

SISTEMA DE CARGA DE BATERÍAS MEDIANTE EL USO DE ENERGÍA SOLAR

DANIEL MAURICIO MARIÑO VIEIRA

DIRECTOR: ING GABRIEL PERILLA GALINDO

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BOGOTÁ D.C. 2010

## **Tabla de contenido**

<b>Introducción</b>	<b>3</b>
<b>Marco Conceptual</b>	<b>3</b>
Paneles Solares	3
Celdas de Silicio	4
Baterías de plomo ácido	6
<i>Métodos de carga</i>	7
Convertidores DC/DC	9
Descripción general y diagrama en bloques	11
Estándares vigentes en vehículos eléctricos	12
<b>Especificaciones</b>	<b>13</b>
<b>Desarrollos</b>	<b>13</b>
Etapa de potencia	13
Modelo de señal Grande	18
Modelos de señal pequeña	20
Etapa de control	24
Consideraciones para la implementación	28
<b>Análisis de Resultados</b>	<b>29</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>34</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>35</b>

## **Introducción**

El presente documento expone el desarrollo e implementación de un cargador de baterías del tipo Plomo-Ácido, a partir de energía solar siendo regulada por medio de un convertidor por conmutación que ofrece una alta eficiencia. Este tipo de energía, debido a la forma en que se adquiere, no tiene niveles constantes de tensión y de corriente; al contrario, cambian de acuerdo al entorno con el nivel de luminancia que la celda fotovoltaica recibe del ambiente, lo cual es un inconveniente a la hora de alimentar los circuitos y lograr una carga adecuada para los acumuladores; este cargador se enfoca en la industria automotriz cumpliendo con la reglamentación que ésta exige para el uso en vehículos eléctricos, tales como niveles de tensión máximos, cableado, sistemas de protección y demás que estén establecidos por la reglamentación actual.

El hecho de hacer uso de este tipo de tecnologías implica una inversión inicial, un tanto fuerte, pero el beneficio a largo plazo es notable, pues no es necesario pagar a ninguna empresa por el manejo u obtención de la energía, lo cual confluente en un alivio económico para la sociedad, únicamente quedando ligado al mantenimiento preventivo y correctivo que establezcan las normas. Suponiendo una situación real, un trabajador podría dejar su vehículo en el estacionamiento expuesto a la luz solar, y mientras cumple su horario de trabajo, el vehículo reuniría energía para volver a casa, esto teniendo en cuenta que en una ciudad con alto tráfico o en el caso de embotellamientos en las vías, el vehículo no consumiría energía mientras se encuentra detenido, con lo cual se hace uso eficiente de la energía, además las distancias en ciudades de países en vía de desarrollo (lugares en los cuales se tiene pensado implementar la tecnología), no son muy extensas.

Se obtiene un sistema de carga que se comporta de manera adecuada dentro de los parámetros que el fabricante Kyocera proporciona sobre sus paneles solares, así como el cumplimiento por lo establecido en la hoja de especificaciones del tipo de baterías usadas, confluente en un sistema que es capaz de manipular la energía recibida y entregarla de manera apropiada a los acumuladores. Por otra parte el sistema está habilitado para llevar el banco de baterías a tensión de igualación y flotación por medio de un selector manual.

Este proyecto es el punto de partida para el desarrollo total del sistema para ser implementado en un vehículo, el cual tendrá continuidad en los trabajos de maestría y tendrá el apoyo no sólo de Ingeniería Electrónica, sino también de Ingeniería Mecánica, Diseño Industrial, y algunas otras disciplinas con un aporte menor, lo que hace que se trate de un macro-proyecto integro y completo a largo plazo.

## **Marco Conceptual**

El presente marco conceptual se dividirá en cuatro secciones, la primera corresponderá a todo lo que concierne respecto a la energía solar; la segunda parte estará constituida por información sobre el uso y manipulación de baterías de plomo ácido en sistemas eléctricos y la tercera parte tendrá un contenido sobre convertidores DC/DC que sean útiles a la aplicación planteada, y por otra parte relacionará los temas tratados para así lograr una integración total del proyecto.

### **Paneles Solares**

Es la forma más directa de convertir la radiación solar en energía eléctrica. Su principio de funcionamiento llamado efecto fotovoltaico, data de 1839 de Henri Becquerel, y está definido como la aparición de un potencial eléctrico entre dos electrodos que se encuentran embebidos en un medio sólido o líquido cuando a éste se le aplica radiación lumínica.

Las celdas solares están compuestas por junturas de semiconductores de tipo PN, las cuales absorben la radiación solar y ésta induce potencial en los contactos frontales y traseros de la celda.

A continuación se muestra la estructura general de una celda solar.

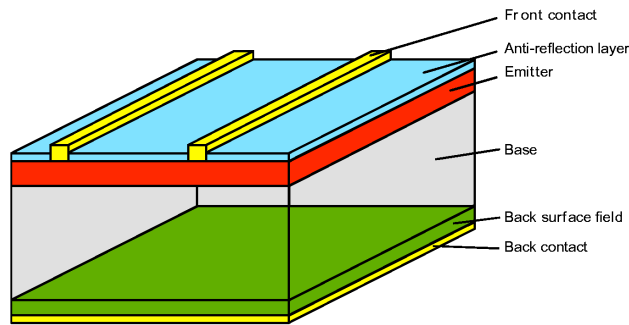


Figura 1. Esquema general de una celda solar. [4]

Los llamados paneles solares están constituidos por arreglos de varias celdas solares en paralelo y serie, con lo cual se obtiene una mayor cantidad de potencia convertida.

### Celdas de Silicio

En las celdas de silicio, cuando la juntura es iluminada, se generan pares de carga lo que genera un potencial en los extremos de la juntura, como bien es sabido la juntura tipo PN es un diodo, que en este caso presenta sensibilidad lumínica, por lo cual va a trabajar bajo la teoría clásica de semiconductores en cuanto a movimientos de pares electrón hueco; este movimiento es lo que genera en si la corriente que produce la celda, y ésta puede ser entregada a una carga sin problema.

Como se había mencionado la celda no es mas que un diodo con fotosensibilidad, por lo cual ésta puede ser descrita mediante las siguientes ecuaciones.

$$I = I_0(\exp(V_A / V_T) - 1) - I_L$$

$$V_{OC} = V_T \ln(I_L / I_0 + 1)$$

Éstas dos ecuaciones describen el funcionamiento de la celda en voltaje y en corriente.

Específicamente la ecuación de voltaje está especificando la tensión de circuito abierto, ya que la tensión varía dependiendo de la carga, por otra parte la ecuación de corriente es general para la celda. De ella se puede extraer la corriente de corto circuito  $I_{SC} = I_L$ , donde  $I_L$  es la corriente generada por la luminosidad.

Como se trabajará físicamente con un panel solar, es apropiado poseer un modelo del circuito que describa su funcionamiento de una forma fácil y comprensible.

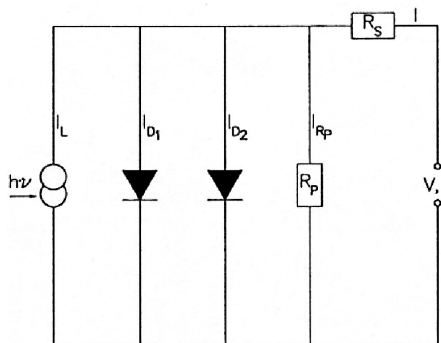


Figura 2. Modelo de circuitos celda solar. [4]

Los parámetros que describen el modelo mostrado en la figura 2 son.

$h\nu$  : Fuente de corriente dependiente de la luminosidad que corresponde a  $I_L$

$I_{D1}, I_{D2}$  : Corriente de saturación de los diodos.

$R_p$  : Resistencia parásita paralelo.

$R_s$  : Resistencia parásita serie.

Como ya se había mencionado antes las celdas dentro de un panel solar se interconectan tanto en paralelo como en serie, cada uno tiene sus ventajas y desventajas.

### Conexión en serie

Principalmente causa un efecto indeseable cuando el panel se encuentra parcialmente sombreado, ya que como se aprecia en la ecuación de corriente de las celdas, ésta depende de la luminosidad, lo cual generará pérdidas de corriente generada, puesto que las regiones sombreadas limitarán la corriente.

La conexión en serie se efectúa de la siguiente manera:

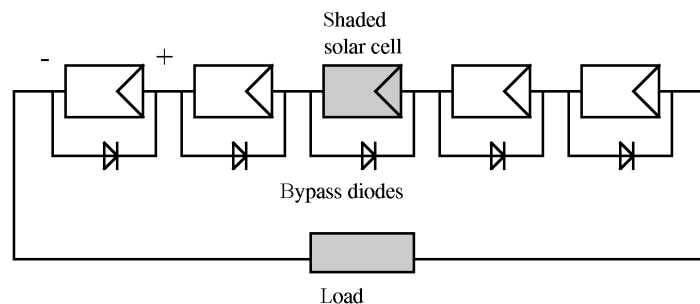


Figura 3. Conexión serie de celdas solares. [4]

En la conexión serie se implementan diodos en antiparalelo, para evitar que celdas que se encuentren sombreadas limiten la corriente que las otras producen. En la práctica es suficiente con poner un diodo cada 15 ó 20 celdas, ya que éstas presentan un reducido tamaño.

Su cualidad es clara, al poner celdas en serie se aumenta el voltaje producido y se reduce la cantidad de corriente a transportar, manteniendo así la potencia total del panel.

### Conexión Paralelo

Este esquema de conexión es usado cuando el sistema demanda gran cantidad de corriente, el voltaje del conjunto de celdas es igual debido a su conexión pero la corriente es la suma de las corrientes entregadas por cada celda dentro del panel. su principal desventaja es el bajo voltaje entregado y la gran corriente que hay que transportar, lo que genera mayores costos de implementación debido que es necesario cableado más grueso.

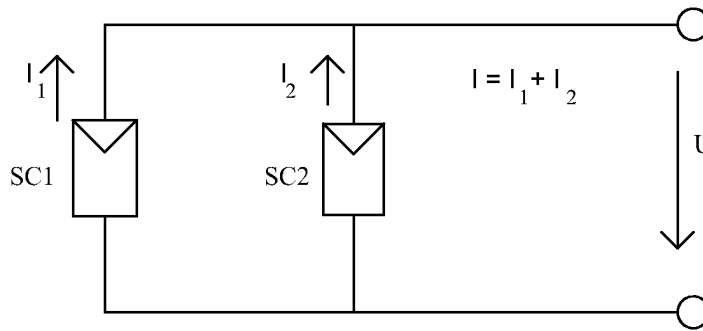


Figura 4. Conexión paralelo de celdas solares. [4]

### Esquema de un sistema solar

Dentro de las propuestas que se encuentran en el mercado, una de las posibilidades de implementar un sistema puramente solar es el que se muestra a continuación.

