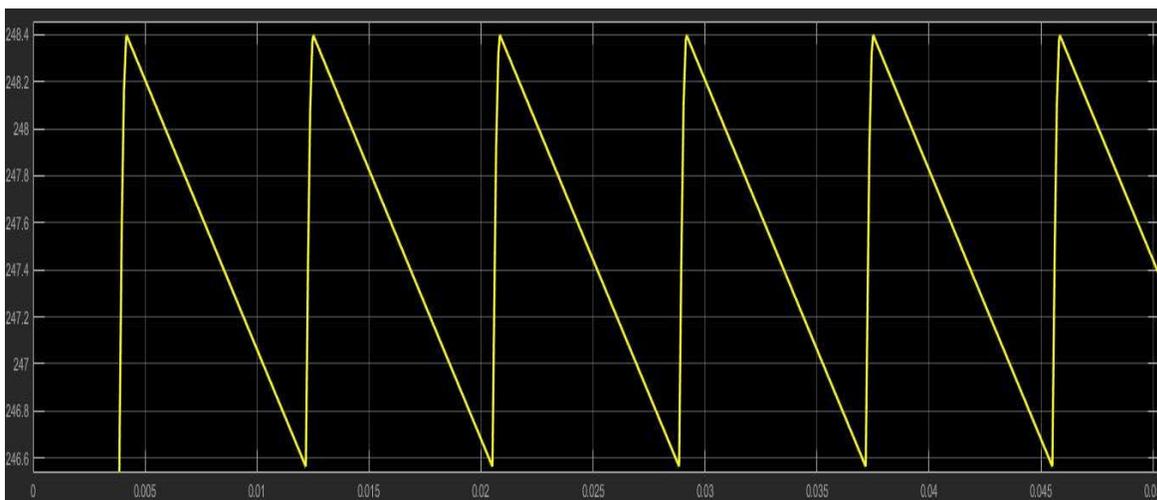
En la Figura 5. 1 se tienen dos ondas, una sin rectificar (la superior) y la otra rectificada (la inferior). Tal y como se puede observar, el funcionamiento del rectificador de onda completa consiste en invertir la forma de onda del semiciclo negativo, para así obtener un aprovechamiento de la totalidad de la onda de entrada [6], [4].

Para poder convertir la onda rectificada en una señal CD es necesario el uso de un capacitor y una resistencia a la salida de éste, que funcionen como filtro y regulador de tensión. La utilización de un condensador en el rectificador hace que se aproveche el tiempo de descarga de él, por lo que cuando la onda pasa de un pico a otro, crea un efecto en donde la tensión se mantiene casi a un valor constante, pero con un rizado generado por el tiempo en que el capacitor se carga y se descarga de nuevo. Esto se puede observar en la Figura 5. 2.



**Figura 5. 2.** Entrada y salida del rectificador usando una tensión de alimentación de 250V.

El rizado provocado por el uso del condensador se puede observar con más detalle en la Figura 5. 3, en donde éste se hace desde los 248.4V hasta los 246.5V.



**Figura 5. 3.** Rizado de la tensión de salida del rectificador con tensión de entrada de 250V.

La pérdida de tensión obtenida de los 250V, se debe al uso de los diodos en el puente rectificador, ya que cada uno de ellos fue modelado con un voltaje de 0.8V, habiendo una pérdida de 1.6V en total, tal y como se esperaba en la simulación.

Cabe destacar que durante la simulación del rectificador, se recopilaban datos en la variable Vrect durante 29200 segundos, pero para poder mostrar la forma de onda más clara, se hicieron las figuras de los resultados ajustadas a un tiempo determinado. El tiempo escogido para la simulación se debió a que se quería cumplir un tiempo completo de 8.22 horas, para así ver el tiempo exacto que duraba cargando la batería del vehículo eléctrico.

Seguidamente, se hizo la simulación del convertidor CD/CD, en donde igual se tomó una duración de 29200 segundos para recopilar los datos obtenidos de Vrect y esta vez guardarlos en las variables Iout y Vout.

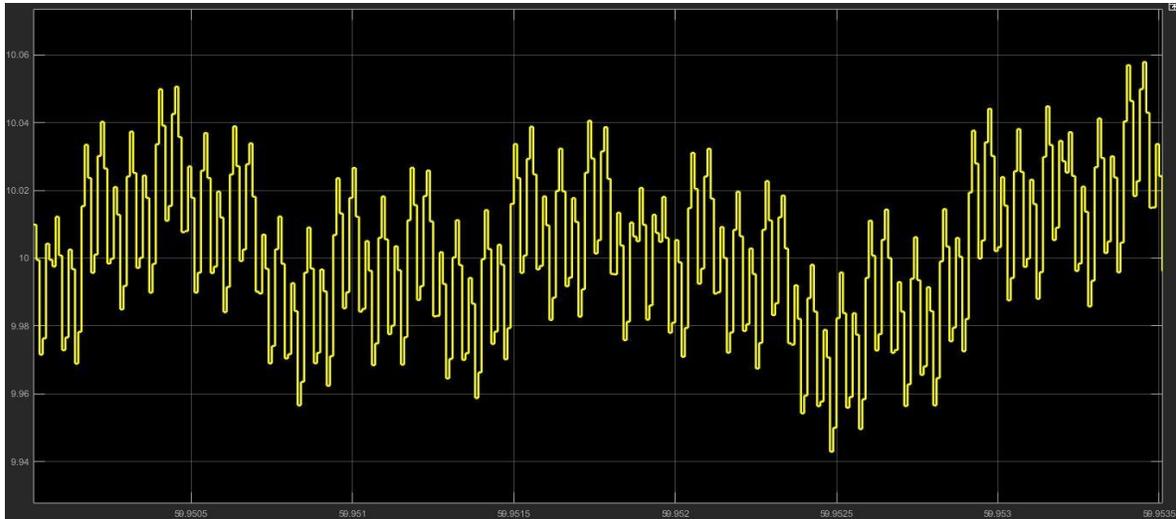
Tal y como se puede observar en la Figura 5. 4, se cumplió con el valor de la corriente del convertidor Boost tal y como se dimensionó según los cálculos realizados a 10A. Lo obtenido durante la simulación para la corriente de salida osciló entre 9.94 A a 10.06 A, teniendo así un rizado correspondiente a 0.12 A. Estos datos se resumen en la siguiente tabla.

