



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Facultad de electrónica

“Cargador solar de baterías para vehículo eléctrico”

Monografía

Para obtener la licenciatura en ingeniería electrónica y telecomunicaciones

Presenta:

Alvaro Madrid Arroyo

Director:

Edgar Peralta Sánchez

Codirector:

Sergio Alejandro Cardeña Moreno



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyła**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1. Paneles fotovoltaicos	3
Capítulo 2. Convertidor CD-CD	7
2.1 Diseño.....	7
2.2 IGBT gate driver.....	12
2.3 Controlador	15
2.4 Control MPPT	16
2.5 Puntos a considerar en el control.....	19
Capítulo 3. Banco de baterías	20
Capítulo 4. Cargador	22
4.1 Aislamiento galvánico	22
Capítulo 5. Vehículo eléctrico	26
5.1 Control de carga para baterías de litio (CCCV)	26
5.2 Sistema de gestión de baterías (BMS).....	30
Conclusiones	32
Referencias	33

Introducción

La demanda de vehículos eléctricos (100% eléctricos) ha crecido de forma muy lenta a comparación del crecimiento de su popularidad, pero es un hecho que este mercado eventualmente opacará tanto los vehículos de gasolina como los híbridos pues son más eficientes y potentes. Debido a que estos vehículos requieren voltajes y corrientes muy altos para funcionar y sistemas de control para operarlos, surge la necesidad de recurrir a la electrónica de potencia.

En este trabajo se desarrolla un cargador que pueda suministrar energía a un vehículo eléctrico sin necesidad de ser conectado a la red eléctrica. Todo cargador necesita una fuente de energía para alimentar vehículos eléctricos y en este caso son paneles fotovoltaicos los cuales convierten la energía del sol en electricidad, pero al igual que la mayoría de fuentes de energía renovables, son irregulares e intermitentes, por lo que deben conectarse a un convertidor CD-CD, que reciben y entregan electricidad en CD con diferentes valores de voltaje y corriente de una forma más regulada y controlada, pero presentando pérdidas en la conversión, lo que resulta en una potencia menor en la salida que en la entrada. Para reducir la intermitencia, se usan bancos de baterías que pueden almacenar electricidad en kWh y entregarla de manera ininterrumpida. Con una fuente de energía ininterrumpida y regulada, se puede cargar el vehículo eléctrico a través de otro convertidor CD-CD que, a diferencia del primero, tiene más medidas de control, regulación y monitoreo. Esto es debido a que los vehículos eléctricos poseen en su interior un banco de baterías que se distingue porque debe cargarse y descargarse con perfiles de manera controlada.

Justificación

Algunas de las consideraciones sobre los vehículos eléctricos hoy en día es que, para recargarlos, necesitas de una electrolinera (equivalente a gasolinera) o disponer de tu propio cargador en tu casa donde ambos se conectan a la red eléctrica, la cual para mantenerse ininterrumpida y regulada, se recurre bastante a los combustibles para su generación. Este cargador no requiere ser conectado a la red eléctrica, pero presenta los siguientes desafíos:

- 1) Obtener una fuente de energía ininterrumpida y regulada a partir de los paneles fotovoltaicos.
- 2) Obtener la máxima potencia de los paneles fotovoltaicos y entregarla al banco de baterías de reserva.
- 3) Cargar con un perfil controlado las baterías del vehículo eléctrico.

Objetivo general

Crear un centro de carga para un vehículo eléctrico que funcione sólo con energía solar. Las etapas del cargador se muestran en la Figura 1, los paneles solares tomarán y transformarán la energía del sol y la harán energía eléctrica CD que será almacenada en un banco de baterías que alimentarán a un cargador el cual será el encargado de suministrar de electricidad al vehículo eléctrico.

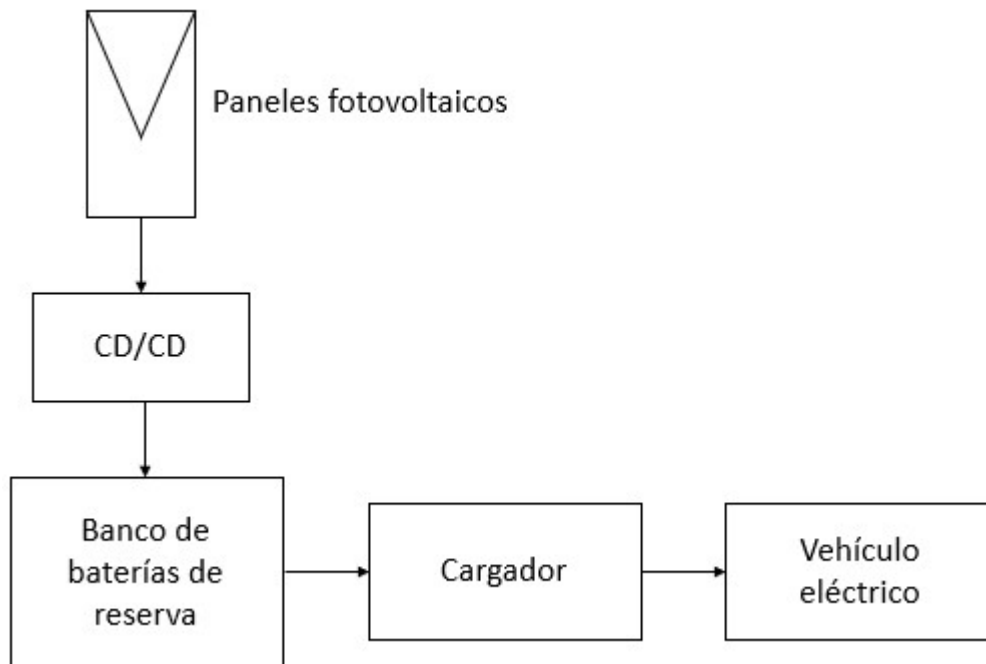


Figura 1. Etapas del cargador solar de baterías para vehículo eléctrico.

Este método de carga fuera de red podría ser una manera constante y autónoma para recargar vehículos eléctricos ya sea tanto en una electrolinera (equivalente a gasolinera) como en una casa.

Objetivos específicos

- Probar, medir y caracterizar panel fotovoltaico.
- Diseñar y simular convertidor CD-CD para cargar banco de baterías de reserva
- Elegir el banco de baterías de reserva.
- Diseñar y simular convertidor CD-CD para cargar vehículo eléctrico.
- Elegir banco de baterías para vehículo eléctrico.

Capítulo 1. Paneles fotovoltaicos

Los paneles toman la energía del sol y la transforman en energía eléctrica CD y está compuesto de varias celdas solares interconectadas entre sí, generalmente en serie cuya composición es de un material semiconductor, el cual puede ser: policristalino (Barato, poco eficiente), monocristalino (Costoso, muy eficiente), y silicio amorfo. La Figura 2 muestra la curva V-I de un panel fotovoltaico con color azul, mientras que la curva de potencia la muestra de color naranja.

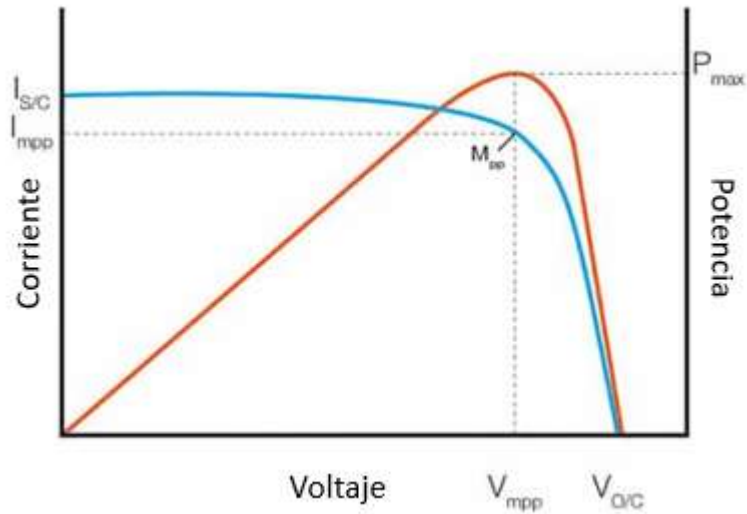


Figura 2. Curva V-I y curva de potencia de un panel fotovoltaico.

Los paneles para el cargador se muestran en la Figura 3. Serán usados para cargar el banco de baterías de reserva a través de un convertidor CD-CD y, dependiendo de los resultados obtenidos de los paneles, se determinará la cantidad y configuración de estos para conectarse al convertidor.



Figura 3. Panel fotovoltaico HSL60P6-PC-3-260W.

Tomando en cuenta las condiciones estándares de operación de irradiación ($1000\text{W}/\text{m}^2$) y temperatura (25°C), las características de los paneles son las siguientes:

$$P_{max} = 260 \text{ W}$$

$$V_{oc} = 38.1 \text{ V}$$

$$I_{sc} = 8.98 \text{ A}$$

$$V_{mp} = 30.9 \text{ V}$$

$$I_{mp} = 8.42 \text{ A}$$

Una de las pruebas para evaluar la relación voltaje-corriente que puede proveer un panel consiste en colocar una resistencia de potencia variable en las terminales del panel, tal y como se muestra en la Figura 4.

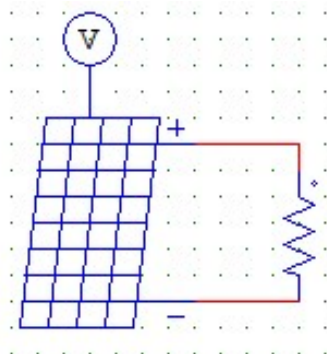


Figura 4. Panel fotovoltaico conectado directamente a una resistencia.

Al panel se le conecta una resistencia de potencia variable y usando un multímetro, se miden los valores de voltaje y corriente que estarán cambiando ante diferentes resistencias y por lo tanto habrá diferentes valores de potencia también. La Figura 5 muestra la obtención de estos valores.



Figura 5. Medición de voltajes y corrientes del panel fotovoltaico.

En base a la ley de Ohm, los valores de voltaje y corriente cambiarán conforme cambie la resistencia, obteniendo un comportamiento semejante a la Figura 6.

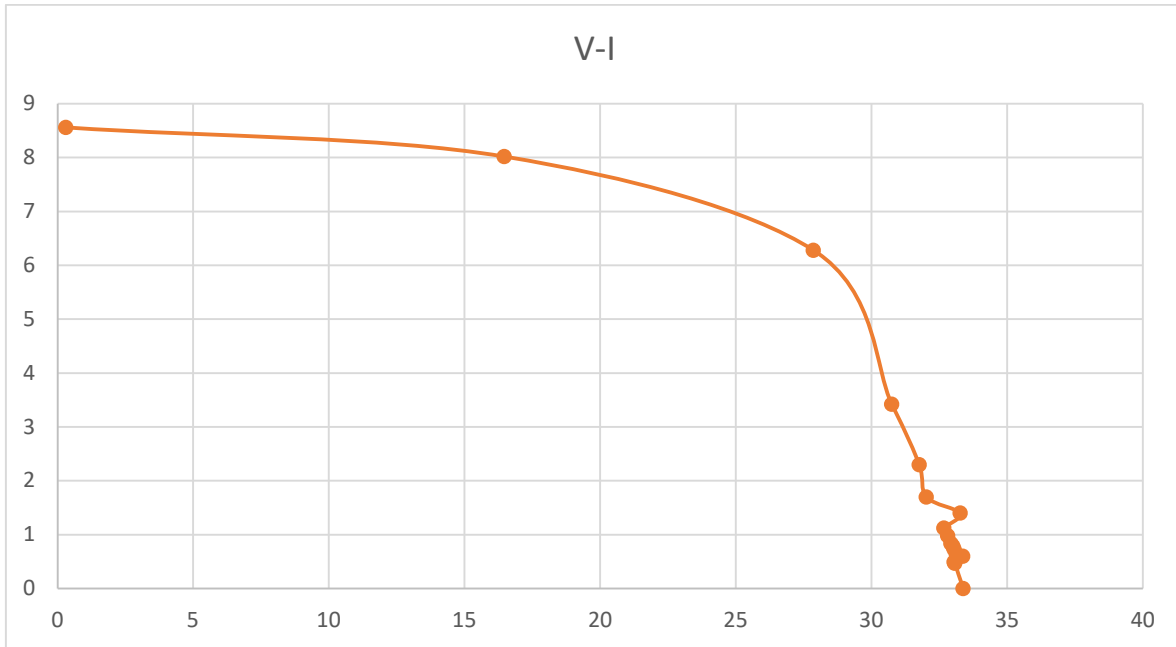


Figura 6. Relación entre voltaje (eje x) y corriente (eje y) del panel ante diferentes impedancias.