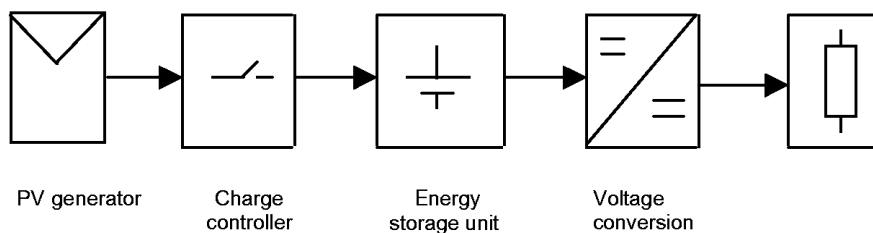


Figura 5. Diagrama en bloques de un sistema solar. [4]

El sistema consta de un generador fotovoltaico un controlador de carga (sistema a diseñar) y un banco de baterías; para el caso de este proyecto no se efectuará la conversión de voltaje hacia la carga ya que esta parte corresponde a la siguiente etapa a desarrollar, y la finalidad real sería alimentar motores eléctricos, los cuales necesitan de controles de velocidad, y algún otro tipo de reguladores que no son de interés en este preciso instante.

### Baterías de plomo ácido

Las baterías de plomo-acido selladas son capaces de almacenar una considerable cantidad de energía en un espacio relativamente pequeño, se evidencia que no son comparables con las baterías de Ion-Litio, que presentan una mayor capacidad por unidad de tamaño, pero con respecto a su costo, es claro que las de plomo-ácido tienen una ventaja.

Es importante resaltar que dependiendo del uso adecuado y en especial de la carga y descarga, según las especificaciones del fabricante, se tendrá una vida útil mayor, por lo cual se recurre a la referencia 3 que contiene aspectos y métodos a tener en cuenta a la hora de desarrollar un sistema de carga para éste tipo de baterías.

En el documento el fabricante expone algunos fundamentos sobre la carga de baterías que pueden ser usados como guía, estos conceptos se exponen a continuación.

Ciclo de uso: Es la cantidad de veces que se descarga y carga una batería, normalmente en la hoja de especificaciones viene especificado este valor, lo cual indica que a partir de éste ciclo la batería no se encuentra en el 100% de su capacidad. Este valor está comprendido para cargas y descargas normales sin incluir descargas profundas o sobrecargas.

Dependiendo del tipo de aplicación se proponen varios métodos de carga, como lo muestra la tabla 1.

<b>Fuente principal de alimentación.</b>	<b>Batería de reposo o respaldo</b>
Tensión constante	Tensión constante en dos etapas
Tensión Constante-Corriente Constante	Carga de compensación.

Tabla 1. Métodos de carga según aplicación.

Como se contempla que las baterías serán la fuente de alimentación del sistema luego de su carga, se escribirán en el presente documento los métodos correspondientes a ésta aplicación.

### **Métodos de carga**

#### *Método de carga tensión contante.*

Es utilizado para cargar la batería aplicando un voltaje constante sobre sus terminales, exactamente se aplican 2,45 V (En el caso de las baterías marca PANASONIC, para otra marca revisar las especificaciones del fabricante) por cada celda que posea la batería en una habitación o contenedor a una temperatura entre el rango de 20 °C a 25 °C. Se establece que la carga estará completa cuando la corriente de carga que circula por la batería se mantiene estable durante 3 horas. La batería puede presentar sobrecarga si no se implementa un sistema de control de tensión constante. Si se presentara una sobrecarga la batería libera gases al ambiente, principalmente oxígeno, empobreciendo la cantidad de electrolito y así afectando el desempeño de la misma. Por otra parte estos gases contaminan el ambiente ya que no es oxígeno puro, debido a que proviene de un habitáculo con otros compuestos tales como plomo que son altamente contaminantes.

#### *Método de carga Corriente Constante-Tensión Constante.*

Es utilizado para cargar las baterías controlando tanto la corriente que circula por la misma como la tensión correspondiente a la cantidad de celdas. Inicialmente se mantiene una corriente constante que circula a través de la batería hasta el momento en el que se llega al voltaje de flotación, en ese instante se cambia el modo de carga a tensión constante, que es el anteriormente expuesto, el cual termina de cargar la batería hasta su voltaje final. Se entiende que la batería posee una resistencia interna en serie, la cual limitará la corriente que circule por la misma en el periodo en que se presenta carga por tensión constante, lo que prolongará el tiempo de carga en este modo, y llevando las celdas internas cada una a una tensión de 2,45 V C/U, este instante de carga sirve para ello y por otra parte para mantener carga en la batería.

La gráfica que representa el método de carga se expone en la figura 6.

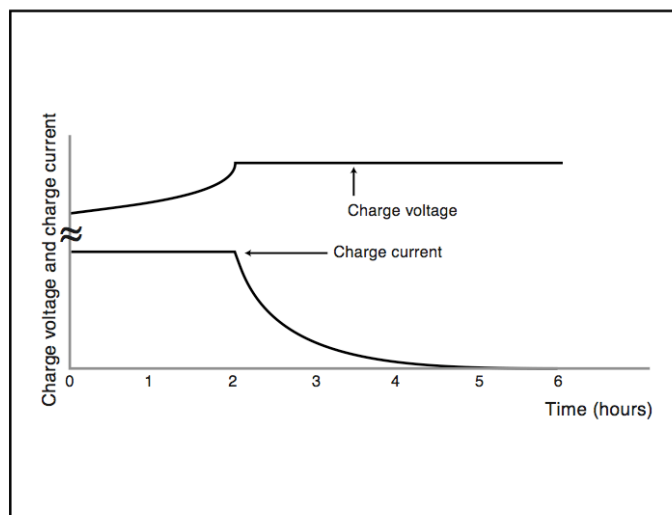


Figura 6. Carga batería CC-TC. [3]

Adicional a los métodos de carga el fabricante sugiere unas consideraciones para la carga de las baterías.

Consideraciones de carga.

*Compensación de la temperatura del voltaje de carga.*

Los voltajes de carga deben ser compensados con la temperatura ambiente, esto para asegurar la correcta carga de la batería así como para prevenir fugas térmicas en la misma. Asimismo ayuda a incrementar la vida útil de las celdas.

La figura 7 muestra cuales son los parámetros para estas correcciones.

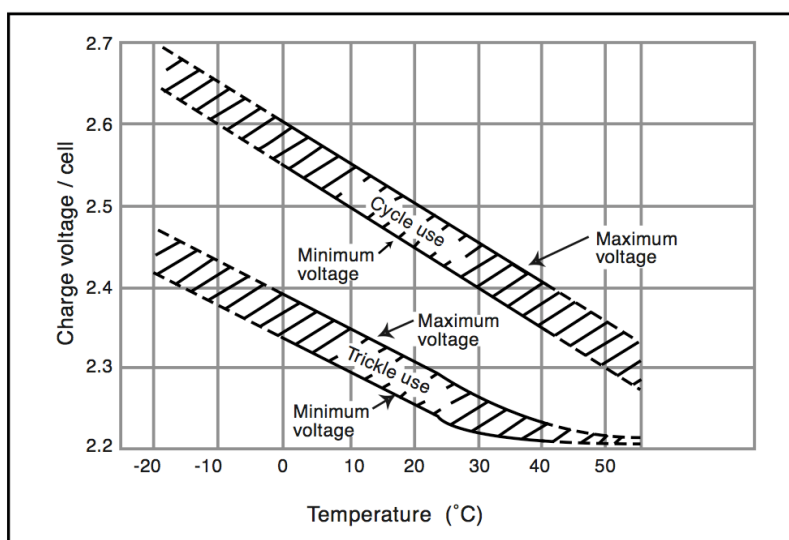


Figura 7. Parámetros de corrección de tensión por temperatura. [3]

Tiempo de carga.

Si se tiene una corriente de 0,25 CAh (CAh es la capacidad en amperios hora de la batería) o mayor el tiempo de carga se calcula de la siguiente manera.

$$T_{ch} = C_{dis} / I + (3to5)$$

Si se tiene una corriente de carga menor a la expuesta se calculará de la siguiente manera,

$$T_{ch} = C_{dis} / I + (6to10)$$



Donde en ambos casos  $T_{ch}$  es el tiempo de carga en horas,  $C_{dis}$  es la magnitud de la descarga en Ah,  $I$  es la corriente inicial de carga.

## Convertidores DC/DC

Se tienen de dos tipos, lineales y no lineales también llamadas por conmutación. Los lineales tienen una estructura simple: sin traspaso y almacenamiento de energía, pero disipan gran cantidad de la misma para operar, lo cual es una desventaja ya que el panel entrega poca energía. Por otra parte estas fuentes no son capaces de elevar la tensión a valores mayores que la entrada.

Los convertidores DC/DC por conmutación pueden entregar tensiones superiores e inferiores que la de entrada con una eficiencia mucho mayor. De este tipo de fuentes se encuentran varios esquemas para su diseño, pero a nivel general se pueden clasificar en aisladas y no aisladas.

Teniendo en cuenta la dispersión de valores de tensión que entrega el panel solar, es necesaria una fuente que pueda entregar valores superiores al proporcionado por el panel, con lo cual una fuente por conmutación se adopta como la mejor opción, por otra parte se presenta una reducción en el tamaño con respecto a la lineal.

Los convertidores DC/DC por conmutación constan de elementos que almacenan energía y elementos semiconductores que mediante un control PWM son capaces de generar transferencias de energía almacenada de una etapa a otra. Estas fuentes pueden operar en dos modos, discontinuo y continuo, cada uno con sus ventajas y desventajas. A continuación se explicará el principio de operación de estos convertidores, no se contemplarán los aislados en vista de que tienen pérdidas mayores y además que no se está regulando la línea ni tampoco una fuente de capacidad muy alta, por lo cual no es necesario tener el aislamiento.

Dentro de la clasificación de convertidores DC/DC sin aislamiento se encuentran las siguientes categorías.

- Buck
- Boost
- Buck-Boost
- Cúk
- Full Bridge

Los convertidores de tipo buck y tipo boost se consideran las tipologías elementales, por otra parte los demás convertidores enunciados son combinaciones de las dos tipologías básicas, y full bridge es una variación del convertidor Buck.

El convertidor tipo Buck es capaz de entregar únicamente una tensión inferior a la de alimentación, el convertidor tipo boost entrega una tensión superior a la de alimentación, el tipo Buck-Boost puede entregar tanto nivel de tensión superior como inferior al de alimentación, pero siempre con signo contrario, el convertidor tipo Cúk se comporta de la misma manera que el Buck-Boost con la diferencia de la conexión de sus componentes, y en la cual se agregan adicionales con lo que se obtienen 2 filtros dentro del sistema y no solo uno como sucede en la Buck-Boost, la tipología de Full Bridge, es comúnmente usada para alimentar motores, convertidores DC/AC, por lo cual no se discutirá en el presente documento.