**Tabla 5. 1.** Datos de la corriente de salida del convertidor CD/CD.

<b>Datos</b>	<b>Valor deseado</b>	<b>Valor obtenido</b>
Corriente de salida	10A	9.96 A – 10.06 A
Rizado de corriente	Menor a 1A	0.12 A

Elaboración propia.

Este rizado tan pequeño obtenido en la Tabla 5. 1, se debió al controlador promedio de corriente utilizado en el circuito convertidor, el cual se basó en un doble lazo de manejo de tensión y corriente, haciendo que en el inductor la corriente fuera más controlada y por ende más estable en la salida [24].



**Figura 5. 4.** Corriente de salida del convertidor CD/CD con entrada de tensión de 250V.

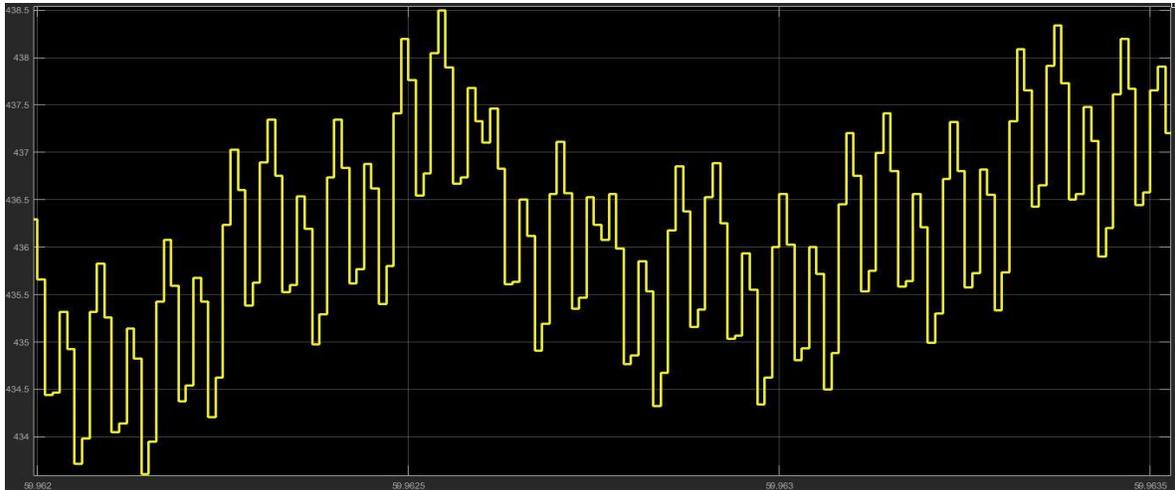
En la Figura 5. 5 se logra observar la oscilación de la tensión de salida en el convertidor CD/CD, la cual está en el rango de 433.5V – 438.5V, siendo la tensión de rizado de 5V. En la siguiente tabla se resumen dichos datos obtenidos.

**Tabla 5. 2.** Datos de la tensión de salida del convertidor CD/CD.

<b>Datos</b>	<b>Valor deseado</b>	<b>Valor obtenido</b>
Tensión de salida	436V	433.5V – 438.5V
Rizado de la tensión	Menor a 3% de 436V (13.08V)	5V

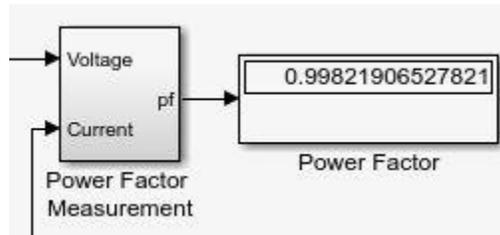
Elaboración propia.

Un control adecuado sobre la tensión y corriente de salida en el convertidor CD/CD hacen que el sistema mejore su eficiencia, al igual previenen de cierta forma, que la batería no presente cambios bruscos, ya sea en la tensión o corriente de carga en ella, ayudando a maximizar la vida útil de ésta al implementar el sistema [8], [10], [12].



**Figura 5. 5.** Tensión de salida del convertidor CD/CD con entrada de tensión de 250V.

Seguidamente se midió el factor de potencia a la salida del convertidor CD/CD con la tensión y corriente de salida del mismo. Este valor es mostrado en la siguiente figura.