La Figura 6 representa cómo cambian el voltaje y corriente conforme cambia la resistencia desde 0 hasta 75 Ω . Haciendo la comparación, ahora entre voltaje y potencia, se obtiene la Figura 7.

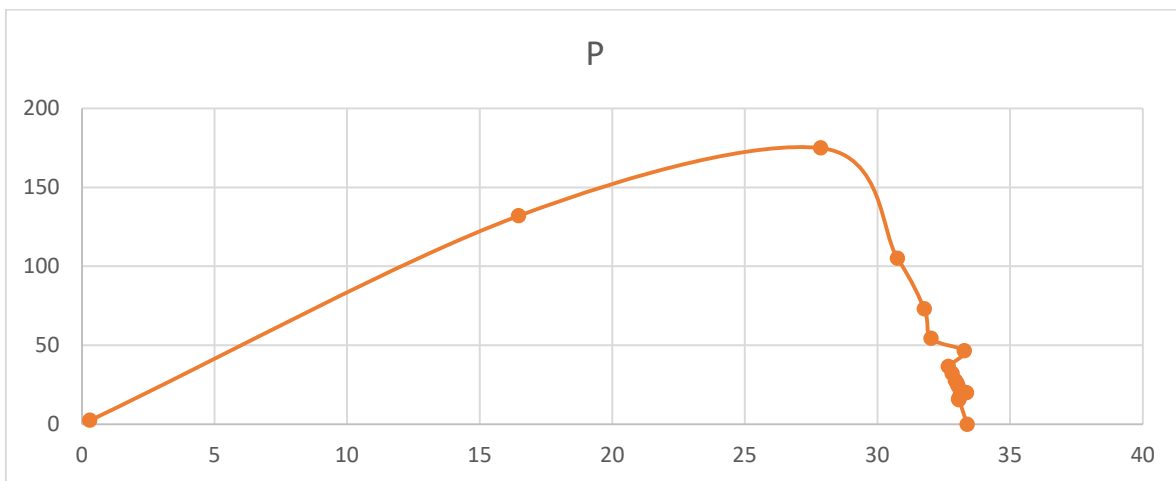


Figura 7. Relación entre voltaje (eje x) y potencia (eje y) del panel ante diferentes impedancias.

El punto máximo de la Figura 7 es dónde se obtiene la mayor cantidad de potencia posible del panel y la idea es siempre mantenerse ahí para aprovechar al máximo la energía que entregue el panel. En este caso y momento particular, el punto

máximo se obtuvo al colocar la resistencia en un valor de 5Ω de modo que, si el controlador imitara una carga equivalente a 5Ω , el panel le entregaría la máxima potencia posible y aunque los valores de voltaje y corriente no fueran los requeridos con un proceso de conversión se obtendrían los valores deseados, pero sin cambiar la potencia. Para lograr lo anterior, hay 3 puntos a considerar:

- 1) Este controlador debe entregar un PWM al convertidor CD-CD que le permita al panel siempre entregar el voltaje y corriente con la potencia máxima.
- 2) El controlador debe tomar en cuenta que el panel fotovoltaico es una fuente de voltaje que varía en el tiempo (posición de sol, nublado o noche) de modo que el punto máximo de potencia se va a estar moviendo incluso llegando a desaparecer.
- 3) El controlador debe dejar de entregar la máxima potencia a la batería si ésta ya está completamente cargada.

Para esto se usa algo llamado MPPT que es un algoritmo de control que rastrea el punto máximo de potencia. Básicamente identifica el voltaje y corriente que debe entregar el panel de modo que siempre entregue la potencia máxima. Existen varios métodos de MPPT el usado en este proyecto es el llamado “perturba y observa”. Se vio anteriormente que, ante diferentes resistencias, los valores de voltaje y corriente cambiaban entregando diferentes potencias, este MPPT cambia esos valores mediante perturbaciones para hallar el voltaje y corriente que entregue la mayor potencia posible de ese momento.

El punto más alto de la Figura 8 se le conoce como el punto máximo de potencia (MPP). El voltaje del panel puede subir o bajar dependiendo de dónde se ubique, si al subir voltaje sube potencia, el punto actual está a la izquierda del MPP y hay que seguir subiendo voltaje, pero si al subirlo baja la potencia, el punto ahora está a la derecha del MPP y hay que bajar voltaje. Debido a que diferentes horas y condiciones del día darán diferentes dimensiones de la gráfica, el MPP va a estar moviéndose por lo que se debe estar repitiendo este proceso mientras haya irradiación.

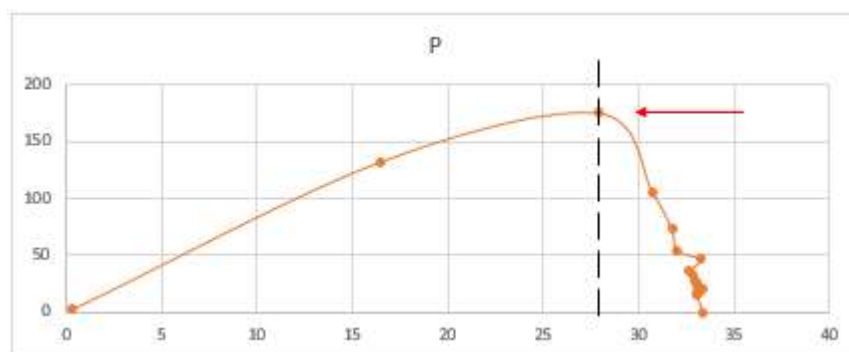


Figura 8. Gráfica de potencia señalando el MPP del panel.

Capítulo 2. Convertidor CD-CD

Será el encargado de recibir el voltaje y corriente de máxima potencia de los paneles y entregarlos al banco de baterías ajustando el voltaje y corriente de modo que no dañe el banco y estas sigan recibiendo la máxima potencia posible.

A pesar de que la corriente de los paneles y baterías sea del mismo tipo (CD), no se deben conectar directamente debido a las variaciones de voltaje que pueden llegar hasta los 154 V y para un banco de 96 V, ese voltaje los puede dañar es necesario ajustar el voltaje de salida para esos 96 V.

Se usará un convertidor Buck para bajar el voltaje de los paneles al voltaje del banco de baterías. Su diagrama básico es el mostrado en la Figura 9:

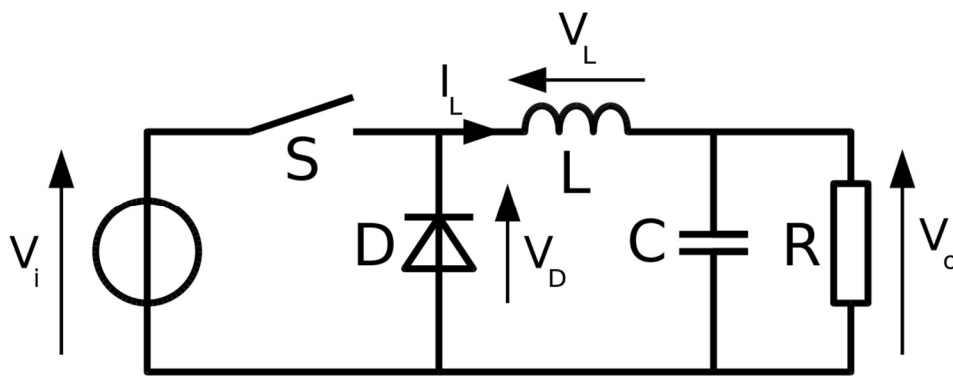


Figura 9. Topología básica del convertidor Buck.

2.1 Diseño

Se empieza con los datos conocidos sobre los paneles. Son 5 paneles conectados en serie, entonces el voltaje de máxima potencia (30.9 V) se multiplica por 5, pero la corriente se conserva. Esto da un total de 154.5 V como el nuevo voltaje de salida máximo del sistema el cual entrará al convertidor y la salida será de 96 V porque es ese el valor deseado. Cada panel puede entregar hasta 260 W de potencia e independientemente de cómo se conecten, esa potencia se sumará dando un total de 1300 W. Conociendo la potencia máxima y el voltaje deseado, se obtiene la corriente máxima del sistema.

$$\frac{P_{max}}{v} = I_{max} \quad (1)$$

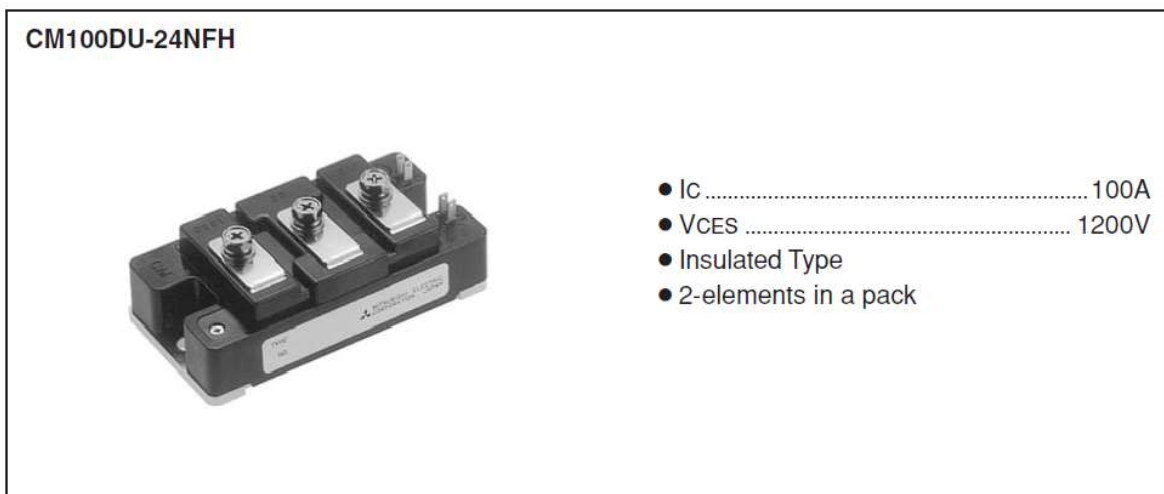
$$\frac{1300w}{96v} = 13.54A \quad (2)$$

Ahora se calculan los valores de rizo de voltaje y corriente. El rizo de corriente del inductor será el 20% de la corriente máxima, mientras que el rizo de voltaje del capacitor será el 1% del voltaje deseado.

$$I_{ripp} = \frac{13.54}{5} = 2.708 \quad (3)$$

$$V_{ripp} = \frac{96}{100} = 0.96 \quad (4)$$

Y, por último, la frecuencia de conmutación. Esta frecuencia está limitada por la capacidad del controlador para generar los PWM de alta frecuencia y por el límite de conmutación del interruptor (MOSFET o IGBT). El conmutador a usar como referencia en el proyecto es mostrado en la Figura 10. Al ser un IGBT que puede conmutar desde 30 kHz hasta 60 kHz, se decidió usar una frecuencia de 35 kHz.



APPLICATION

High frequency switching use (30kHz to 60kHz).
 Gradient amplifier, Induction heating, power supply, etc.

Figura 10. Descripción general del módulo IGBT.

Con esta información, se pueden obtener los valores del capacitor e inductor.

$$L = \frac{V_{out} * (V_{in} - V_{out})}{f_s * \Delta I_L * V_{in}} \quad (5)$$

$$L = \frac{96(154.5 - 96)}{35000 * 2.708 * 154.5} = 0.3835mH \quad (6)$$

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 * f_s * \Delta V_{out}} \quad (7)$$

$$L = \frac{96(154.5 - 96)}{35000 * 2.708 * 154.5} = 0.3835mH \quad (8)$$

La Figura 11 muestra el convertidor con los valores calculados para obtener el voltaje y corriente deseados en el banco de baterías que aquí es representado como una resistencia.