### Fuente Buck

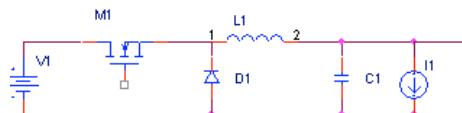


Figura 8. Estructura de fuente Buck.

### Fuente Boost

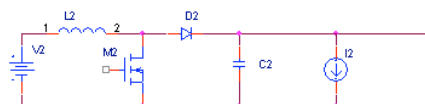


Figura 9. Estructura fuente Boost.

## Fuente Buck-Boost

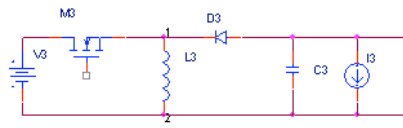


Figura 10. Estructura fuente Buck-Boost.

Para los tres tipos de fuente, el mosfet actúa como un interruptor, de la misma manera que el diodo aunque éste trabaja de manera automática. El mosfet es controlado por un PWM (modulador de ancho de pulso) el cual se encarga de variar el ciclo útil de la señal de encendido.

Esta metodología de control se explicará a continuación para una fuente tipo Buck-Boost.

El ciclo útil de una señal cuadrada está definido como el porcentaje del periodo de la señal que se encuentra en nivel alto. A continuación se muestran 3 señales con diferente ciclo útil.

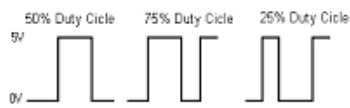


Figura 11. Señales con diferente ciclo útil.

El ciclo útil  $D$  se define también así.

$$D = \frac{t_p}{T}$$

donde  $t_p$  es el tiempo en alto y  $T$  es el periodo de la señal.

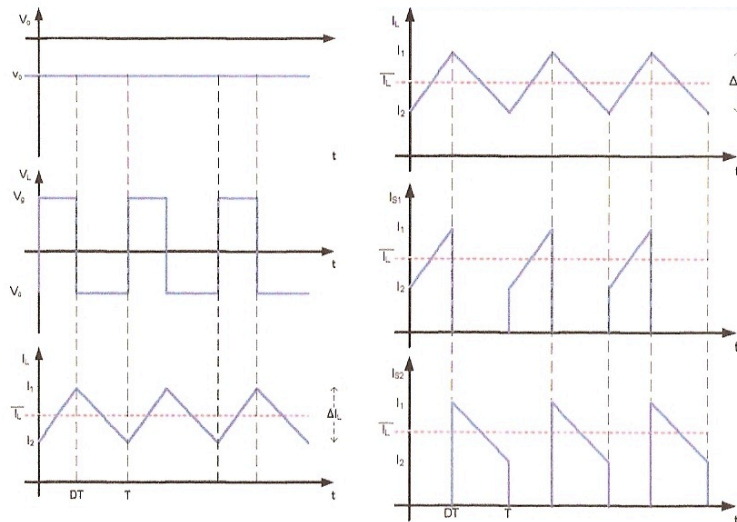


Figura 12. Diagrama de tiempos Fuente Buck-Boost.  
Tomada de apuntes de clase Ing Abdel Karim Hay

Como ya se había comentado anteriormente la fuente Buck-Boost entrega una tensión de signo inverso a la fuente de alimentación principal, se supone una fuente principal positiva.

De acuerdo con la figura 12, debido a la conmutación del MOSFET, se genera un cambio de polaridad sobre las terminales de la inductancia  $L$ , entre  $V_g$  (Fuente de alimentación del regulador) y  $V_o$  (Tensión de salida del regulador) lo que genera una carga y descarga de tipo rampa de corriente en la bobina de acuerdo con la

ecuación de la misma  $I_L = \frac{1}{L} \int_{t_1}^{t_2} V_L dt$ , cuando la señal de control se encuentra en nivel alto la inductancia

eleva su corriente circulante, de acuerdo a la tensión aplicada en sus terminales, cuando el mosfet se apaga, se enciende el diodo y la corriente circula a través del condensador cargándolo.

Como la fuente de alimentación del regulador es constante, la única manera de que la inductancia almacene más energía es aumentando el tiempo en la que ésta se carga, lo cual es manipulado por el ciclo útil de la señal de control del Mosfet.

Según las dos gráficas inferiores de la columna derecha de la figura 12 es claro que el instante en el cual el mosfet está encendido, la corriente circula por el, y en el instante en el que se encuentra apagado la corriente circula por el diodo.

El condensador por otra parte se carga parabólicamente, ya que su función es  $v_c = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i_c dt$  y como ya se había planteado, la corriente que ingresa al mismo es en forma de rampa.

Desarrollando las integrales con los tiempos correspondientes al ciclo útil de la señal, se obtiene que la fuente entregará como tensión de salida:

$$v_0 = -v_g \frac{D}{1-D}$$

### Descripción general y diagrama en bloques

Se plantea un sistema de almacenamiento energético en baterías cuya energía es obtenida única y exclusivamente de forma solar, lo que representa la necesidad de un manejo adecuado de la energía en bruto entregada por el panel solar. Teniendo en cuenta como principal aspecto la alta dispersión en valores de tensión que éste entrega. Se propone un regulador de tensión por conmutación o no lineal, el cual presenta una eficiencia considerablemente buena con respecto a los reguladores lineales, con la ventaja adicional de que permite tanto elevar, mantener, disminuir la tensión de salida con respecto a la que éste se le entrega, por otra parte se tiene un bloque de almacenamiento de energía compuesto por baterías de plomo ácido, las cuales deberán ser cargadas de manera adecuada tanto para aprovechar de una mejor manera la energía proveída como para prolongar su vida útil.

Para el procedimiento de carga de las baterías se propone el método de corriente constante - tensión constante, el cual debe conmutar automáticamente y el cual se comporta en el tiempo de acuerdo a la siguiente gráfica, que se repite intencionalmente para una mayor claridad en el documento.

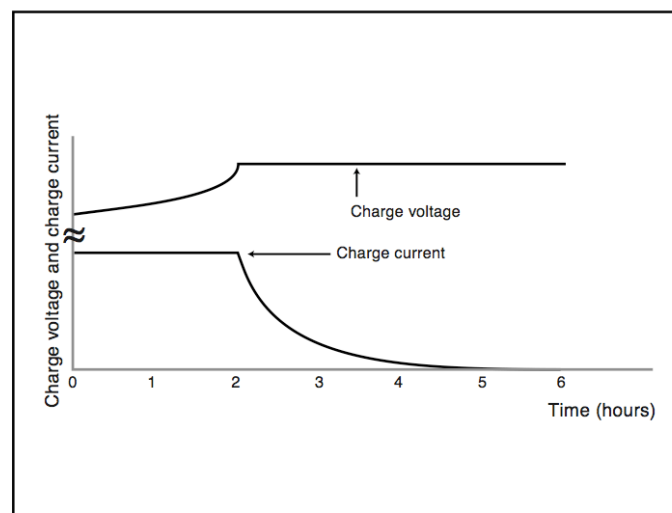


Figura 13. Carga batería CC-TC. [3]

Específicamente se mantendrá una corriente constante siempre y cuando los paneles sean capaces de entregar la potencia requerida, entre las terminales de las baterías hasta que se alcance el nivel de carga máximo o voltaje de flotación del banco de baterías, cuando se haya llegado a este nivel se continuará la carga con voltaje constante sobre el banco, lo que irá poco a poco finalizando la carga de las celdas hasta el nivel óptimo.

Para lograr de forma adecuada lo anteriormente mencionado se implementa un regulador tipo Boost con un filtro adicional de salida, el cual en la primera fase de carga controlará la corriente de salida teniendo en cuenta que el nivel de tensión no sobrepase el máximo permitido, luego al conmutar a carga por tensión constante monitoreará el nivel de tensión a la salida teniendo en cuenta que el flujo de corriente no exceda el máximo permitido, para lo cual el control se encargará de determinar si se debe regular corriente o tensión durante la carga, mediante el monitoreo simultáneo de las dos variables mencionadas.

### Estándares vigentes en vehículos eléctricos

Debido a la gran demanda de potencia proveniente de las baterías que un vehículo eléctrico demanda para su desplazamiento, es apropiado subir el nivel de tensión de operación para así disminuir la magnitud de flujo de corriente, por otra parte los niveles de tensión no podrán ser tan grandes como se quisiera, ya que representa un riesgo para los usuarios, pues si éstos tocaran de alguna forma las terminales de las baterías podrían experimentar una descarga a través de sí mismo, que podría ser letal u ocasionar lesiones al individuo. Para ello se estableció un umbral de seguridad, el cual permite obtener una tensión de 42 V la cual es superior a los 12 V tradicionales de los vehículos automotores y no representa peligro de descarga letal o de lesiones sobre ningún individuo.

Debido a lo anterior y teniendo en cuenta que el sistema no tiene niveles de tensión letales, no es necesario efectuar aislamientos entre los paneles solares y las baterías, lo que repercute en menores costos de fabricación y mayor eficiencia, ya que se reducen las pérdidas por conducción, que es un aspecto bastante importante con éste tipo de energía.

Tensión de contacto (V)	Trayectoria mano-mano, piel seca, c. continua superficie de contacto 50-100 cm <sup>2</sup> Impedancia total ( $\Omega$ ) del cuerpo humano		
	5% de las personas	50% de las personas	95% de las personas
25	2.200	3.875	8.800
50	1.750	2.990	5.300
75	1.510	2.470	4.000
100	1.340	2.070	3.400
125	1.230	1.750	3.000
220	1.000	1.350	2.125
700	750	1.100	1.550
1.000	700	1.050	1.500
valor asintótico	650	750	850

Tabla 2. Tabla valores de resistencia del cuerpo humano. [6]

De acuerdo con la tabla número 2 se establece que el peor caso de resistencia eléctrica a 50 V es de 1750  $\Omega$  con lo que al aplicar un valor de tensión de 42 V circularán 24 mA, lo que producirá alrededor de 1 W de disipación por parte del cuerpo humano, lo que representa el umbral máximo de capacidad de disipar energía eléctrica a través del cuerpo humano sin generar daños.

Lo anterior está basado en documentos que se fundamentan en el estándar “BS EN 60254-1:2005, Lead-acid traction batteries. General requirements and methods of test” el cual se encuentra disponible para la compra en <http://shop.bsigroup.com/en/ProductDetail/?pid=00000000030169679>.

## Especificaciones

- Manipular tensiones de entrada entre 10 V y 21,5 V que son entregadas por el panel Solar.
- Efectuar la carga de 3 baterías de 12 V nominales y 45 Ah en serie cumpliendo con los parámetros que se exponen en la hoja de especificaciones.
- Monitorear la carga de las baterías para que no supere los valores máximos permitidos tanto de corriente como de tensión.
- Entregar por medio de un sistema visual el estado de las baterías informando si se encuentran en carga o ya se encuentran cargadas.