**Figura 5. 6.** Factor de potencia del convertidor CD/CD con 250V.

Un alto valor del factor de potencia ayuda a que el desfase entre la corriente y la tensión sea menor, y por ende se gaste menos corriente en la carga, implicando a su vez, un sistema más eficaz [5].

Dicho factor de potencia fue obtenido debido al doble lazo de control de tensión y corriente, y debido a que el convertidor Boost ayuda a que se pueda trabajar tanto en modo continuo como en discontinuo y aun así generar un alto factor de potencia, el cual generará una reducción de la distorsión armónica total (THD) [27].

El proceso en el cual se incrementa el factor de potencia sin alterar la tensión o corriente de la carga se conoce como corrección del factor de potencia [28].

Luego de la simulación del convertidor CD/CD y sus resultados mostrados, se prosiguió a funcionar el sistema de carga del vehículo eléctrico, en el cuál se observará el nivel de carga de la batería, al igual que la tensión y corriente percibida por la batería.

Durante la simulación se volvió a trabajar con un tiempo de 29200 segundos, asegurando que todos los datos guardados de las dos anteriores simulaciones se lleven a cabo para la validación principal del sistema de carga. En la siguiente figura se muestra el comportamiento que tuvo la batería en su nivel de carga.

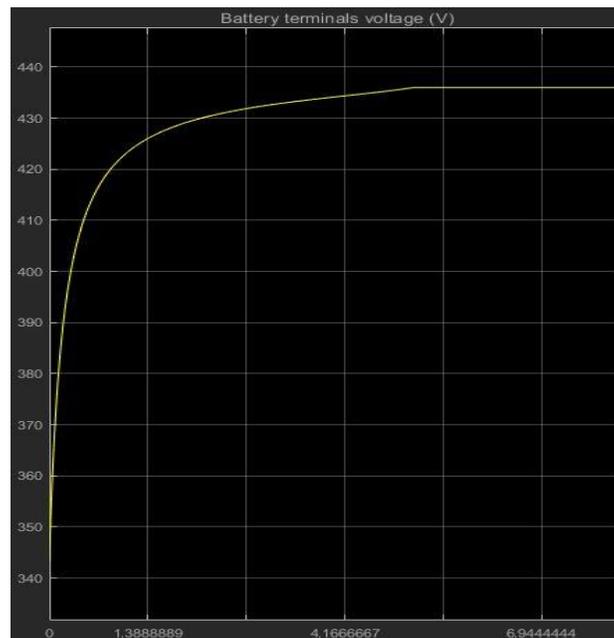


**Figura 5. 7.** Nivel de carga de la batería.

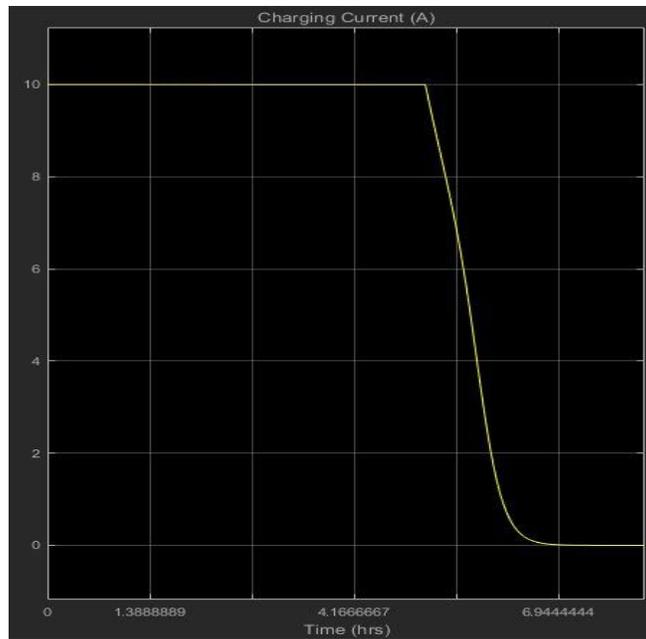
Tal y como se aprecia en la Figura 5. 7, el nivel de carga de la batería llegó a un 95,4% de su capacidad máxima. Esto se debió a que no se tomó en cuenta una carga fluctuante en el sistema, debido a que la herramienta MATLAB en su entorno llamado Simulink no tenía un relé de tres estados, el cual hubiera podido simular perfectamente el método de carga de la batería del vehículo eléctrico.

Sin embargo, ese porcentaje obtenido no quiere decir que la carga falló, o que no se logró el cometido del proyecto, porque en realidad si se llegó a obtener un buen resultado y esto se debe a que por lo general, las baterías de ion-litio no se llegan a cargar al 100% de su capacidad y esto con el fin de no sobrepasar la capacidad nominal de la batería, lo cual puede provocar un daño de las celdas de la batería y un deterioro en ella, incluso típicamente para una carga rápida, estos sistemas permiten llegar hasta un 85% de su capacidad, para así maximizar la vida útil de la batería. También, no se debe dejar que una batería de éstas llegue al 0% o valores muy bajos, ya que se puede empezar a deteriorar la celda y su daño es mayor al banco de baterías del vehículo [7], [8], [10].