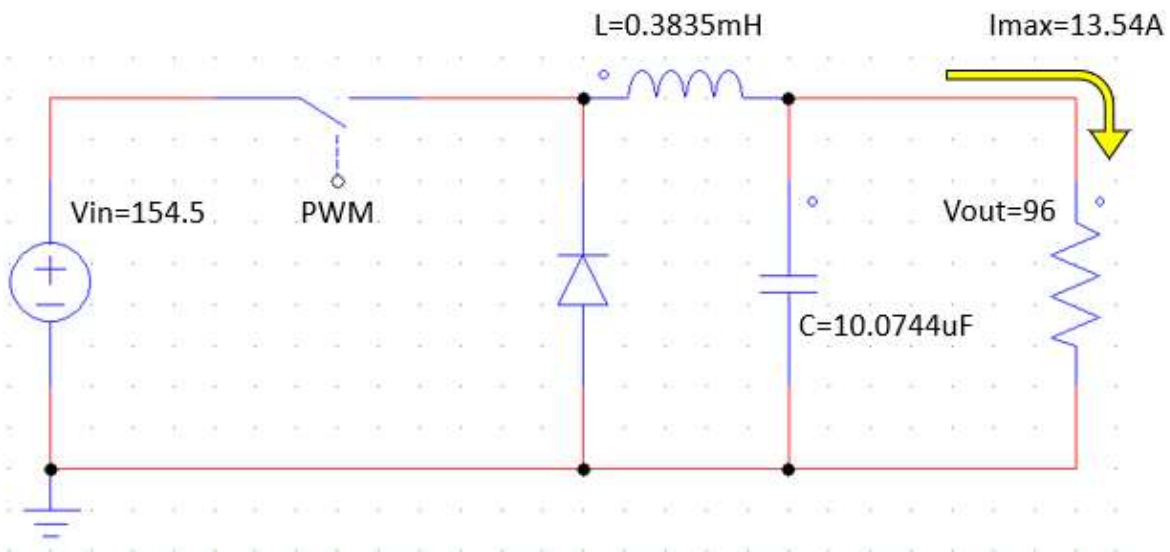


Figura 11. Convertidor Buck con valores de componentes, voltajes y corrientes.

Usando PSIM para simular el convertidor, la Figura 12 muestra los resultados del voltaje y corriente en la carga al usar los valores calculados anteriormente, mientras que en la Figura 13, ambas gráficas presentan oscilaciones causadas por la conmutación que son drásticamente reducidas gracias al capacitor e inductor que actúan como filtros y la Figura 14 muestra los valores entre los que conmuta, acercándose demasiado a los valores calculados de 96 V y 13.54 A.

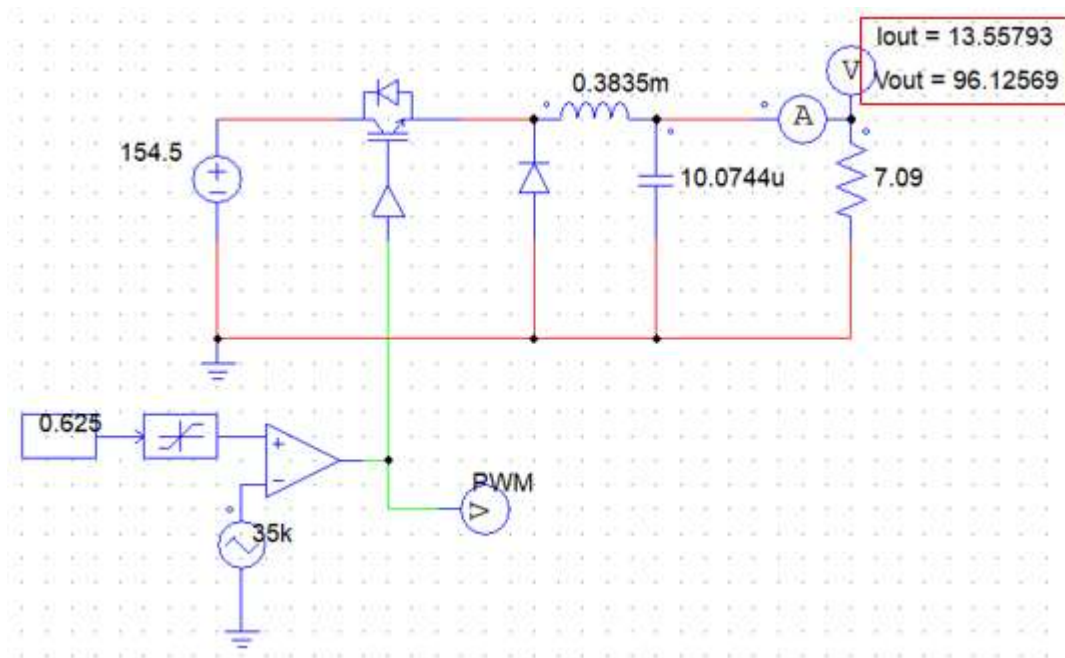


Figura 12. Convertidor Buck con resultados de simulación.

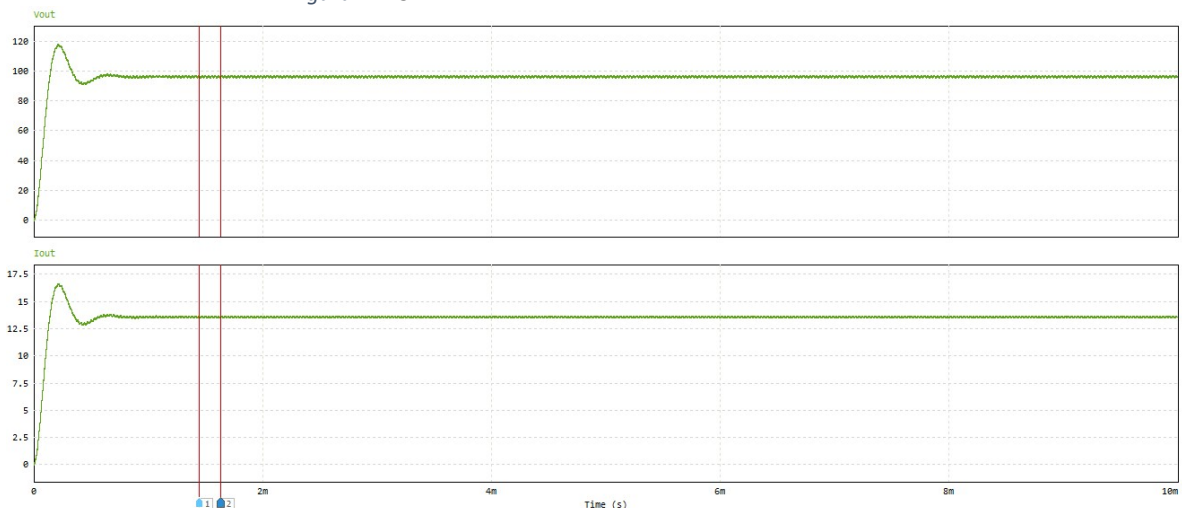


Figura 13. Gráficas de voltaje y corriente de salida respectivamente.

Measure						
	X1	X2	Δ	Average	Average X	RMS
Time	1.44201e-03	1.63009e-03	1.88088e-04			
Vout	9.70780e+01	9.61540e+01	-9.23972e-01	9.65604e+01	9.65604e+01	9.65610e+01
Iout	1.36922e+01	1.35619e+01	-1.30320e-01	1.36192e+01	1.36192e+01	1.36193e+01

Figura 14. Valores de voltaje y corriente de salida respectivamente.

Para simular una carga de 96v que consumiera la máxima corriente del sistema, se usó una resistencia de 7.09 Ω obtenida por ley de Ohm. Las gráficas muestran el comportamiento del voltaje y corriente de la carga respectivamente logrando llegar a los valores estimados. El ciclo de trabajo (tiempo proporcional respecto al periodo al que se mantiene un alto en el PWM) se obtuvo en base a la siguiente relación:

$$V_{out} = D * V_{in} * \eta \quad (9)$$

$$\frac{96}{154.5 * 0.994} = 0.625 \quad (10)$$

El valor de 0.994 representa la eficiencia del convertidor, ya que se usaron elementos ideales, la eficiencia de la simulación es de 99.4%, pero la eficiencia real puede estar entre el 85% o 90%.

El convertidor, con los valores conocidos, estimados y calculados, ya puede tomar el máximo voltaje de potencia (154.5 V) y reducirlo a los 96 V deseados, pero debido a que el módulo IGBT que se va a usar tiene en su interior 2 IGBT interconectados, el controlador deberá hacer conmutar uno, mientras que el otro se mantendrá apagado para que esté accionado su diodo de protección, como se muestra en la Figura 15.

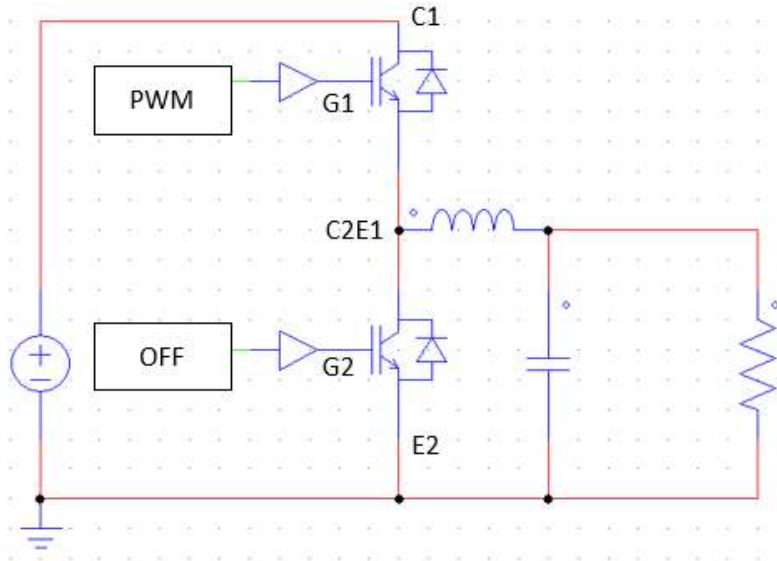


Figura 15. Convertidor Buck con módulo de 2 IGBT.

Los MOSFET e IGBT tienen en su interior lo que se puede considerar como un diodo de protección entre su drenador y fuente (colector y emisor para los IGBT) de modo que estos pueden comportarse como tal, siempre y cuando estén recibiendo un 0 en su entrada de control (Gate), por lo que se elimina la necesidad de usar un diodo en la malla del inductor y capacitor, pues el diodo de protección integrado en el IGBT hace esa acción. El diseño general del convertidor sin anexar control en lazo abierto es el mostrado en la Figura 16.

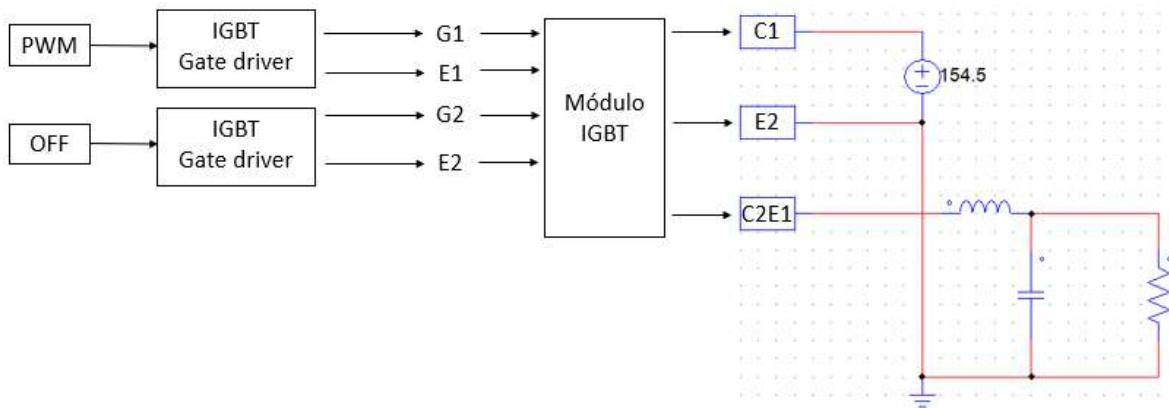


Figura 16. Convertidor Buck con controladores de compuerta.

2.2 IGBT gate driver

Los PWM generados del microcontrolador no pueden entrar directamente al módulo IGBT por las siguientes razones:

- 1) El microcontrolador sólo genera PWM cuyos voltajes oscilan entre 5 y 0v, mientras que los IGBT, dependiendo del modelo, pueden necesitar de 15 a 20v para conmutar.
- 2) Para accionarlos, requieren de un “diferencial de potencial” entre su gate y emisor.
- 3) Se necesita de un sistema que separe la parte de control de la parte de potencia y los mantenga aislados uno del otro.