## Desarrollos

Inicialmente se determinó el método de carga a ser usado en el sistema, teniendo en cuenta la aplicación en cuestión en la cual a las baterías se les dará un uso cíclico y no estacionario; posteriormente se plantea el esquema del convertidor a usar, el cual debe entregar una salida regulada mayor a la entrada con un ripple de corriente y voltaje bajo para evitar el daño de los acumuladores, por otra parte, la entrada no debe tener cambios abruptos de corriente debido a que los paneles no son capaces de soportarlos.

Teniendo en cuenta las anteriores características y tras analizar varios tipos de convertidores conmutados, se determina que el mas apropiado es un convertidor de tipo “Boost” o “Step up”, con un filtro de corriente a la salida (Remítase a la figura 14 en la página 14) que corresponde a L filtro.

## Etapa de potencia

El cálculo de los componentes necesarios para que el convertidor cumpla las especificaciones se presenta a continuación.

Inicialmente se determina la corriente que manejará el sistema a la entrada partiendo del conocimiento de la corriente de salida, este valor se determina bajo el peor caso el cual se presenta cuando los paneles entregan 10 V de tensión y las baterías solicitan la máxima corriente de carga.

La carga de las baterías se efectuará a la cuarta parte de la capacidad de corriente, con lo cual se tiene que.

$$I_o = \frac{C}{4} = \frac{45 \text{ Ah}}{4} = 11.25 \text{ A}$$

Ya que el convertidor eleva tensión en un sentido, en el otro solicitará más corriente para mantener el equilibrio de potencia de entrada y potencia de salida, de acuerdo con la relación de conversión, por lo cual la corriente a la entrada estará dada por:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{D'}$$

$$I_{in} = \frac{I_{out}}{D'} = \frac{11.25 \text{ A}}{0.24} = 46.87 \text{ A}$$

Para que la inductancia de entrada no sea de gran tamaño y tenga un desempeño adecuado, se establece su ripple de 15% del anterior valor con lo que se obtiene:

$$\Delta I_L = 46.87 \text{ A} \cdot 0.15 = 7.03 \text{ A} \approx 7 \text{ A}$$

Ahora se calcula el valor de la inductancia teniendo en cuenta la función que describe la pendiente de subida de la corriente, teniendo en cuenta que el anterior ripple es pico y no pico a pico.

$$\Delta I_L = \frac{V_s}{2L} DT_s$$

$$7 \text{ A} = \frac{21.5 \text{ V}}{2L} \cdot 0.76 \cdot 20 \mu s$$

$$L = 23.34 \mu H$$

Ahora el condensador de salida debe filtrar todo el ripple de tensión producto de la conmutación, para ello se fija dicho valor en el 1% de la máxima salida.

$$\Delta V_C = 42 \text{ V} \cdot 0.01 = 0.42 \text{ V}$$

$$\Delta V_C = \frac{V_o}{2RC}$$

$$R \approx \frac{V_o}{I_o} = 3.75 \Omega$$

$$0.42 = \frac{21.5}{2 \cdot 3.75 \cdot C} \cdot 0.76 \cdot 20 \mu$$

$$C = 103.75 \mu F \approx 100 \mu F$$

Finalmente se desea filtrar todo tipo de ruido dentro de la señal de corriente a la salida ya que como se expondrá mas adelante, las baterías son una gran capacitor y si éstas se conectan en paralelo al condensador de salida absorberán toda la señal AC de la conmutación , lo que les generará daños a corto plazo, para lo cual se implementará una inductancia en serie con las baterías la cual bloqueará gran cantidad del contenido de AC.

Teniendo en cuenta que la inductancia bloqueará toda la señal AC para que ésta no sea transmitida a las baterías, se debe tener en cuenta que la impedancia del condensador de salida debe ser al menos 10 veces menor que la impedancia que a la misma frecuencia tiene la inductancia de salida.

Se sabe que las impedancias de un capacitor y una inductancia están dadas por:

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

$$Z_L = j\omega L$$

Teniendo la frecuencia de conmutación que es 50 kHz y convirtiendo a su respectivo valor en radianes se tiene:

$$|Z_C| = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \text{ kHz} \cdot 100 \mu\text{F}} = 31.83 \text{ m}\Omega$$

$$|Z_L| = 10 \cdot 31.83 \text{ m}\Omega = 2\pi \cdot 50 \text{ kHz} \cdot L$$

Con lo cual se obtiene una inductancia de:

$$L = 1.01 \mu\text{H}$$

A continuación se expone el circuito completo a analizar en los siguientes numerales.

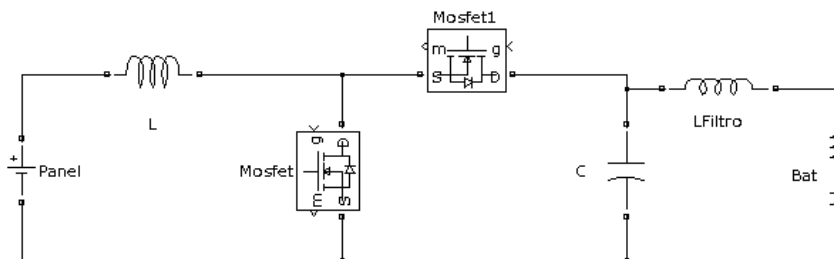


Figura 14. Esquema del convertidor.

Ahora es preciso determinar los valores comerciales a usar así como el cálculo de la construcción de las inductancias.

El condensador de filtrado de salida debe ser capaz de manejar toda la corriente AC producto de la conmutación, a continuación se expone el cálculo de la corriente AC sobre dicho dispositivo.

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i(t)^2 dt}$$

$$I_{RMS} = 19.5 \text{ A}$$

Con estos parámetros se tiene que se debe organizar un arreglo de condensadores que soporte todo el la señal AC que se debe manejar. Para ellos es necesario asegurar que la corriente máxima permitida por cada capacitor sea superior al número de condensadores conectados dividido la corriente total del banco.

### Parámetros de construcción de inductancias

El procedimiento empleado para el diseño se basa el Item 7 de la bibliografía, en vista de que su construcción se hace con lámina de cobre a cambio de alambre de cobre.

Utilizando ecuaciones de magnetismo se desarrolla el siguiente procedimiento.

$$\frac{Nd\Phi}{dt} = \frac{Ldi}{dt}$$

$$L = \frac{\mu_0 A_e N^2}{l_g}$$

$$\Delta B = \frac{\mu_0 N \Delta I}{l_g}$$

Ecuaciones con las cuales mediante la inserción de los parámetros antes calculados de la inductancia, se obtiene una relación entre el gap y el número de vueltas.

$$0.250 = \frac{4\pi 10^{-7} N 53.87}{l_g}$$

Con lo que se obtiene la siguiente tabla.

lg(mm)	N
1,89	7
2,16	8
2,43	9
2,7	10
2,97	11
3,24	12
3,5	13
3,7	14

Tabla 3. Relación GAP Vs Número de vueltas.

Ahora se escogen la cantidad de vueltas de acuerdo a parámetros como la frecuencia efectiva que maneja la inductancia, ya que como se encuentra en modo de conducción continua la corriente DC es mucho mayor que la corriente AC, para lo cual se desarrollan los siguientes cálculos.

$$I_e = \sqrt{I_0^2 + \frac{I_{AC}^2}{3}} = 47.043 \text{ A}$$

$$f_e = \frac{1.3f}{\sqrt{1 + 3\left(\frac{I_0}{I_{AC}}\right)^2}} = 9.6 \text{ kHz}$$

$$h_{id} = \sqrt{\frac{9.74}{Nf_e}}$$



Con 7 vueltas se necesitaría un grosor de lámina de  $380 \mu m$ , lo que aproximando a valores comerciales de lámina de cobre se necesitaría una de  $400 \mu m$ , y debido a la densidad de corriente permitida por milímetro cuadrado, la cual corresponde a 3 A, se necesitará un ancho de lámina de 30 mm el cual se ajusta al núcleo disponible.

Teniendo en cuenta lo anterior, los parámetros de construcción de la inductancia se exponen a continuación.

$$\begin{aligned}N &= 7 \\l_g &= 1.89 \text{ mm} \\h_{id} &= 400 \mu m \\W &= 30 \text{ mm}\end{aligned}$$

Los parámetros de la inductancia de salida son:

$$\begin{aligned}L &= 1 \mu H \\I_{Max} &= 12 A \\B_{max} &= 300 \text{ mT} \\A_e &= 1.5 \text{ cm}^2\end{aligned}$$

Ya que la inductancia posee un valor considerablemente bajo con una corriente apreciable, se implementa mediante el uso de un toroide de ferrita con el área característica expuesta anteriormente.

Debido a que el toroide no posee la versatilidad de poder variar un gap la cantidad de vueltas es fija, con lo que bastará con atravesar el alambre de salida por el mismo, lo cual es equivalente a tener una inductancia de 1 espira, con lo que se obtiene un bloqueo suficiente a la corriente alterna.

### **Modelo de las baterías**

En vista de que la finalidad del sistema no es alimentar una carga de tipo resistiva, es preciso elaborar un modelo que permita predecir como será el comportamiento del banco de baterías pero que también sea posible introducirlo en el modelo del convertidor para ser manipulado matemáticamente y encontrar un control adecuado.

Aunque el fabricante en su hoja de especificaciones expone una gráfica de carga la cual se efectúa al 10% de la capacidad total y no de acuerdo a lo ya planteado anteriormente que es el 25% de su capacidad; teniendo en cuenta lo anterior es preciso suponer que las gráficas proporcionadas por el fabricante corresponden a pruebas de laboratorio en las cuales se obtuvieron los mejores resultados.

Según la referencia [3], el método de carga con corriente constante - tensión constante con un 25% de inyección de corriente respecto a su capacidad en amperios hora es apropiada y no genera daño a los acumuladores mas que el desgaste usual.

De acuerdo a una de las tablas proporcionadas por el fabricante mencionada en el marco teórico, se expone la capacidad de la batería en función de su tiempo de descarga, análogamente es posible tomar estos datos para determinar una carga apropiada.

Como el suministro de potencia por parte de los paneles no es uniforme en el transcurso del tiempo, se espera que se efectúe una carga en un lapso de 5 horas.

Las baterías se modelarán como un capacitor en serie con una resistencia, la cual es variable de acuerdo al estado de carga, con las condiciones de temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  y proporcionando una carga durante 5 horas con una corriente de 7.2 A, se pasa de tener una batería con una tensión de 10.5 V a 13.5 V, valores con los cuales se puede obtener la capacitancia de la batería de la siguiente forma.

$$\Delta I = C \frac{dV}{dt}$$

$$V_{in} = 10.5V$$

$$V_{fin} = 13.5V$$

$$7.2 = C \frac{3}{18000}$$

$$C = 43200F$$

Ahora bien, esta capacitancia equivale a la de una batería de 12 V nominales y el sistema posee tres baterías en serie a cargar, por lo cual se suma una serie de capacitores iguales lo que será.

$$C_{Tot} = \frac{C}{3} = 14400F$$

Por otra parte, la batería tiene una resistencia intrínseca que varía de acuerdo a su tensión actual. Según el fabricante la resistencia más baja se presenta cuando la batería se encuentra totalmente cargada y corresponde a  $8.5 \text{ m}\Omega$  por cada acumulador, por lo cual para el total del banco se obtendrá  $25.5 \text{ m}\Omega$ , por otra parte cuando las baterías se encuentran descargadas presentarán una resistencia bastante mayor incluso valores de ohmios, pero desafortunadamente no se tiene un valor concreto, por lo cual se contemplará hasta los  $2 \Omega$  para efectuar los cálculos del controlador y verificar que no se inestabilice el sistema.