Además, el SoC al 95,4% se alcanza aproximadamente a las 6 horas y media de carga en la batería, siendo este tiempo muy prudente con lo que se quería alcanzar (8 horas) y con eso mismo se puede comprobar que la potencia entregada a la batería es mayor a 3.6 kW, debido a la duración en la carga del acumulador de ion-litio. Ahora bien, la tensión y corriente percibida por la batería se muestran en la Figura 5. 8 y Figura 5. 9 respectivamente.



**Figura 5. 8.** Tensión entregada a la batería.

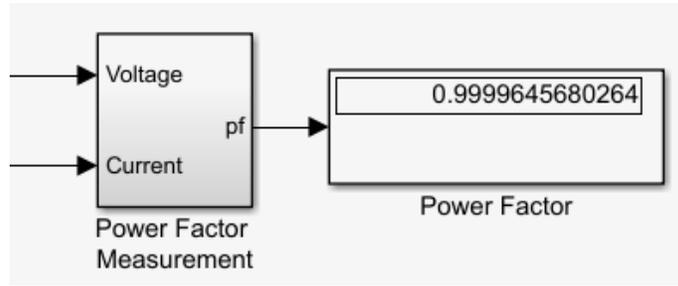


**Figura 5. 9.** Corriente entregada a la batería.

En las anteriores figuras, se puede denotar el proceso de funcionamiento en la batería según la tensión y corriente de salida del convertidor CD/CD. Además, queda demostrado el método de corriente constante - tensión constante, el cual se usa para cargar el acumulador de ion litio del vehículo eléctrico.

En el primer lapso de tiempo se nota como la corriente es aplicada a 10 A, mientras que la tensión comienza a incrementar hasta lograr los 436V. Luego de ello, se sigue dando una tensión de 436V, conforme la corriente decrece en el sistema, esto con el fin de tratar de cargar la batería del vehículo eléctrico y compensar la potencia entregada a la batería. Gracias a este método se maximiza la vida útil de la batería, tal y como quedó demostrado en el capítulo 3 del documento.

Además el factor de potencia obtenido del proceso de carga final de la batería, se evidencia en la siguiente figura.

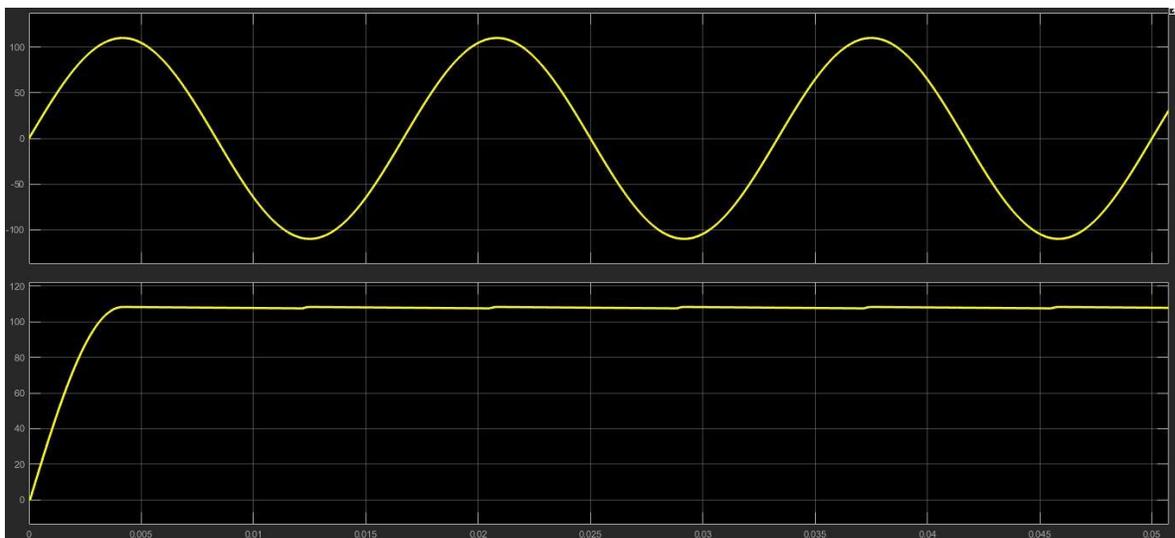


**Figura 5. 10.** Factor de potencia final en la carga del sistema del vehículo eléctrico.

Claramente el factor de potencia mejoró, debido a que el lazo de control de potencia maximiza el seguimiento de la corriente a la tensión, implicando un factor de potencia más alto que en la misma salida del convertidor CD/CD, demostrando de esta forma la corrección del factor de potencia conforme se carga la batería del vehículo eléctrico.