El gate driver será capaz de enviar los PWM al módulo IGBT sin riesgo de que la parte de control (el microcontrolador) sufra algún tipo de daño causado por los altos voltajes y corrientes del módulo. Se usará el modelo VLA502-01 como gate driver que, junto con sus componentes necesarios para su funcionamiento, entregarán los PWM del microcontrolador al módulo. Su diagrama de conexiones es mostrado en la Figura 17 mientras que la Figura 18 muestra la lista de componentes.

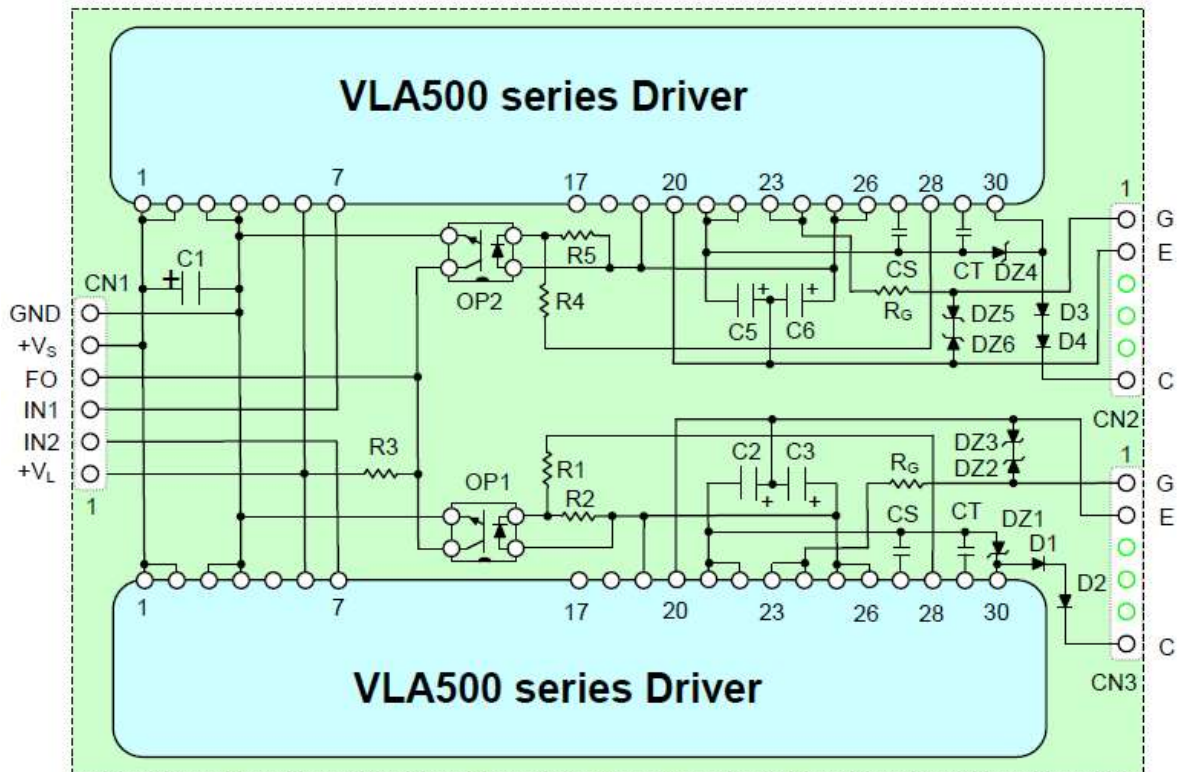


Figura 17. Esquemático sugerido de hoja de datos del controlador de compuertas.

Designation	Typical Value	Description	Example: Mfg./PN
D1,D2,D3,D4	0.5 A, 1000V	V _{CE} detection diode – ultra fast recovery	ON Semi/MUR1100E
DZ2, DZ3, DZ5, DZ6	16V, 1W	Gate Voltage Surge Protection	1N4745
DZ1, DZ4	30V, 1W	Detect input pin surge voltage protection	1N4751
C1, C2, C3, C5, C6	1000 µF, 35V	Power supply filter – Electrolytic, low Impedance	Panasonic EEU-FC1V102
CS	0-1000 pF	Adj. soft shutdown – Multilayer ceramic or film**	EPCOS B37979-----
CT	0-200 pF	Adj. trip time - Multilayer ceramic or film**	EPCOS B37979-----
R1, R4	4.7kΩ, 0.25W	Fault sink current limiting resistor	
R2, R5	3.3kΩ, 0.25W	Fault signal noise suppression resistor	
R3	4.7KΩ, 0.25W	Fault feedback pull-up resistor	
OP1, OP2	NEC PS2501	Opto-coupler for fault signal isolation	NEC/ PS2501
CN1, CN2, CN3	MTA .100"	Input and gate drive connectors*	AMP 641216-6

Figura 18. Especificaciones de componentes del esquemático sugerido.

La Figura 19 muestra un diagrama esquemático entre los componentes creado con un programa de diseño de placas de circuitos en base al diagrama de la Figura 17. Una vez que el diagrama fue terminado, se creó el diseño del PCB mostrado en la Figura 20.

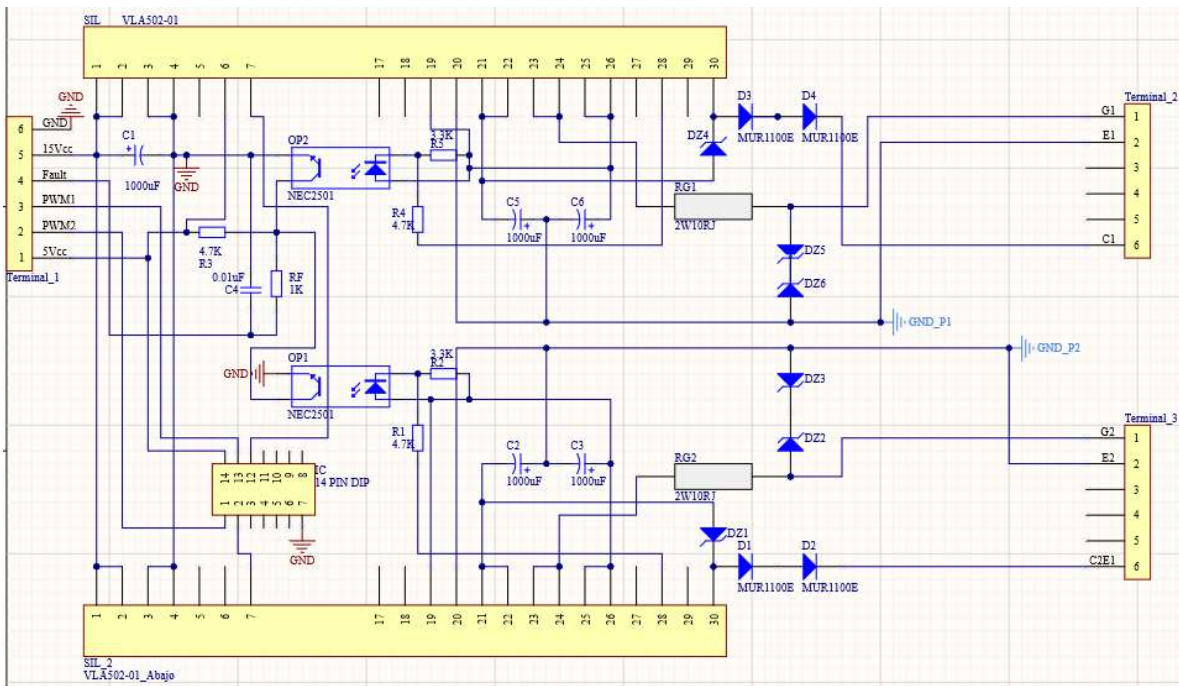


Figura 19. Esquemático hecho en Altium Designer.

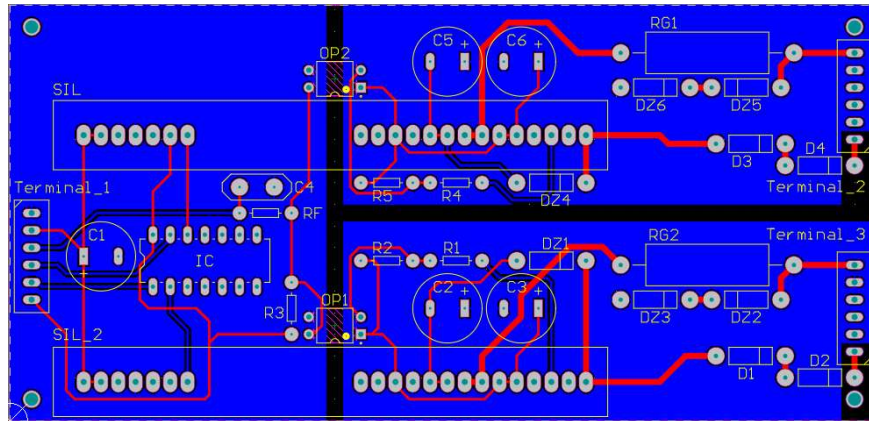


Figura 20. Diseño del PCB hecho en Altium Designer.

2.3 Controlador

Con una fuente de energía y una carga constante, no hace falta manipular ninguna parte del sistema para que entregue los 96 V, pero como el convertidor se va a conectar a los paneles, ahora es una fuente de energía variable en el tiempo y al conectarlo al banco de baterías, la carga también cambiará. El ciclo de trabajo antes mencionado debería de estar cambiando cuando cambie el voltaje para que, ante diferentes voltajes de entrada, se conserve el voltaje de salida lo más constante posible e incluso si la carga en la salida cambia también. Por lo anterior, se requiere de la implementación de un control como el mostrado en la Figura 21.

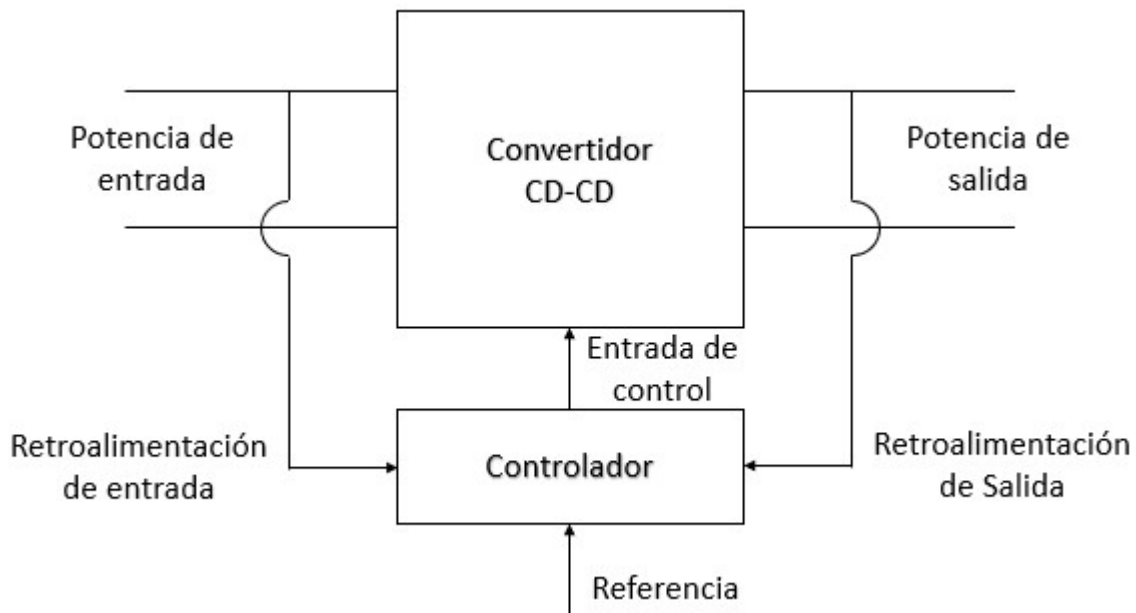


Figura 21. Estructura de convertidor CD-CD con retroalimentación tanto en entrada como salida.

Se requerirá de un control que esté monitoreando y ajustando tanto la entrada como la salida. El convertidor debe entregar energía al banco siempre y cuando se

mantenga en un rango específico donde si se sale del rango (fuese un voltaje muy bajo o alto en la entrada o si el voltaje del banco excede su límite), debe cortar el flujo hacia el banco mientras que si el nivel de energía del banco o la carga cambia (El banco esté lleno o la demanda de energía de la carga cambie) el voltaje de salida no cambie, siempre y cuando siga recibiendo energía dentro del rango.