## Modelo de señal Grande

Se procede a obtener el modelo de señal grande que será usado dentro de las simulaciones para reducir el tiempo de ejecución.

Se parte inicialmente de las ecuaciones de malla y nodo de la inductancia de entrada y el condensador de filtrado de salida respectivamente, de la siguiente manera.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_g D + (V_g - V_o) D'$$

$$C \frac{dV_c}{dt} = -I_{out} D + (I_{out} - I_{in}) D'$$

Ahora manipulando las anteriores ecuaciones se obtiene:

$$V_g = L \frac{di_L}{dt} + V_{out} D'$$

$$I_{in} D' = C \frac{dV_c}{dt} + I_{out}$$

Con lo que se obtiene el siguiente esquema.

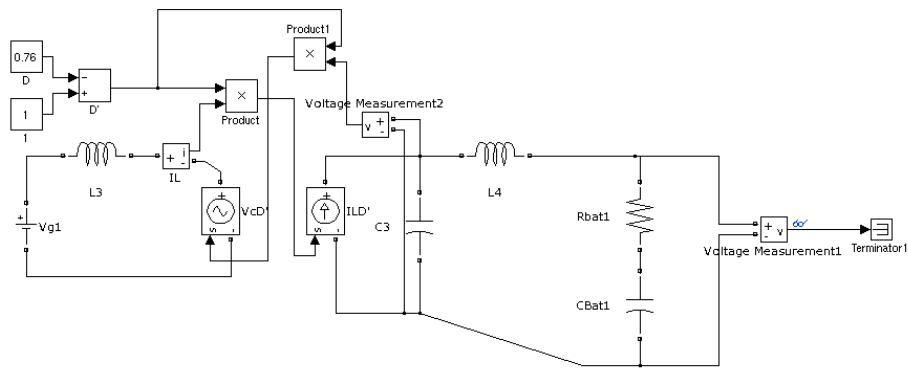


Figura 15. Modelo Señal Grande.

Ahora es necesario validar el modelo respecto al comportamiento real del convertidor, para lo cual se insertará una señal cambiante sobre el ciclo útil y se verificará que se comporte de una manera aproximada a la real, para ello inicialmente se estableció la carga del capacitor de salida en 31.5 V, lo que es precisamente el banco de baterías descargado; se está introduciendo un ciclo útil fijo para determinar si el modelo en primera instancia es correcto aproximado al circuito real de conmutación.

En la figura 16 el trazo rojo representa el modelo obtenido y el trazo azul representa el circuito de conmutación, evidenciando la correspondencia entre el modelo obtenido y la planta real.

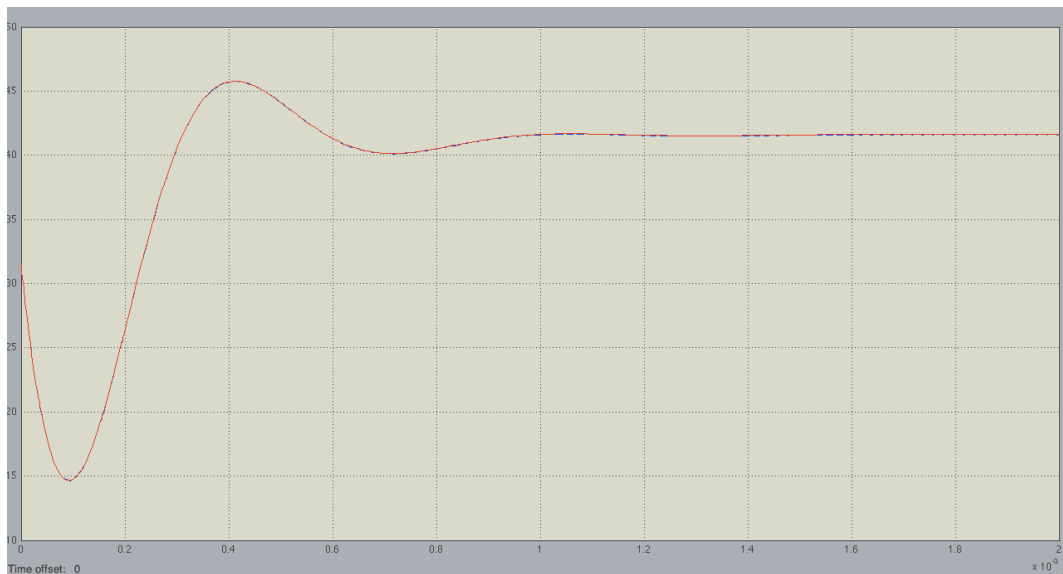


Figura 16. Comparación circuito con modelo señal grande.

Ahora vale la pena introducir las pérdidas en el sistema, las cuales se encuentran básicamente en la resistencia serie de la inductancia de entrada y la resistencia de encendido de los interruptores, para ello basta con analizar la malla y el nodo del convertidor de la misma manera que se hizo anteriormente, pero adicionar éstas resistencias, quedando las ecuaciones que describen al modelo de la siguiente manera.

$$v_g = L \frac{di_L}{dt} + i_L (R_L + R_{on}) + v_{out} h'$$

$$i_L h' = C \frac{dv_{out}}{dt} + i_{out}$$

Ahora de acuerdo a las nuevas modificaciones se obtiene el nuevo modelo.

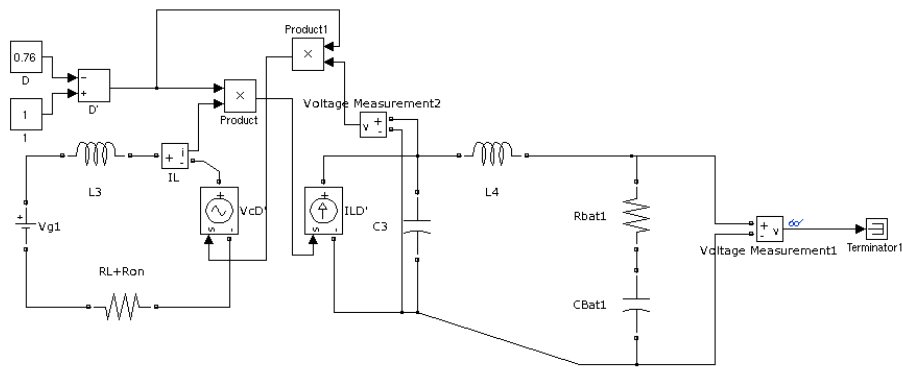


Figura 17. Modelo Señal Grande con pérdidas.

En la figura 18 se expone la comparación de gráficas entre el modelo con pérdidas y el circuito de conmutación siendo el modelo el trazo rojo y el circuito de conmutación el trazo azul.

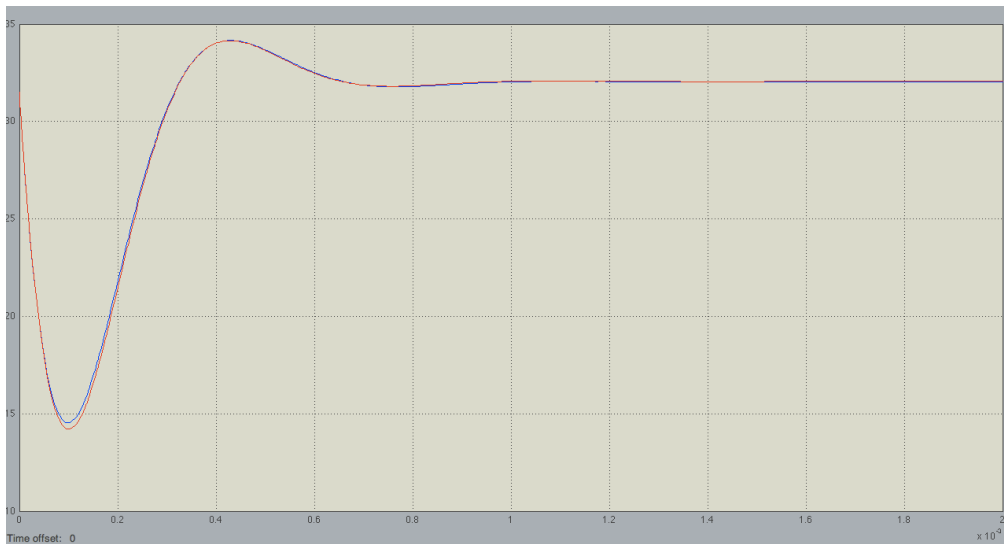


Figura 18. Comparación Circuito conmutado con modelo señal grande.

Como es posible apreciar se tiene una ligera diferencia en el comportamiento del sistema, siendo el punto con mayor diferencia el pico inferior con una diferencia del 2% sobre el valor real que es producido por el circuito de conmutación, adicionalmente se aprecia una reducción en la tensión de salida producto de las pérdidas, con lo que es necesario aumentar el ciclo de trabajo de conmutación del convertidor para lograr la tensión deseada a la salida, aunque la reducción de tensión no se presentará en la proporción que se presenta ya que el convertidor tendrá una limitación en corriente, lo que reduce la caída de tensión sobre los resistores.

### Modelos de señal pequeña

Para poder determinar el sistema de control adecuado es preciso elaborar un modelo de señal pequeña, que permita observar como se comporta el sistema matemáticamente ante diferentes tipos de disturbio. Para ésta tarea se hace uso de MatLab®, en vista de la versatilidad que ofrece al cambiar algún valor dentro del sistema, así como la facilidad para obtener la familia de bodes que describen el comportamiento en frecuencia del sistema en todo el rango de operación.

Las funciones de transferencia para un convertidor de tipo Boost están dadas de la siguiente forma:

Función de transferencia del control a la salida.

$$G_{vd}(s) = G_{d0} \frac{1 - \frac{s}{\omega_z}}{1 + \frac{s}{Q\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}}$$

Función de transferencia de la tensión de entrada a la salida.

$$G_{vg}(s) = G_{g0} \frac{1}{1 + \frac{s}{Q\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}}$$

Donde.

$$G_{g0} = \frac{1}{D'}$$

$$G_{d0} = \frac{V}{D'}$$

$$\omega_0 = \frac{D'}{\sqrt{LC}}$$

$$Q = D' R \sqrt{\frac{C}{L}}$$

$$\omega_z = \frac{D'^2 R}{L}$$

$$R = sL_{Bat} + \frac{1}{sC_{Bat}} + R_{Bat}$$

El anterior modelo de señal pequeña presenta una aproximación del sistema para evaluar estabilidad, aunque no es preciso ya que no introduce las pérdidas de conducción de la inductancia de entrada y de encendido de los transistores, para lo cual se planteará posteriormente un modelo que si contempla dichos valores.