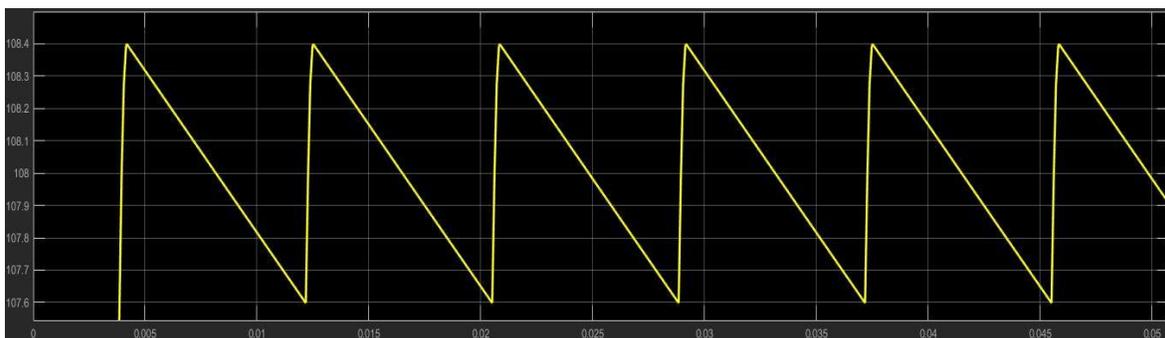
### 5.1. Proceso de carga con tensión de entrada de 110V.

En este apartado se muestran las simulaciones tomadas con una tensión de entrada de 110V en el sistema de carga, en donde el procedimiento es el mismo que lo explicado usando un voltaje de 250V, por lo que se omitirán ciertas explicaciones. A continuación se presenta la Figura 5. 11, en donde se muestra la tensión rectificada.



**Figura 5. 11.** Tensión de entrada y salida rectificada operando a 110V.

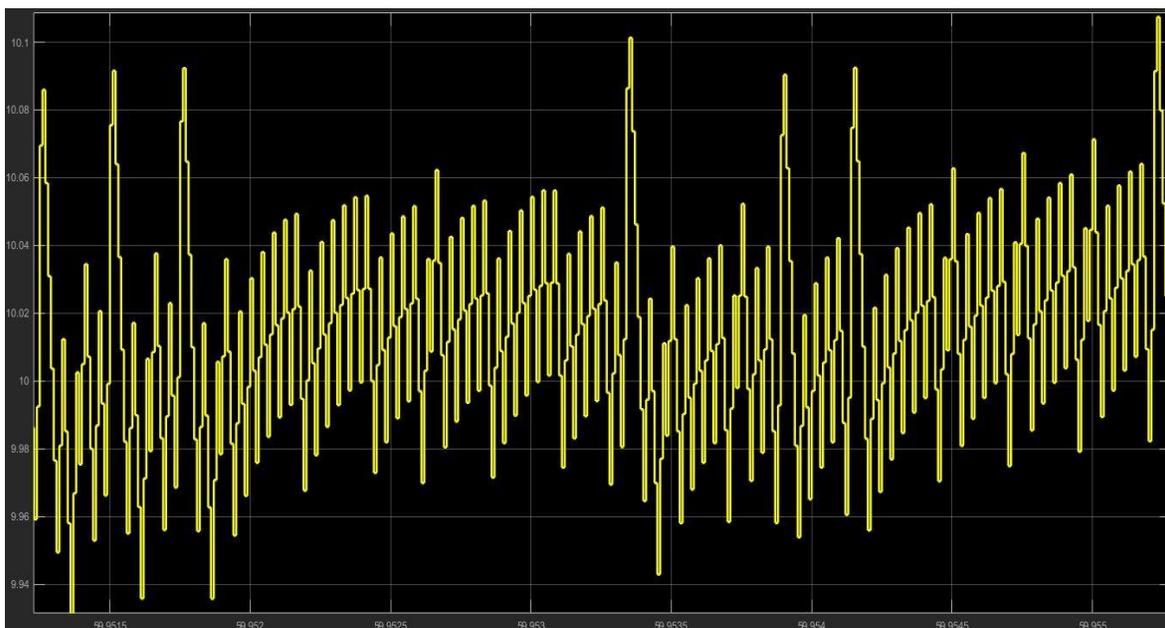
En la anterior figura se muestra un pequeño rizado de la tensión, la cual se puede observar con más detalle a continuación.



**Figura 5. 12.** Rizado en la tensión de entrada rectificada operando a 110V.

Tal como se aprecia en la anterior figura, los niveles de rizado de la tensión rectificada varían desde los 107.5V hasta los 108.4V, generando un voltaje de rizo de tan solo 0.9V, siendo mucho menor que el producido por los 250V en la entrada del sistema. Esto es debido a un uso menor de tensión, por lo que para el sistema será más fácil poder convertirlo a una señal CD [4].

Terminado el proceso del rectificador, se procede a mostrar los resultados obtenidos en la corriente de salida del convertidor Boost.



**Figura 5. 13.** Corriente de salida del convertidor CD/CD con entrada de tensión de 110V.

Se observa en la Figura 5. 13 el rizado producido en la corriente de salida del convertidor CD/CD. Los datos provenientes de la onda mostrada se presentan en la siguiente tabla.