El sistema sólo debe permitir el flujo de energía hacia el banco cuando el voltaje de entrada sea de un rango específico. Por estar conectados en serie, el voltaje de circuito abierto es de 190.5 V, por lo que éste será el límite superior, mientras que el inferior lo determina la eficiencia de mi convertidor. Si tuviera una eficiencia del 100%, podría recibir un voltaje mínimo de 96 V en la entrada. Si la eficiencia fuera de ser alrededor del 90%, requeriría un voltaje mínimo de 107 V para poder seguir entregando el voltaje deseado.

2.4 Control MPPT

El tipo de control MPPT será el de perturba y observa que consiste en generar perturbaciones en el panel para que entregue diferentes voltajes y corrientes y hallar el que entregue la mayor potencia posible. El algoritmo es el mostrado en la Figura 22.

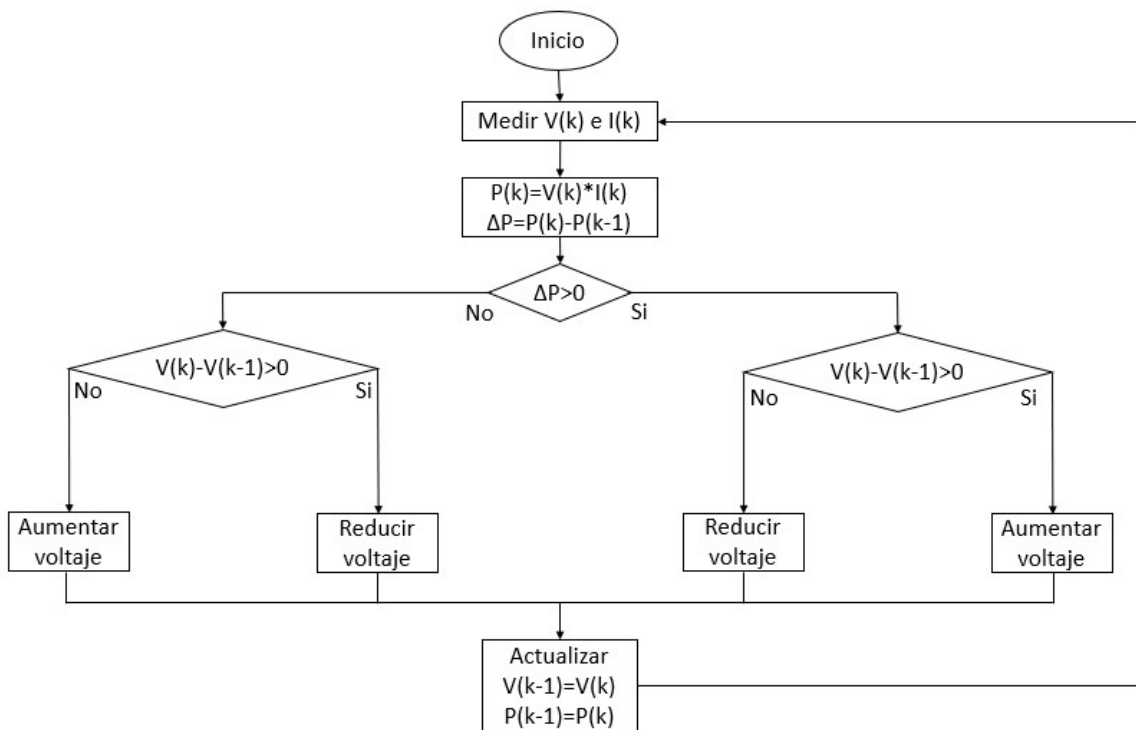


Figura 22. Diagrama de flujo de control MPPT.

Anteriormente, en la sección de paneles, se mencionó que para hallar el punto máximo se debe monitorear la potencia para ver si esta sube o baja conforme el

voltaje variara. El primer paso es tomar como valores de entrada el voltaje y corriente que sale de los paneles y multiplicarlos para obtener la potencia que están entregando y determinar si hubo un cambio entre valor actual y anterior. Si el cambio es mayor a cero, la potencia nueva es mayor que la vieja y se ubica a la izquierda del MPP por lo que se debe seguir aumentando el voltaje.

Si el cambio es menor a cero, la potencia nueva es menor que la vieja y se ubica a la derecha del MPP por lo que ahora se debe reducir el voltaje. El programa mostrado en la Figura 23 no sólo tiene control MPPT, también tiene un control que monitorea los voltajes de entrada y salida donde, en caso de salirse de los parámetros establecidos, corta el flujo de energía hacia las baterías enviando una señal al IGBT para mantenerlo abierto.

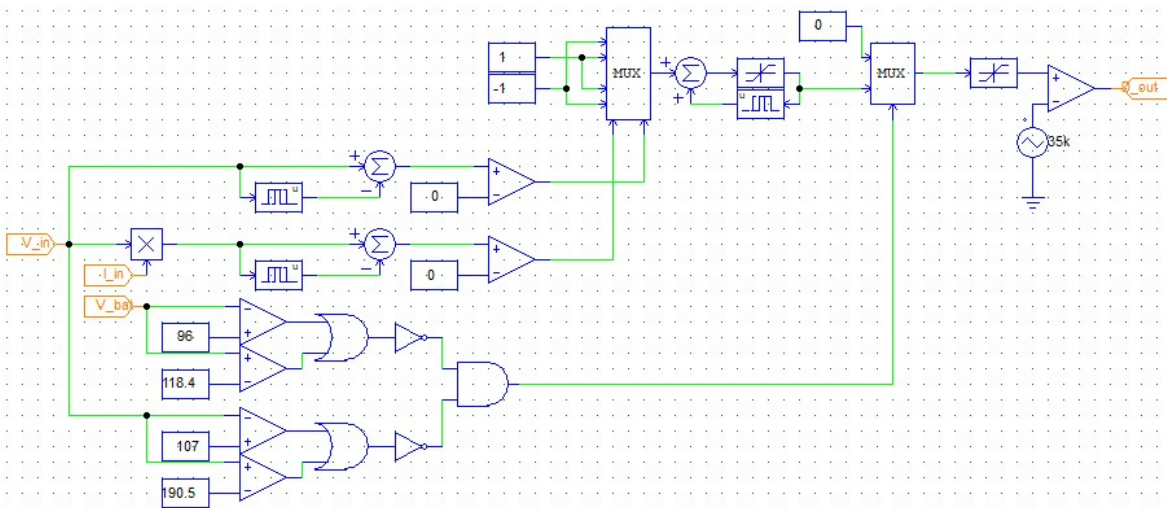


Figura 23. Control MPPT dentro de simulación como un subprograma.

La Figura 24 muestra el convertidor con el control MPPT que está monitoreando la entrada y salida de modo que, en caso de exceder los límites de entrada (107-190.5) o de salida (96-118.4), se detenga el flujo de los paneles abriendo el conmutador.

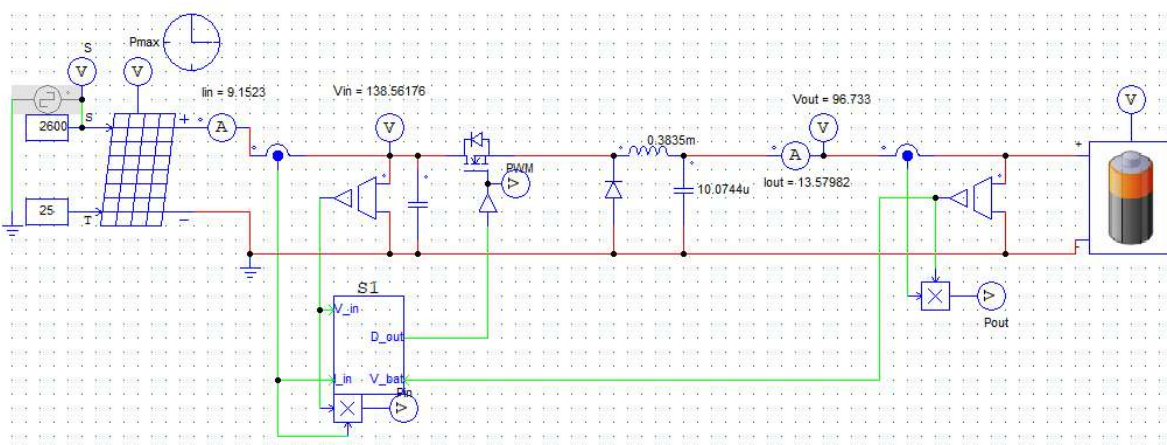


Figura 24. Paneles fotovoltaicos cargando al banco de baterías de reserva usando el convertidor con control MPPT.

En la Figura 25 se puede notar que, en caso de que los paneles entreguen su máxima potencia de 1300 W, el voltaje de la batería se mantiene cerca de los 96 V, y es la corriente la que cambia para conservar la potencia.



Figura 25. Gráficas comparativas entre potencias y voltajes respectivamente ante un voltaje constante.

También se puede notar en la Figura 26 que, al variar el MPP en el tiempo, la potencia que entra al convertidor está siguiendo a este, siendo capaz de entregar la máxima potencia al sistema conservando el voltaje de salida. Básicamente si la potencia máxima que pueden entregar los paneles cambia, el sistema va cambiando el voltaje y la corriente de entrada para ajustarse a la nueva potencia máxima y seguir entregando los 96 V en la salida.

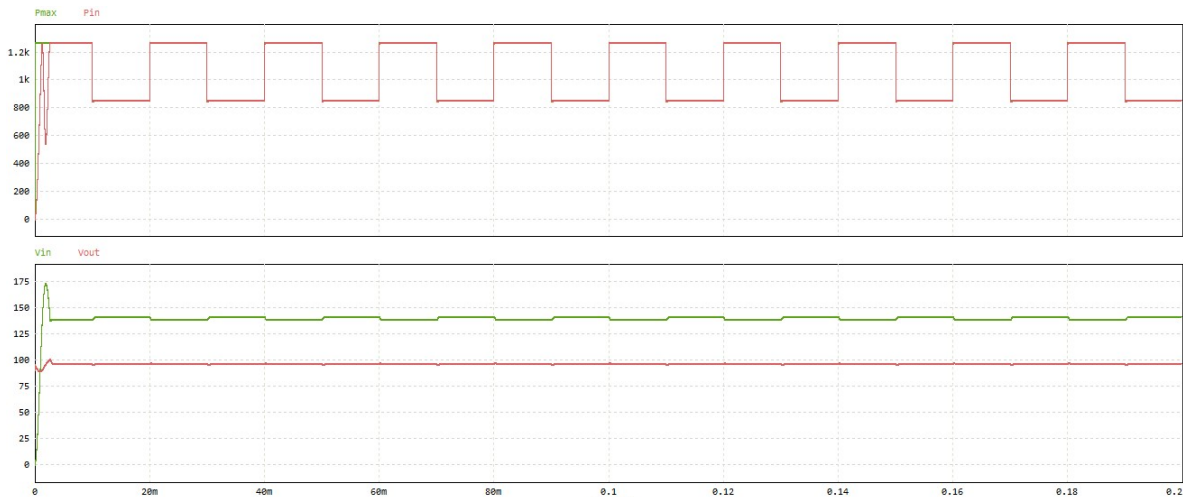


Figura 26. Gráficas comparativas entre potencias y voltajes respectivamente ante voltaje variante.

2.5 Puntos a considerar en el control

Las baterías (en especial las de litio) requieren de un proceso de carga muy específico para mejorar su rendimiento y alargar su vida, de modo que cargarlas únicamente con el voltaje al que operan y con toda la corriente disponible en el momento no es adecuado, por lo que se requiere de un control denominado CCCV. Este tipo de control fija la corriente y voltaje a los valores necesarios para cargar las baterías, primero fijando la corriente hasta que el voltaje llegue a un valor determinado para luego fijar el voltaje hasta que la corriente llegue a un valor de cero, indicando que la carga está completa.

El control de MPPT va a entregar toda la potencia de los paneles al banco de baterías mientras que un controlador CCCV sólo lo que necesiten. Si el control de MPPT quiere entregar más potencia de la que el CCCV considera que necesita el banco, es evidente que ambos controles entrarán en conflicto causando que el control de MPPT entregue toda la potencia al banco, ignorando al control de carga o sea el control de carga quien ignore al control de MPPT causando que el banco se cargue sin aprovechar la máxima potencia, así que el implementar ambos controles podría ser difícil o imposible. Aunque existen modelos comerciales que afirman contar con ambos controles, es posible que no sean del todo ciertos o que no los implementen al mismo tiempo.