En vista de que el sistema maneja una corriente apreciable de entrada, es necesario como ya se había mencionado anteriormente, refinar el modelo de señal pequeña adicionando las pérdidas que la inductancia y los transistores introducen al sistema, esto se hace perturbando el modelo de señal grande con pérdidas expuesto antes. El anterior procedimiento se describe a muestra a continuación.

Cabe recalcar que la inductancia tiene un resistencia  $R_L$  y los elementos activos una resistencia  $R_{on}$ .

$$\langle V_g \rangle = L \frac{d\langle I_L \rangle}{dt} + \langle I_L \rangle (R_L + R_{on}) - \langle V_{out} \rangle D'$$

$$\langle I_L \rangle D' = C \frac{d\langle V_c \rangle}{dt} + \langle I_{out} \rangle$$

Para obtener las funciones de transferencia del sistema es necesario linealizar el mismo lo cual se hace perturbando el sistema de la siguiente manera.

$$\begin{aligned}\langle V_g \rangle &= V_g + \hat{v}_g \\ \langle I_L \rangle &= I_L + \hat{i}_L \\ \langle V_o \rangle &= V_o + \hat{v}_o \\ D' &= D' - \hat{d}\end{aligned}$$

Con lo que se obtiene una serie de ecuaciones linealizadas que describen al sistema alrededor de su punto de operación.

$$\begin{aligned}\hat{v}_g &= L \frac{d\hat{i}_L}{dt} + \hat{i}_L(R_L + R_{on}) + V_o \hat{d} - \hat{v}_o D' \\ \hat{i}_L D' &= C \frac{d\hat{v}_o}{dt} + I_L \hat{d} + \frac{\hat{v}_o}{Z}\end{aligned}$$

Al desarrollar estas ecuaciones para encontrar la relación de tensión de salida y la entrada del PWM se obtiene.

$$G_{vd} = \frac{V_o \cdot (Ls - (D')^2 \cdot Z + R_L + R_{on})}{D' \cdot (C \cdot L \cdot Z \cdot s^2 + (C \cdot (R_L + R_{on}) \cdot Z + L) \cdot s + (D')^2 \cdot Z + R_L + R_{on})}$$

De la misma manera se desarrolla la función de transferencia desde el control hacia la corriente de salida obteniendo el siguiente resultado.

$$G_{id} = \frac{V_o \cdot (Ls - (D')^2 \cdot Z + R_L + R_{on})}{Z \cdot D' \cdot (C \cdot L \cdot Z \cdot s^2 + (C \cdot (R_L + R_{on}) \cdot Z + L) \cdot s + (D')^2 \cdot Z + R_L + R_{on})}$$

Mediante el cálculo de la anterior función de transferencia teniendo en cuenta toda la combinación de variables del sistema tales como el cambio en la resistencia serie de la batería el cambio en el ciclo útil y la variación de la tensión de salida, se obtiene mediante el código de MatLab del anexo 2 la familia de Bodes del sistema, para determinar el peor caso en cuanto a estabilidad y poder diseñar un controlador apropiado.

A continuación se presenta la familia de Bodes del sistema con pérdidas.

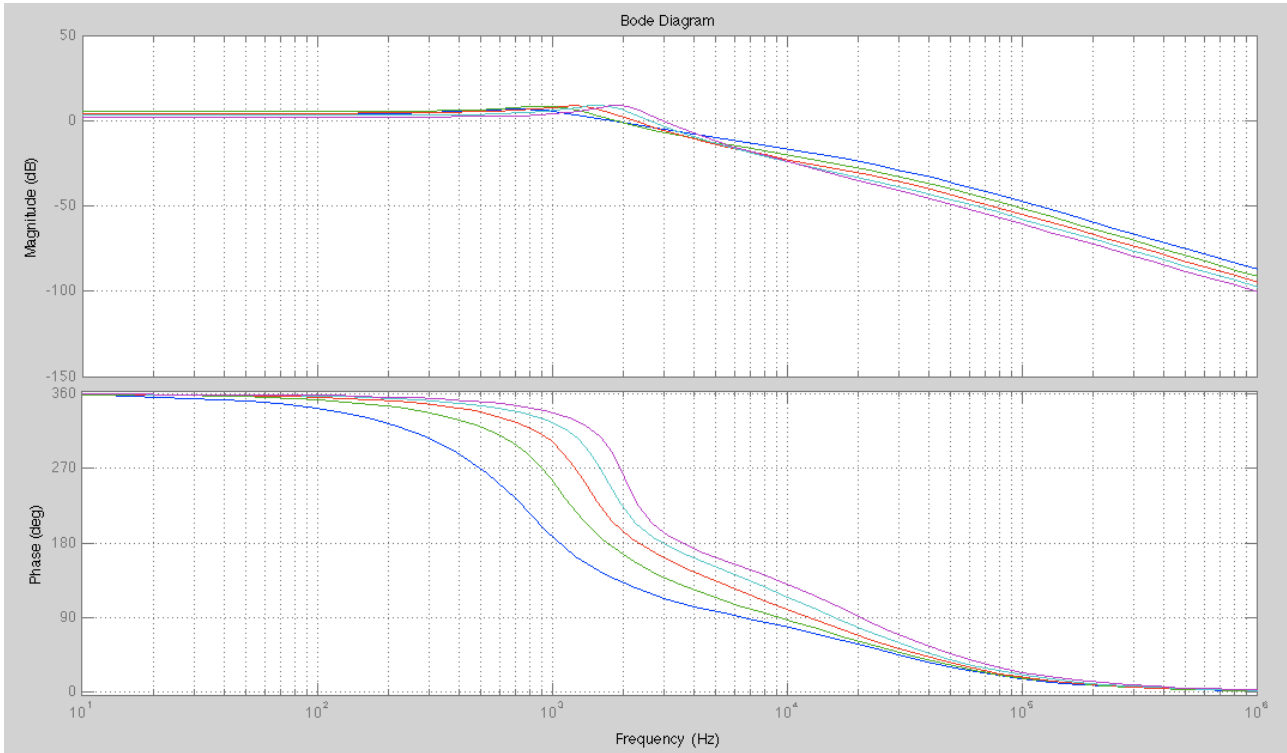


Figura 19. Familia de Bodes de tensión del sistema con pérdidas.

Teniendo en cuenta las figuras e identificando la combinación que genera cada curva, se determina que el peor caso en cuanto a estabilidad se presenta cuando.

$$D' = 0.2$$

$$V = 42 V$$

Debido a que en este caso se presenta la condición mas próxima a inestabilidad del sistema, es el caso para el cual se debe diseñar el compensador de tensión.

El sistema también posee una realimentación en corriente, la cual debe ser compensada, de acuerdo a lo anterior, se determina la familia de bodes del sistema realimentado en corriente que se exponen a continuación.

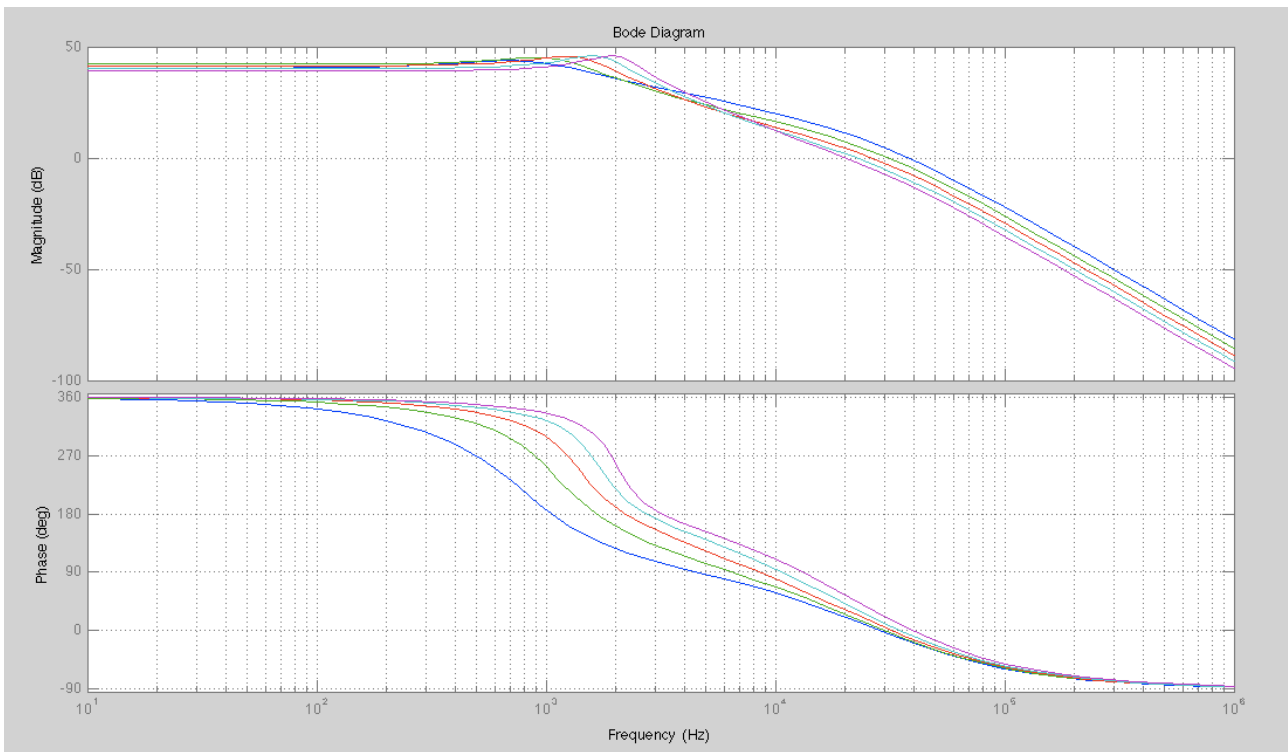


Figura 20. Familia de Bodes de Corriente del sistema con pérdidas.

Ahora de la misma forma que se hizo con el lazo de control de tensión, se debe evaluar el peor caso para realizar una compensación exitosa, con lo que se obtiene que se presenta cuando.

$$D' = 0.2$$

$$V = 30 \text{ V}$$

### Etapa de control

Ahora ya teniendo las funciones de transferencia que describen el sistema a partir de variaciones en sus diferentes entradas se procede a realizar el análisis del tipo de controlador a implementar, como ya se había mencionado el sistema debe ser capaz de limitar la corriente entregada a los acumuladores, por lo cual se desarrollarán dos controles concatenados de la siguiente forma.