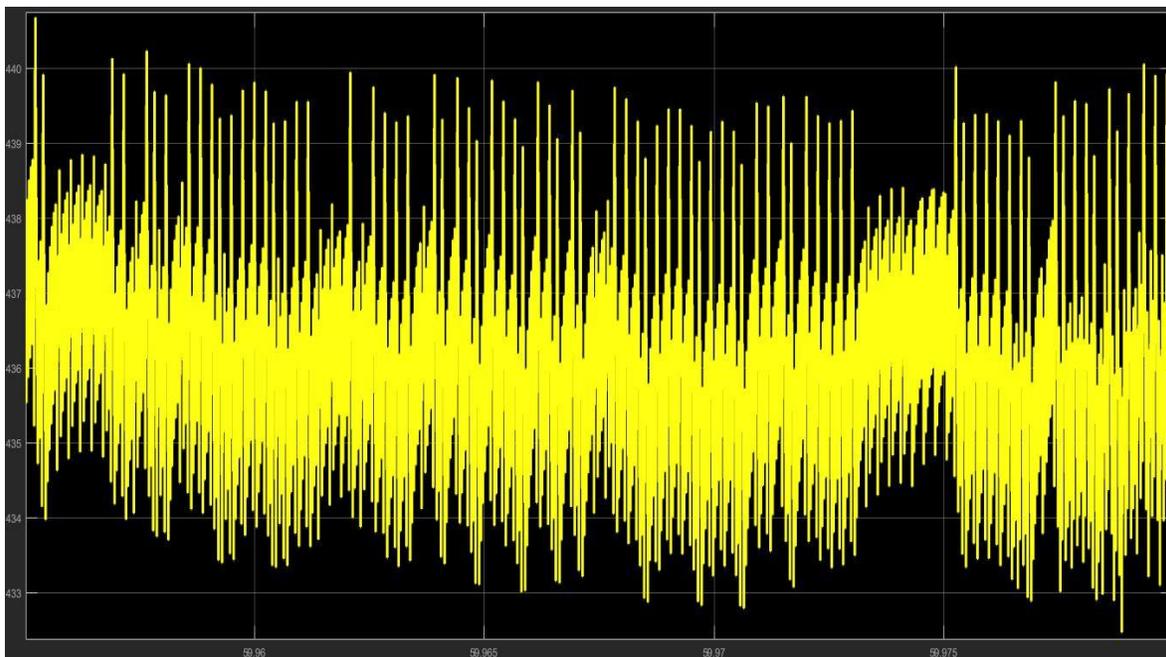
**Tabla 5. 3.** Datos de la corriente de salida del convertidor CD/CD con 110V.

Datos	Valor deseado	Valor obtenido
Corriente de salida	10A	9.92 A – 10.12 A
Rizado de corriente	Menor a 1A	0.20 A

Elaboración propia.

El rizado de la corriente dio menos de lo esperado (1 A), siendo esto un resultado bastante positivo y cumpliendo con las expectativas del sistema, pero su valor es incluso mayor que el producido por el sistema cuando se tenían 250V en la entrada. Esta razón ocurre ya que, el circuito ocupa mucha más tensión y corriente para llegar al límite de los 10 A y 436V, por lo que es lógico pensar un incremento en los rizados del sistema, así como un decremento en el factor de potencia, debido al accionar del control.

Además, en la siguiente figura se logra demostrar la forma de onda de la tensión de salida, así como su efecto de rizado proveniente del voltaje usado en la entrada (110V).



**Figura 5. 14.** Tensión de salida del convertidor CD/CD con entrada de tensión de 110V.

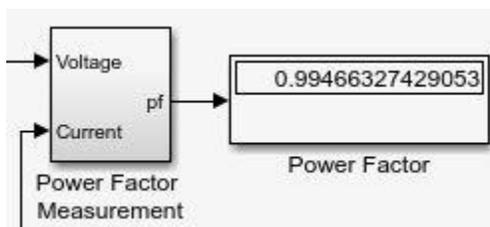
**Tabla 5. 4.** Datos de la tensión de salida del convertidor CD/CD.

Datos	Valor deseado	Valor obtenido
Tensión de salida	436V	432.5V – 440.5V
Rizado de la tensión	Menor a 3% de 436V (13.08V)	8V

Elaboración propia.

En la anterior tabla se muestran los datos proporcionados de la Figura 5. 14, en donde los niveles de rizado de tensión son los adecuados según lo esperado por el sistema, sin embargo se comprueba lo mismo que pasó con la corriente. El sistema al tener que darle más variación al ciclo de trabajo para que se alcancen los 436V, hace que el voltaje presente mayor variación y por ende menos estabilidad al controlarlo.

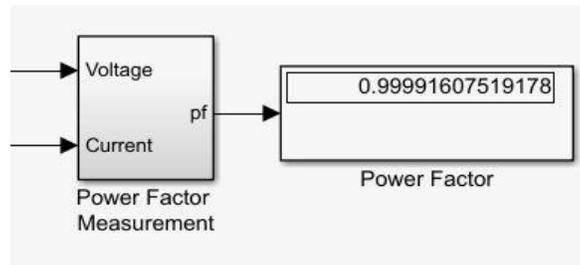
El factor de potencia obtenido en la salida del convertidor Boost, producto de la tensión de entrada de 110V es el mostrado en la siguiente figura.



**Figura 5. 15.** Factor de potencia del convertidor CD/CD con 110V.

Según la anterior figura se demuestra que, al variar más la corriente así como la tensión de salida debido a un esfuerzo mayor por parte del convertidor CD/CD, el factor de potencia disminuye respecto al sistema de carga cuando le son entregados 250V en la entrada, ocupando una corriente mayor para compensar en la salida de la batería el tiempo de duración de la carga de la batería. Sin embargo, este tiempo de compensación no trascenderá los 10 minutos de carga, por lo que se omite la simulación completa del sistema de carga con 110V en la entrada del sistema.