Capítulo 3. Banco de baterías

El banco se encarga de recibir, almacenar y entregar la energía recolectada de los paneles. Debido a que los paneles son una fuente intermitente de energía, no se pueden usar para cargar al vehículo eléctrico de manera directa, pues estos vehículos requieren de un proceso de carga muy específico usando una fuente de energía constante como la red eléctrica. Las baterías podrán entregar la energía necesaria para cargar al vehículo eléctrico dependiendo tanto de la capacidad total de estas como la total del vehículo y dado que en estos sistemas se usan considerables cantidades de energía, se usan los kilowatts hora (kWh) como unidades. Se usarán baterías de ácido plomo, pues a pesar de ser voluminosas y pesadas, son más robustas, baratas, seguras y son capaces de recibir altos niveles de corriente sin dañarse (y no van a estar dentro del vehículo eléctrico). Las baterías de ácido plomo a usar son modelo CL-31T/S-190M de 12 V 122 Ah (1.464 kWh) cuyas características se muestran en la Figura 27.

BATERÍA PARA APLICACIONES FOTOVOLTAICAS



Especificaciones del Producto

BCI	Aplicación	Voltaje	Polaridad	Dimensiones			Peso (kg)	Garantía (meses)	
				Largo	Ancho	Alto*		Sin Costo	Prorrateo
31T	Ciclado Profundo	12	(+) / (-)	330	172	239	27.7	12	0

*La altura máxima incluye el poste

Amperios / Hora				Descarga (Amperios)				Capacidad de Reserva (Minuta)			Energía (kWh)		
@ 5hrs	@ 10hrs	@ 20hrs	@ 100hrs	@ 5hrs	@ 10hrs	@ 20hrs	@ 100hrs	@ 25 Amps	@ 55 Amps	@ 75 Amps	@ 5hrs	@ 20hrs	@ 100hrs
88	99	110	122	17.5	9.9	5.5	1.2	190	-	51	1.05	1.32	1.46

Voltaje del Sistema	Ajustes de Voltaje de Cargadores (@25° C)					
	6V	12V	24V	36V	48V	60V
Carga Lenta	7.40	14.80	29.60	44.40	59.20	74.00
Carga Flotante	6.60	13.20	26.40	39.60	52.80	66.00
Carga de Nivelación	7.75	15.50	31.00	46.50	62.00	77.50



Figura 27. Tabla descriptiva de baterías de ácido-plomo.

La manera de conectar las baterías para formar el banco, es la mostrada en la Figura 28.

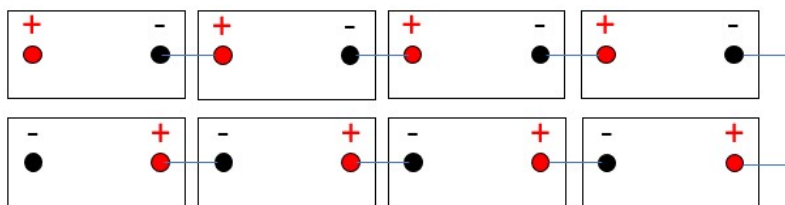


Figura 28. Diagrama de conexión del banco de baterías.

Usando 8 baterías en serie se obtienen los 96 V con una capacidad de 11.712 kWh, es posible que anexando otra serie de 8 baterías en paralelo se conserven los 96v, duplicando la capacidad a 23.424 kWh siendo la capacidad aproximada del banco de baterías de un modelo pequeño de vehículo eléctrico. Para este cargador, sólo se van a usar 8 baterías en serie, como se muestra en la Figura 29.



Figura 29. Banco de baterías.

En base a la tabla de ajustes de voltaje de cargadores mostrada en la Figura 27, el voltaje del sistema para una carga lenta es de 14.8 V por una batería de 12 V y al ser 8 en serie, da un total de 118.4 V, siendo este el voltaje que no debe exceder el cargador. En cuanto a la corriente, la Figura 30 indica que las baterías pueden soportar entre 700 A y 875 A (Que suelen ser los niveles de corrientes necesarios para arrancar un vehículo de combustión interna) y la corriente máxima que recibirían sería de 13.54 A, por lo que no debería de haber problema.



Figura 30. Parte superior de batería indicando valores de operación en el lado derecho.

Capítulo 4. Cargador

Teniendo la fuente de energía (banco de baterías), hay que cargar el banco de baterías dentro del vehículo eléctrico. No se puede realizar de forma directa, requiere de una interfaz que lo haga de manera muy específica.

4.1 Aislamiento galvánico

Como medida de protección y el hecho de que el banco de baterías del vehículo eléctrico tiene una tierra flotante, se usa un convertidor CD-CD aislado que pueda suministrar la energía sin necesidad de haber alguna conexión eléctrica entre la fuente de energía y el vehículo eléctrico, usando un transformador de alta frecuencia. Los transformadores sólo pueden funcionar con corriente alterna, por lo que este convertidor requiere convertir la corriente alterna temporalmente y regresarla a continua, para eso el convertidor se compone de un inversor y un rectificador como se muestra en la Figura 31.

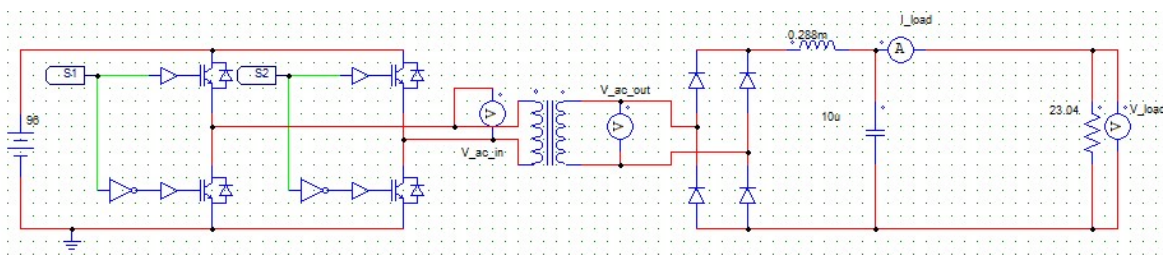


Figura 31. Convertidor CD-CD aislado para cargar vehículo eléctrico.

Para el inversor, se requieren 2 señales PWM desfasadas 180 grados una de la otra para que el voltaje entre los nodos de la bobina primaria oscile. La Figura 32 muestra cómo, al combinar ambas señales, se crea un voltaje que oscila.



Figura 32. Gráficas mostrando los 2 PWM de entrada y el voltaje resultante respectivamente.

Si el voltaje del primer PWM se le resta al del segundo, el resultado es un voltaje que está oscilando entre +96 y -96 pues ese es el voltaje de la fuente de energía (Banco de baterías conectado a paneles). Este voltaje oscilante en la bobina primaria induce una corriente en la bobina secundaria cuyo voltaje dependerá de la relación de vueltas entre las bobinas.

La fórmula del ciclo de trabajo de este convertidor es el mostrado en la ecuación (11).

$$V_{out} = \frac{2D}{n} V_{in} \quad (11)$$

Donde “n” es la relación de vueltas entre las bobinas y es el valor que hay que calcular. Despejando la ecuación (11), obtenemos la ecuación (12) que tendrá un ciclo de trabajo de 0.25 pues este no debe exceder el 0.5

$$n = \frac{D * 2 * V_{in}}{V_{out}} \quad (12)$$

El voltaje de nuestra fuente es de 96 V y el del banco de baterías del vehículo es de 240 V, dando como resultado 0.2.

$$n = \frac{0.25 * 2 * 96}{240} = 0.2 \quad (13)$$

Por lo tanto, la relación de vueltas en las bobinas es de 1:5 esto significa que, por cada vuelta del primario, el secundario tendrá 5. En la Figura 33, se puede notar que el voltaje de oscilación del secundario es mayor que el del primario. La relación de vueltas entre las bobinas es de 1:5 haciendo que el voltaje de salida sea 5 veces mayor a la entrada (480 V).



Figura 33. Gráficas comparando voltaje de entrada al transformador con el de salida respectivamente.

La Figura 34 muestra los valores entre los que oscilan el devanado primario y secundario respectivamente, indicando valores muy cercanos a los calculados.

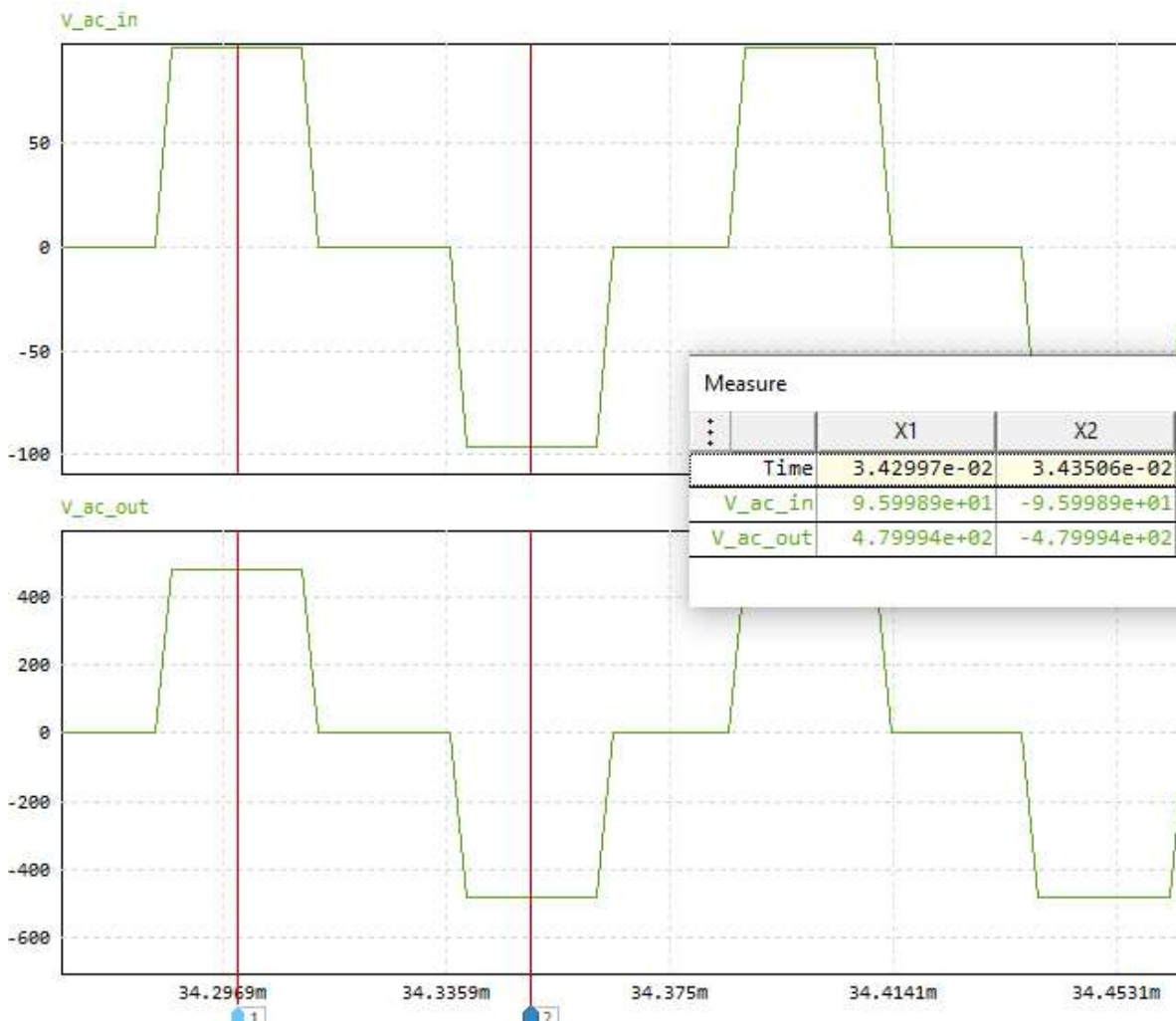


Figura 34. Gráficas y tabla mostrando valores de voltajes de entrada y salida de transformador respectivamente.