El control principal se encargará de mantener la tensión de salida constante, el control auxiliar se encargará de variar la referencia de tensión del control principal en el caso que se presente un sobre paso del umbral de corriente en la salida.

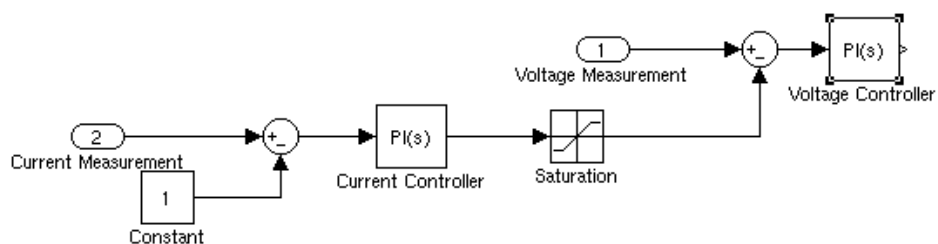


Figura 21. Esquema de control.



En la malla de tensión se observa que el sistema es estable, pero fácilmente puede llegar a la inestabilidad debido a su bajo margen de fase, se determina que se debe implementar un control de tipo PI, el cual además de brindar error en estado estable cero, proporciona al sistema una margen de fase mayor así como de ganancia, a continuación se presentan las gráficas de lugar de las raíces y diagrama de Bode que permitieron realizar el análisis.

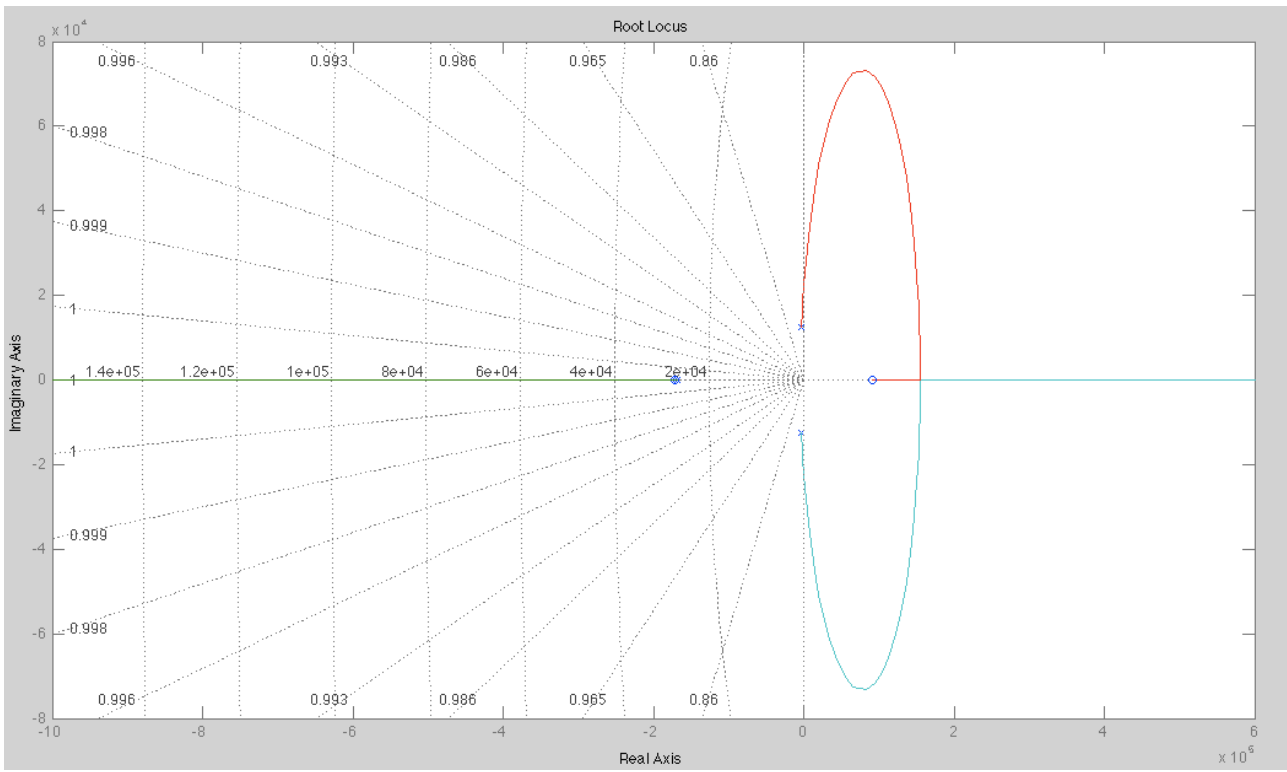


Figura 22. Lugar de las raíces del convertidor en la malla de tensión.

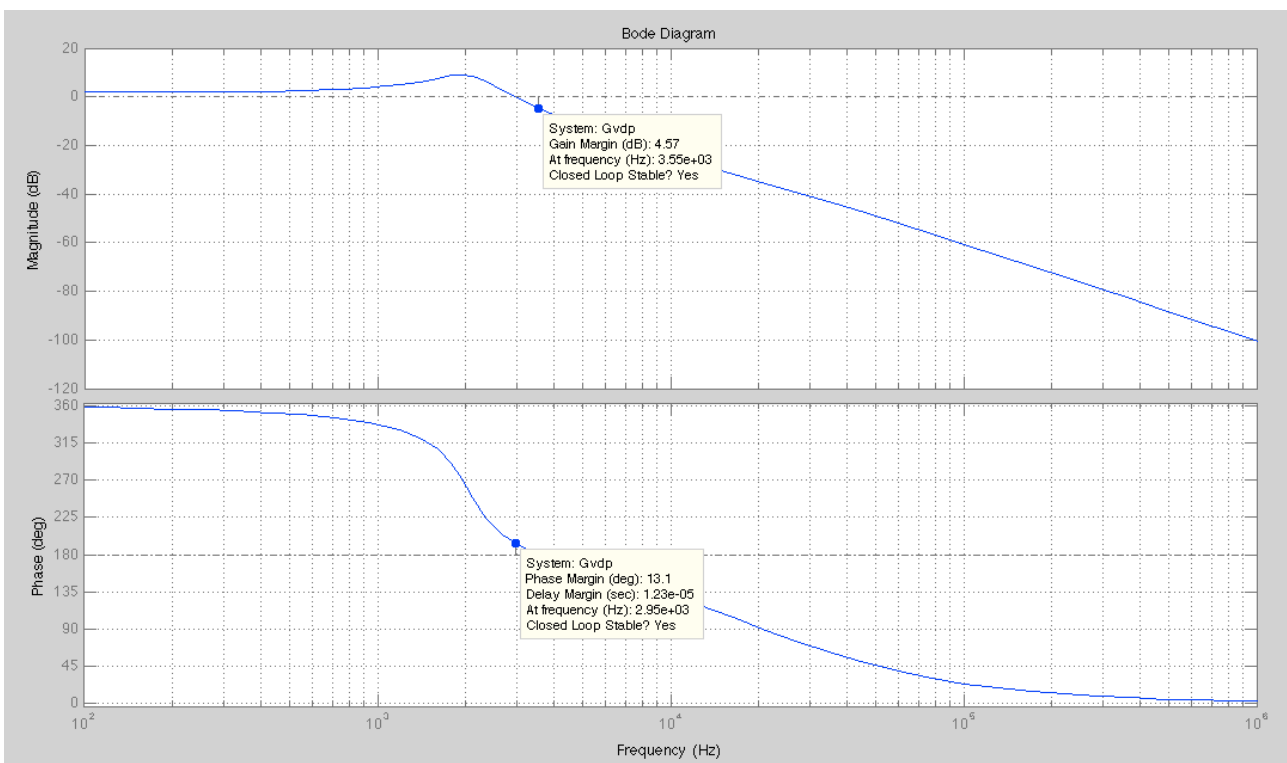


Figura 23. Diagrama de Bode del convertidor en la malla de tensión.

Por otra parte la malla de corriente presenta estabilidad la cual debe ser compensada, aunque podría hacerse con un control de tipo proporcional, éste no garantiza que el sistema tenga un error en estado estable igual a cero.

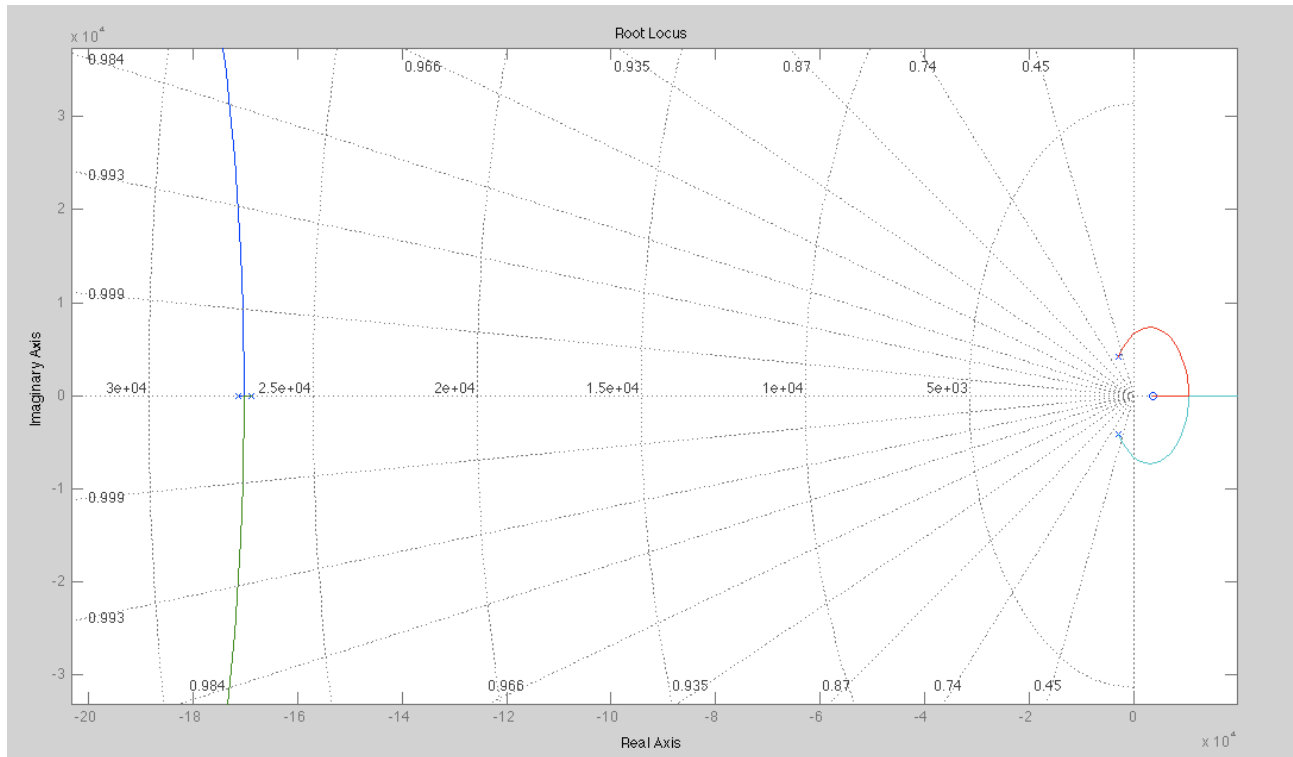


Figura 24. Lugar de las raíces del convertidor en la malla de corriente.