En la siguiente figura, se muestra el comportamiento del factor de potencia en la salida del sistema de carga.



**Figura 5. 16.** Factor de potencia final en la carga del sistema del vehículo eléctrico usando una tensión de entrada de 110V.

Según la Figura 5. 16, hubo una mejora en el factor de potencia respecto al obtenido en la salida del convertidor CD/CD, debido al lazo de control de potencia, el cual maximiza este valor. Un detalle a tomar en cuenta, es que, aunque el factor de potencia mejoró, no llegó a superar el generado por la tensión de 250V y esto se debe al mayor esfuerzo en el ciclo de trabajo en el convertidor Boost por tratar de alcanzar la tensión de 436V con tan solo 110V en la entrada del sistema.

Los dos resultados de la simulación cumplieron con las expectativas deseadas, gracias a la buena escogencia del convertidor CD/CD el cual se ajustaba a los parámetros que se requerían en el sistema.

## **Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.**

Este capítulo, se enfocará en dos secciones, la primera será de conclusiones y la segunda de recomendaciones. Se tomarán los resultados y análisis hechos del sistema de carga, para una posible solución o implementación a futuro, en donde se le otorgue cierta información al lector que pueda servirle como parámetros de base.

### **6.1. Conclusiones.**

Concluido el capítulo 5 de análisis y resultados, se procede en esta sección a determinar o resumir la importancia de lo obtenido del diseño y simulación del sistema de carga interno del vehículo eléctrico.

Cabe mencionar, que el sistema de carga logró cumplir con las expectativas deseadas, debido a que éste ayudó a la batería a alcanzar el 95,4 %, de su capacidad de carga total, siéndole entregado a ésta una tensión desde los 300V hasta los 436V y una corriente de 10 A, los cuales alternaban entre un valor constante y variable, según el método de carga de corriente constante y voltaje constante.

El 4.6% faltante de la carga de la batería se debió a limitantes con el programa de simulación, por ausencia de componentes electrónicos como un relé de tres estados, el cual se encargaría de inyectarle a la batería la carga fluctuante faltante, completando el 100% de su capacidad.

Un control promedio de corriente, junto con un convertidor CD/CD Boost, pueden realizar los ajustes necesarios para ayudar a una corrección del factor de potencia, en donde el rizado de la tensión y la corriente se ven disminuidos producto del gran manejo de estas variables en el sistema.

Además, el factor de potencia obtenido de 0.99, ayudará a la batería a maximizar su vida útil, ya que con menos corriente inyectada en el sistema, se podrá cargar el vehículo eléctrico, en una hora y media menos de lo presupuestado inicialmente (8 horas).

También se comprobó en el sistema, una corrección del factor de potencia, en donde éste mejoró desde la salida del convertidor hasta la salida del circuito, ayudando en gran parte a un cargador de baterías muy eficiente en la carga.

Por último, se logró obtener una simulación en tiempo real del proceso de carga de la batería en MATLAB, utilizando el diseño del sistema completo, con lo cual se pudo comprobar el método de carga de corriente constante – tensión constante. Dicha conexión, se obtuvo gracias a bloques en el simulador tales como “simout” y “simin”, los cuales permitieron el transporte de información de una etapa a otra.

## **6.2. Recomendaciones.**

Durante el desarrollo del proyecto se encontraron ciertos desafíos con la herramienta de simulación, MATLAB, los cuales pudieron ser solucionados mediante distintas estrategias, las cuales se aconsejan para un trabajo de este tipo.

Un buen dimensionamiento del convertidor CD/CD ayuda a limitar la corriente de salida muy fácil, generando un accionar menos fuerte del control sobre esta parte del sistema.

Además, los bloques de “powergui” de MATLAB, solo permiten un método de solución, ya sea en tiempo discreto, continuo o con análisis fasorial, por lo que generó distintos problemas al conectar el rectificador (el cual debía trabajar en tiempo continuo) con el convertidor CD/CD (éste debía trabajar en tiempo discreto debido al controlador presente), al igual que cuando se trató de enlazar este último con el sistema de carga [21].

Este problema anterior, se solucionó utilizando una variable para la toma de los datos, guardando la información de la simulación en el workspace de MATLAB y luego volviendo a cargar dicha variable para el ingreso de los datos en el posterior circuito a enlazar, ayudando que el sistema total estuviera conectado de cierta forma. Esto en la práctica, no debería de llevar sufrir inconvenientes que se tuvieron en el camino, ya que no se presentan estas limitaciones, como si lo presenta una herramienta de simulación.

También, la carga en la batería no se logró llevar al 100%, debido a la falta de un relé de tres estados, el cual ayudaría a conmutar el sistema hacia la carga fluctuante, compensando esos 5% en el estado de carga que no se pudieron llevar a cabo.

Otra limitante para la cual MATLAB no fue diseñado, se logró observar cuando se trató de obtener una comunicación simulada con un cargador tipo L2, esto con el fin que se diera un enlace entre el cargador externo e interno, simulando completamente el proceso de carga en la batería. Una herramienta que podría realizar toda esta comunicación, es LabVIEW, pero debido a las limitantes en cuanto al tiempo real de simulación de una batería, fue descartado. Sin embargo, para probar el enlace entre los cargadores es altamente recomendado.