Al ser un voltaje AC, se debe rectificar usando los diodos seguido de unos filtros pasivos para suavizar el voltaje y la corriente para que este voltaje de salida CD se use para cargar al banco del vehículo eléctrico. Usando valores calculados, estimados.

$$L_{min} = \frac{(1 - 2(0.25)) * 8}{4 * 10kHz} = 0.1mH \quad (14)$$

$$C_{min} = \frac{(1 - 2(0.25)) * 240}{32 * 2.4 * (10kHz)^2} = 15.625nF \quad (15)$$

Las simulaciones mostraban grandes oscilaciones con el valor calculado del capacitor, dado que es el valor mínimo, se decidió usar un valor más grande (100uF), logrando obtener las gráficas de la Figura 35.

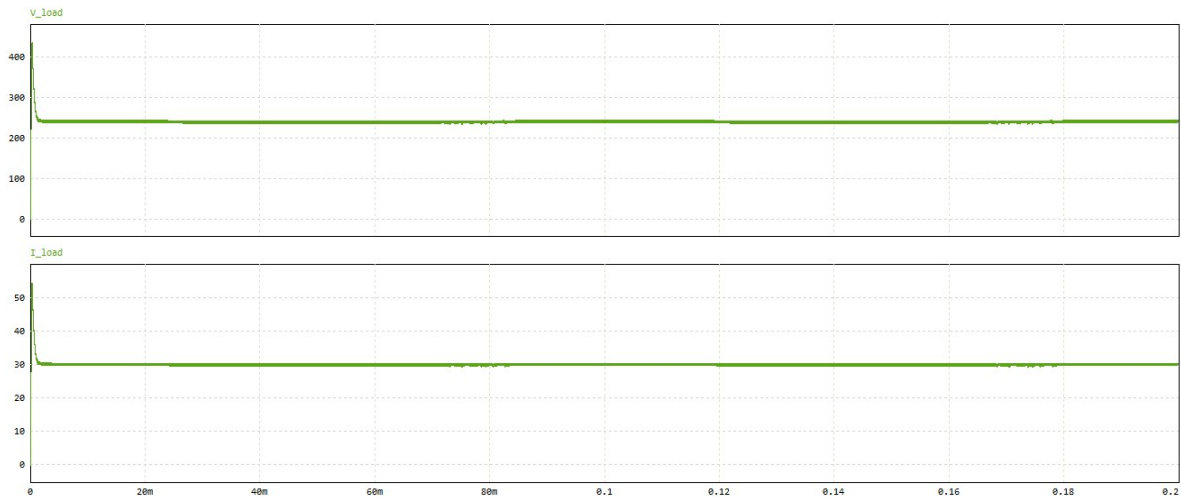


Figura 35. Gráficas de voltaje y corriente de salida respectivamente ante una carga constante.

El banco de baterías del vehículo requiere de 30A para cargarse en CC, así que se usó una carga de 8Ω para representar una carga de 240v con 30A.

Capítulo 5. Vehículo eléctrico

Las baterías a usar como referencia para representar el banco de baterías del vehículo eléctrico se muestran en la Figura 36.



Figura 36. Batería de litio LiFePO4 CALB100.

Capacidad de 100 Ah

Altura: 215 mm

Ancho: 67 mm

Largo: 142 mm

Peso: 3.2 kg

Tamaño de tuerca: M8

Voltaje nominal: 3.2 V

Voltaje de corte de carga: 3.6 V

Voltaje de corte de descarga: 2.5 V

Ciclo de vida: 2000

Máxima corriente de descarga (10 segundos): 800 A

Impedancia interna: menos de 0.8 mΩ

75 de estas celdas en serie darán un banco de 240 V con 100 Ah (24 kWh).

5.1 Control de carga para baterías de litio (CCCV)

Para mejorar el rendimiento de las baterías y alargar su vida, deben cargarse con un método denominado “corriente constante, voltaje constante” (CCCV). La Figura 37 muestra el proceso de carga el cual consiste en 2 etapas.

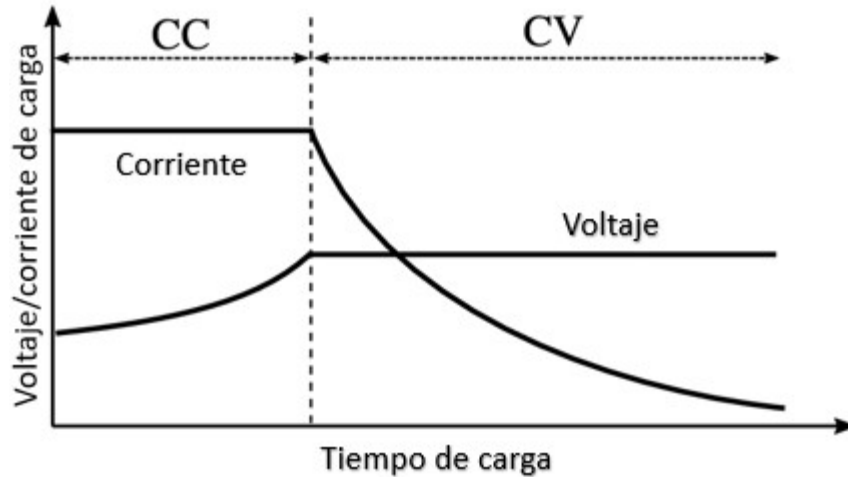


Figura 37. Proceso de carga con control CCCV en una batería.

En la primera etapa, se requiere entregar una corriente constante a la batería, esta empezará a elevar su voltaje y cuando llegue a un valor específico, pasa a la segunda etapa, donde mantiene el voltaje constante al valor obtenido al terminar la primera etapa, la corriente empezará a bajar y cuando llegue a una corriente de prácticamente 0, se habrá cargado completamente. Para poder usar este control, el convertidor debe tener control de voltaje y control de corriente (Al igual que las fuentes de voltaje) donde se deben fijar los valores de voltaje y corriente necesarios para el banco de baterías. Para este banco, el límite de corriente es de 30 A mientras que el límite de voltaje es de 270 V. La Figura 38 muestra cómo está estructurado el cargador ya con el control CCCV.

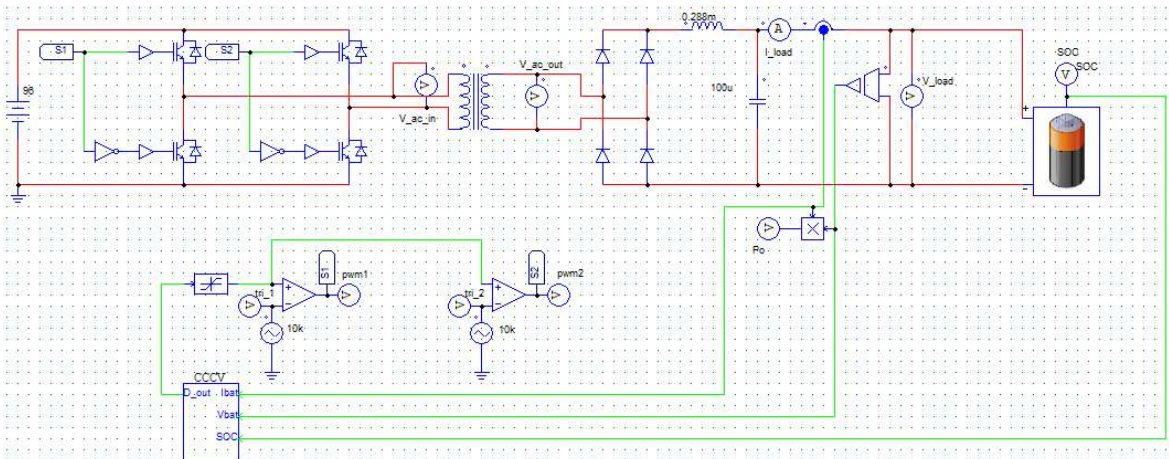


Figura 38. Cargador de vehículo eléctrico con control CCCV.

La simulación es muy lenta para evaluar la carga de una batería de 240 V con 100 Ah desde un estado de carga de 0% hasta el 100%, así que se decidió aumentar el “time step” hasta el máximo posible y reducir la capacidad de almacenamiento del

banco a un centésimo del valor original. El aspecto de la Figura 39 se debe a las conmutaciones del IGBT en la simulación, pero se puede observar cómo la corriente se mantiene constante hasta que empieza a bajar a causa del nivel de voltaje mostrado en la Figura 40, que empieza a subir hasta llegar a un valor específico, haciendo que la corriente empiece a descender hasta ser casi cero.

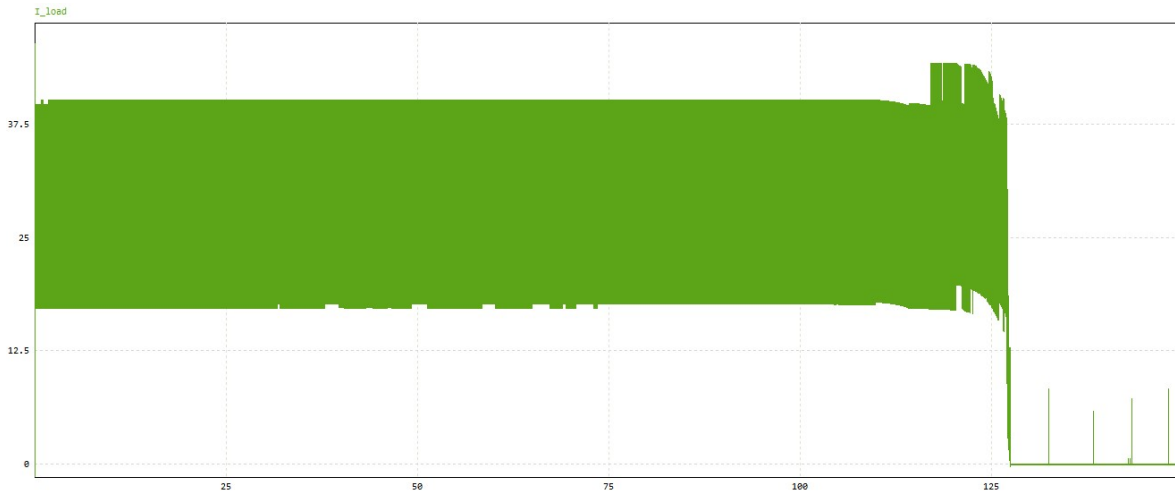


Figura 39. Gráfica de corriente de salida al cargar banco de vehículo eléctrico.

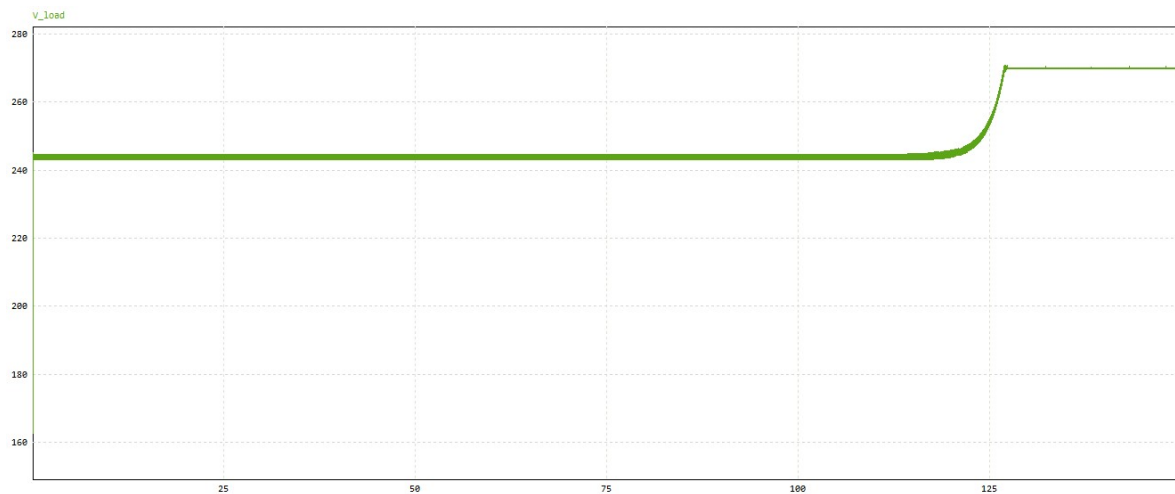


Figura 40. Gráfica de voltaje de salida al cargar banco de vehículo eléctrico.

Usando el valor original de 100 Ah del banco, también se evaluaron las diferentes etapas de carga variando el estado de carga del banco en la simulación. En la Figura 41 se muestra la etapa de control de corriente, donde se fija la corriente en 30 A.