Además, si se utiliza la herramienta MATLAB/Simulink como sucedió en este proyecto, se pueden llegar a tener problemas de conexiones entre distintos bloques de las librerías Simscape y Simulink, por lo que la ausencia de ciertos componentes puede suceder, siendo una gran limitante del programa.

También, a la hora de implementar y diseñar un convertidor CD/CD de este tipo en un cargador de vehículo eléctrico, se recomienda dimensionar el inductor, tal que, se llegue a utilizar una frecuencia por encima de los 20kHz, ya que, al comenzar a cargarse éstos, suelen realizar una especie de “chillido” o ruido muy molesto, lo cual ser un gran problema para el usuario en cuestión [18], [19].

Por último, al implementar este sistema de carga de forma física, se recomienda utilizar un filtro EMI en la entrada del sistema, esto con el fin de eliminar las posibles interferencias electromagnéticas o ruido proveniente del cargador externo [29].

## Bibliografía

- [1] R. Soto, «Poder Legislativo proyectos,» La Gaceta, San José, Costa Rica, 2017.
- [2] N. Chinchilla, «Se fortalece la movilidad eléctrica en el TEC,» Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2018.
- [3] Evolve Electrics, «EV power charger,» 2018. [En línea]. Available: <https://evolveelectrics.com/products/valeo-siemens-ev-power-charger>. [Último acceso: 12 Noviembre 2018].
- [4] F. Miyara, «Rectificación,» Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina, 2002.
- [5] e. J. Campos, Corrección del factor de potencia y control de la demanda, Barranquilla, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente y Universidad del Atlántico, 2012.
- [6] D. W. Hart, Electrónica de Potencia, Madrid: Pearson Educación S.A., 2001.
- [7] L. D. Rodríguez y J. D. Puentestar, «Diseño y construcción del cargador de un banco de baterías de 96 VDC e inductancia del convertidor DC-DC elevador de 96 VDC a 311 VDC a ser utilizados en un vehículo eléctrico,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2011.
- [8] J. A. Vargas, «Conversión a auto eléctrico basada en un accionamiento trifásico: diseño, modelación e implementación,» Universidad de Chile, Santiago, 2012.
- [9] e. a. J. M. Amarilla, «Guía del vehículo eléctrico,» Consejería de Economía y Hacienda, Madrid, 2009.
- [10] J. Logroño, «Cargador de Batería para Vehículos,» Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2017.

- [11] G. Cuesta, «Caracterización del tren de potencia de un vehículo eléctrico de categoría L7 tipo smart,» Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, Barcelona, 2017.
- [12] R. Guzmán, «Diseño de un cargador de baterías de alta frecuencia,» Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, Burgos, 2013.
- [13] V. Galera, «Simulador Convertidores DC-DC,» Universitat Rovira i Virgili (URV), Tarragona, 2002.
- [14] M. S. A. López, «Estudio, Simulación e Implementación de Estructuras,» Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, 2012.
- [15] T. Esparza, «Diseño, dimensionado y simulación de un convertidor DC/DC elevador para pilas combustibles,» Universidad Pública de Navarra, Pamplona, 2015.
- [16] F. Valderrama, H. Moreno y H. Vega, «Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia DC-DC tipo boost,» Universidad de San Buenaventura, Bogotá, Colombia, 2011.
- [17] M. Daly, P. Burrmann y R. Kohl, «Plug-In hybrid electric vehicle charger system,» Florida State University, Florida, 2012.
- [18] S. Haykin, Sistemas de comunicación, Distrito Federal, México: LIMUSA S.A., 2001.
- [19] F. G. Stremler, Introducción a los sistema de comunicación, México: Editorial Alhambra Mexicana S.A., 1998.
- [20] B. Hauke, «Basic calculation of a boost converter's power stage,» Texas Instrument, 2009.
- [21] MathWorks, «Powergui,» 2018. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/powergui.html>. [Último acceso: 10 Noviembre 2018].

- [22] MathWorks, «To Workspace,» 2018. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/simulink/slref/toworkspace.html>. [Último acceso: 10 Noviembre 2018].
- [23] MathWorks, «From workspace,» 2018. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/simulink/slref/fromworkspace.html>. [Último acceso: 10 Noviembre 2018].
- [24] A. Dhivya y D. Murali, «Average current mode control technique applied to Boost converter for power factor improvement and THD reduction,» IJISET, Salem, India, 2016.
- [25] S. Kupati, M. Chavan, S. Bhattad y N. Arun, «Average current mode controlled power factor correction converter,» Indian Journal of Science and Technology, Tamil Nadu, India, 2015.
- [26] R. Sheehan, «Understanding and applying current mode control theory,» Texas Instrument, Santa Clara, CA, 2007.
- [27] H. Yao, Modeling and design of a current mode control boost converter, Fort Collins, Colorado: Colorado State University, 2012.
- [28] C. Alexander y M. Sadiku, Fundamentos de circuitos eléctricos, Ciudad de México: Mc Graw Hill, 2006.
- [29] F. Hoyos, C. Younes y E. Cano, «Técnicas de filtrado IEM en convertidores electrónicos de potencia,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2010.