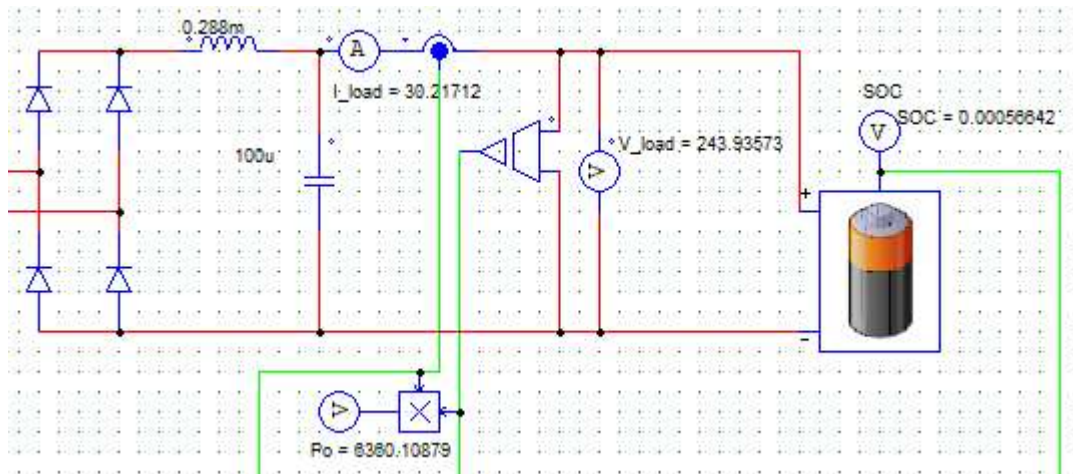


Figura 41. Cargador en etapa de control de corriente

La Figura 42 muestra la etapa de control de voltaje, que es cuando el banco llega a los 270 V. Al llegar a este voltaje, se mantiene en este valor, causando que la corriente empiece a descender.

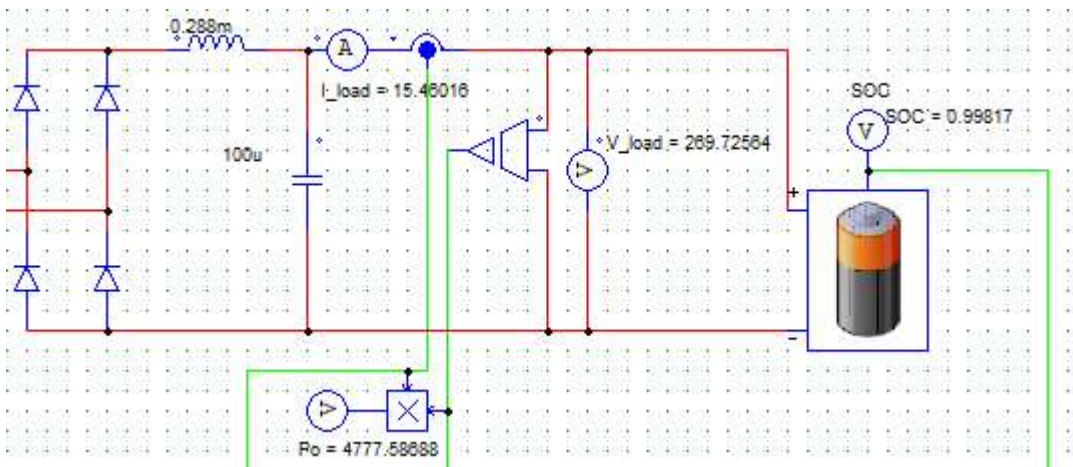


Figura 42. Cargador en etapa de control de voltaje

Finalmente, la Figura 43 muestra cuando la batería está totalmente cargada, haciendo que el control CCCV detenga la carga del banco de baterías.

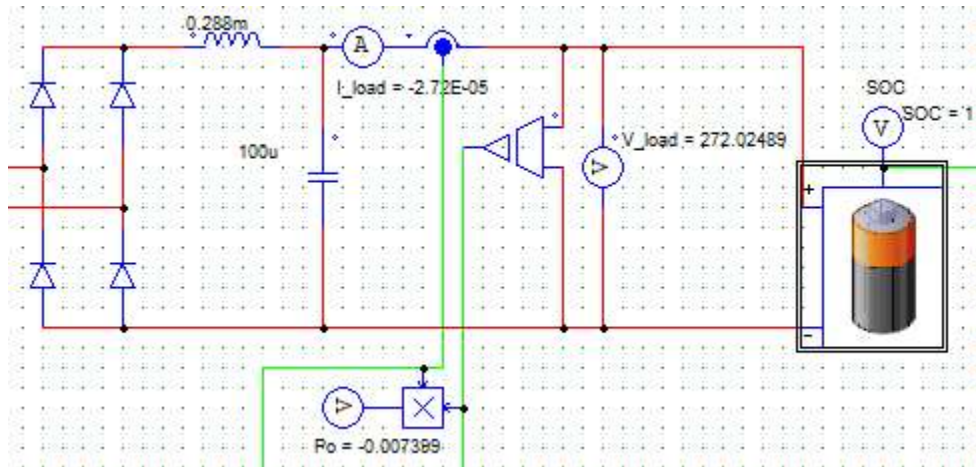


Figura 43. Cargador en etapa de carga completa.

5.2 Sistema de gestión de baterías (BMS)

A diferencia de las baterías de ácido plomo, las de litio son más sensibles a voltajes y corrientes fuera del rango de parámetros especificados en la hoja de datos. En un banco de baterías, cada batería es químicamente diferente, dando como resultado diferentes resistencias internas y, por lo tanto, diferentes tiempos de carga y descarga para cada celda. Esto puede causar daños de sobrevoltaje pues si unas celdas ya están cargadas completamente, siguen recibiendo energía por algunas baterías de la serie que todavía no se han cargado o una sobre descarga en el caso de estar alimentando el tren de potencia del vehículo pues si algunas celdas ya llegaron a una caída de voltaje límite y siguen entregando energía, pueden dañar la celda y afectar el desempeño del vehículo. Como se muestra en la Figura 44, es necesario que exista un sistema que esté monitoreando cada celda de todo el banco y que pueda tomar acción cuando sea debido.

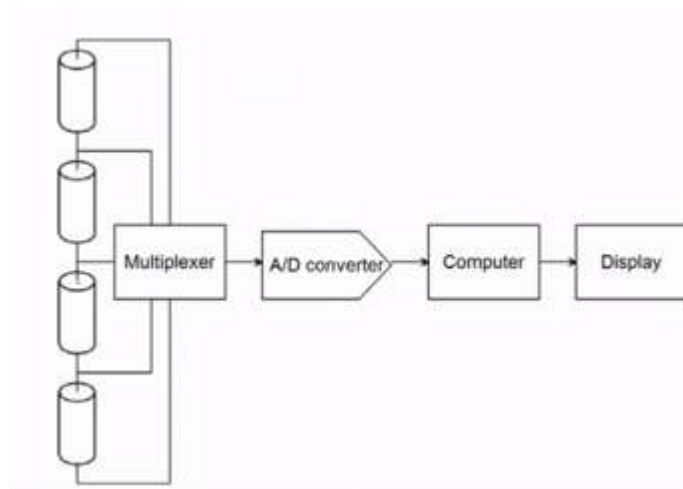


Figura 44. Ejemplo de estructura de un sistema de gestión de baterías (BMS)

Los BMS (Battery Management System) hacen esta tarea, evalúan los voltajes y corrientes que entran y salen de cada celda y dependiendo de los valores toman acción como balanceo de cargas, protección contra corto circuitos, protección contra sobrecarga y sobre descarga incluso pueden contar con monitores de temperatura por si exceden el límite de temperatura de operación. Como es mostrado en la Figura 45 y la Figura 46, dependiendo del modelo, las baterías pueden ya tener un BMS en su interior, haciendo que, en algunos casos, no requiera de un BMS externo, pero de lo contrario habrá que instalar uno que esté monitoreando cada una de las baterías o celdas en serie que conformen el banco del vehículo. Pare este cargador, se asume que el banco de baterías del vehículo eléctrico ya cuenta con un BMS integrado.

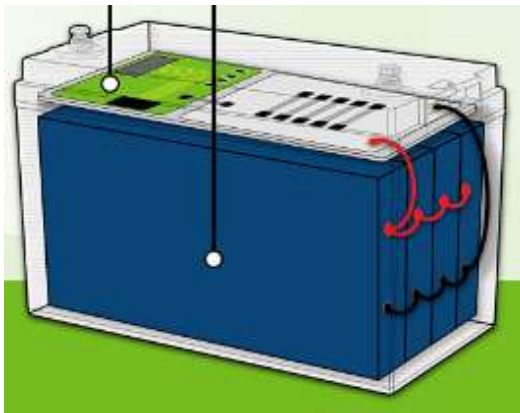


Figura 45. Batería de litio con BMS interno.

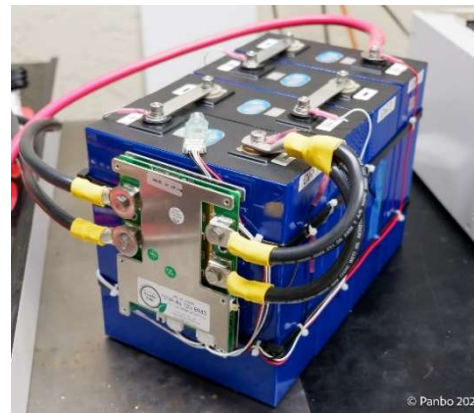


Figura 46. Batería de litio con BMS externo.

Conclusiones

De los resultados, se puede concluir que el cargador es capaz de cargar un vehículo eléctrico a partir de energía solar. El MPPT logró implementarse en el primer convertidor CD-CD tomando la máxima potencia posible de los paneles y la entrega al banco de baterías de reserva mientras que el control “corriente constante, voltaje constante” logró implementarse en el segundo convertidor CD-CD siendo capaz de cargar el vehículo eléctrico y, al ser aislado, puede entregar la energía sin que haya contacto eléctrico protegiendo al vehículo eléctrico en caso de falla. El cargador puede funcionar en un vehículo eléctrico pequeño de 24 kWh, por lo que, si se requiere cargar un vehículo eléctrico más grande como de 40 kWh, se requeriría aumentar el número de paneles, baterías del banco y modificar los convertidores y, al ser el mismo principio, ayuda a tener diferentes configuraciones para diferentes vehículos eléctricos ampliando la disponibilidad de este sistema que podría ayudar a la red eléctrica pues factores como economía, infraestructura, ecología y normas de transporte podrían causar el aumento del uso de vehículos eléctricos en el país, saturando la red eléctrica y un cargador para estos vehículos que funcione fuera de la red es una buena alternativa para reducir la carga a esta y ampliar la cobertura de cargadores en el país, sobre todo en carreteras que conectan ciudades y lugares donde la red eléctrica no puede llegar.

Referencias

- Hauke, B. (Agosto de 2015). *Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage (Application Report No. SLVA477B)*. Obtenido de Texas Instruments:
<https://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf>
- Mohammed Amine Fares, L. A. (21-24 de Abril de 2017). *Photovoltaic panels characterization and experimental testing*. Obtenido de ScienceDirect:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021732684X>
- Ned Mohan, T. M. (2009). *Electrónica de potencia*. Ciudad de México: Mc Graw Hill.
- Owais Nazir Lohar, D. S. (29 de Noviembre de 2021). *Design of a solar charger for electric vehicles*. Obtenido de SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3997206>
- Rashid, M. H. (1995). *Electrónica de potencia*. Naucalpan de Juárez: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- Robert L. Boylestad, L. N. (2009). Celdas solares. En L. N. Robert L. Boylestad, *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos* (págs. 822-825). Naucalpan de Juaréz: Pearson.
- Robert W. Erickson, D. M. (2000). *Fundamentals of Power Electronics*. Secaucus: Kluwer Academic Publishers.
- Salman Salman, X. A. (17 de Agosto de 2018). *Design of a P-&O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200W PV system*. Obtenido de SpringerOpen:
<https://pcmp.springeropen.com/articles/10.1186/s41601-018-0099-8>
- Tecnología y materiales sustentables*. (27 de Agosto de 2021). Obtenido de
<https://www.tmsmx.com/bateria-solar-12v-122-ah-cl-31t-s-190m/>
- Weixiang Shen, T. T. (Julio de 2012). *Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview*. Obtenido de IEEE Xplore: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6360973>