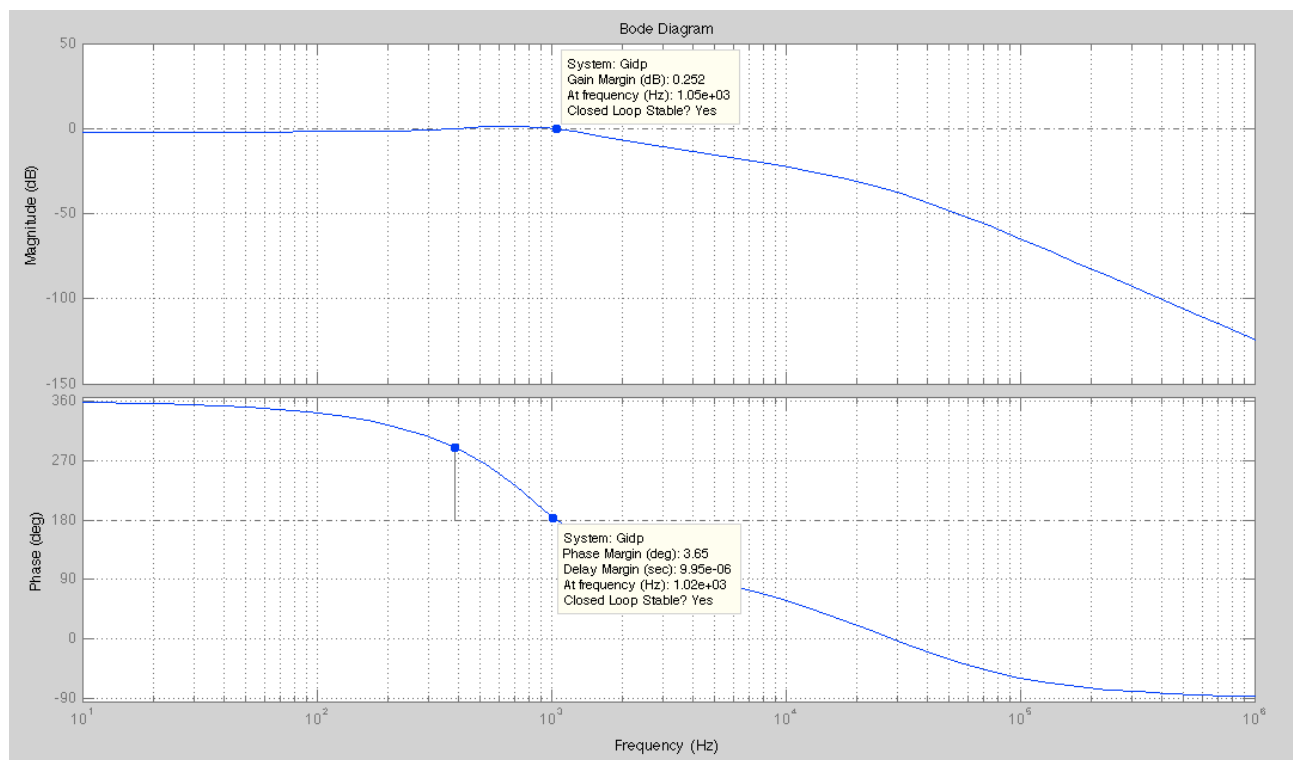


Figura 25. Diagrama de Bode del convertidor en la malla de corriente.

La cercanía a una posible inestabilidad que presenta este sistema no es apropiadamente corregida implementando un controlador de tipo proporcional en los dos casos, ya que el margen de fase queda muy cercano al crítico. Por otro lado con la implementación de un controlador Proporcional-Integral se logran márgenes tanto de ganancia como de fase apropiados, así como error en estado estacionario cero.

Para el diseño de los controladores en cada una de las mallas se usó la herramienta SisoTool de MatLab®, la cual permite visualizar de manera instantánea la respuesta del sistema ante la inserción de manera analítica de polos y ceros que conforman el controlador.

Haciendo uso de las gráficas simultáneas que presenta la herramienta, las cuales son lugar de las raíces, diagrama de Bode y respuesta paso, se ubican los polos y ceros del sistema para lograr la mejor respuesta posible teniendo en cuenta que la salida del sistema no puede poseer un sobre pico acentuado, y debe responder de la manera mas rápida posible, así como que el control de corriente que maneja la referencia del control de tensión debe ser más lento para evitar una posible oscilación o inestabilización del sistema.

Teniendo las funciones de transferencia de los controladores necesarios para dar estabilidad y repuesta apropiada al sistema, es necesario hallar la implementación a realizar en el prototipo.

Implementación del control de tensión.

$$C_v = 345.95 \left( \frac{1 + 0.00058s}{s} \right) = \frac{345.95}{s} + 0.2006$$

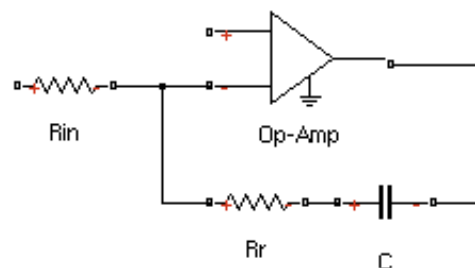


Figura 26. Implementación de control PI.

La ecuación que describe el comportamiento de éste circuito es:

$$C(s) = \frac{Rr}{Rin} + \frac{1}{RinCs}$$

Es claro que se asemeja en estructura a la función que describe al controlador, por lo cual se determinarán los valores de los componentes asociados al circuito partiendo de la función del controlador.

$$C = 470 \text{ nF}$$

$$Rin = 6.17 \text{ k}\Omega \approx 3 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega$$

$$Rr = 1.23 \text{ k}\Omega \approx 1.2 \text{ k}\Omega$$

De la misma forma se encontrarán los valores para el controlador de corriente a implementar.

$$C_i(s) = 48 \cdot \left( \frac{1 + 82 \mu \cdot s}{s} \right) = \frac{50}{s} + 4,1 m$$
$$C = 10 nF$$
$$R_{in} = 2 M\Omega$$
$$R_r = 8,2 k\Omega$$

## Consideraciones para la implementación

Selección de componentes.

- Circuito de control de PWM.

Se usará el integrado TL494 de Texas Instruments que se encuentra enfocado al manejo de fuentes conmutadas y como características generales posee un oscilador interno ajustable, 2 amplificadores de error con pin para realimentación, referencia de 5 V integrada, 2 etapas de salida que es posible usar en paralelo o en push pull, con emisor y colector abiertos, arranque suave.

- Transistores de conmutación.

Dentro de una gran variedad de posibilidades se selecciono la referencia FDH047AN de Fairchild, la cual tiene un  $R_{ds(on)} = 4 m\Omega$ ,  $V_{ds(max)} = 75V$  y una  $I_{ds(max)} = 80A$  tiempo de encendido de 160 ns y tiempo de apagado de 128 ns. Por otra parte se encuentran enfocados al trabajo de reguladores conmutados en automóviles con tensión de baterías de 42V y poseen un costo menor respecto a otras referencias similares en el mercado.

- Driver de Transistores.

Se seleccionó el integrado IR2110 de International Rectifier el cual permite realizar la conmutación de transistores complementarios en configuración de medio puente, adicional a ello es necesario manejar apropiadamente la transición entre encendido y apagado de los interruptores, ya que éstos no se apagan inmediatamente, por lo cual se hace necesario tener un tiempo muerto entre conmutaciones para evitar la conducción simultánea de los transistores, para esto se hace uso del integrado UC3715 de Texas Instruments, el cual con la adición de 2 resistencias permite determinar el tiempo muerto entre transistores y posee un bajo costo.

- Sensores del sistema.

Para sensar la corriente entregada por el sistema a las baterías, se seleccionó el integrado INA168 de Texas Instruments, el cual posee una buena versatilidad a la hora de interactuar con los componentes externos ya que es capaz de leer la tensión generada por una resistencia Shunt y convertirlo en una tensión que elige el diseñador.

Para introducir al sistema información del nivel de tensión se hace uso de un amplificador diferencial para suprimir parte del ruido de conmutación, teniendo en cuenta que las lecturas introducidas al controlador son de baja tensión el sistema solo posee una fuente de alimentación se implementa por medio del integrado OPA350 que es un amplificador operacional de con capacidad de recibir y entregar tensión desde el voltaje inferior de polarización hasta el superior.

\* Consideraciones de diseño del impreso.

- Etapa de potencia.

La etapa de potencia es la que maneja las grandes magnitudes de corriente, por o cual el ancho y largo de las pistas deberá ser calculado de acuerdo a la corriente RMS que circulará por ellas. Para dicho se efecto hizo

uso de la herramienta disponible en línea que se cita en la bibliografía [8], dando un margen de error debido a la magnitud de las corrientes manejadas, además de estos cálculos es necesario que la longitud de las pistas sea la mínima posible, ya que esto incrementa las pérdidas por conducción.

El impreso de control deberá tener un único punto de conexión entre tierra con el de potencia para evitar ruido en las pistas de tierra, y como consideración adicional los integrados que más corriente manejen deben estar lo más cerca posible de la fuente de poder, se deben evitar pistas de gran longitud ya que estas actúan como receptores electromagnéticos en distintas frecuencias lo cual introduce ruido al sistema y podría inestabilizarlo o afectar su correcto funcionamiento.

Todos los cables de interconexión entre las etapas de potencia y control deberán estar entorchados con el fin de evitar la inserción de ruido al sistema, ya que de esta manera trabajan como un filtro en modo común.

- Capacitor de salida.

El capacitor de salida que se implementó, consta de 15 condensadores de 270  $\mu\text{F}$  y 400 V en paralelo, ya que aunque éstos presentan los valores apropiados de capacitancia y tensión soportada, no serían capaces de manejar la corriente AC producto de la conmutación a plena carga, con lo que es necesario agruparlos para dividir la corriente manejada por cada uno, cabe resaltar que en el mercado nacional no se encuentra un capacitor que cumpla con las especificaciones totales, por lo cual fue necesario llevar a cabo la anterior implementación.

## Análisis de Resultados

La información que se presenta a continuación se organizará de acuerdo a las especificaciones citadas en el numeral respectivo.

1. Manipular tensiones de entrada entre 10 V y 21,5 V que son entregadas por el panel Solar.

- Regulación de tensión en la salida ante la variación de la totalidad de la entrada.

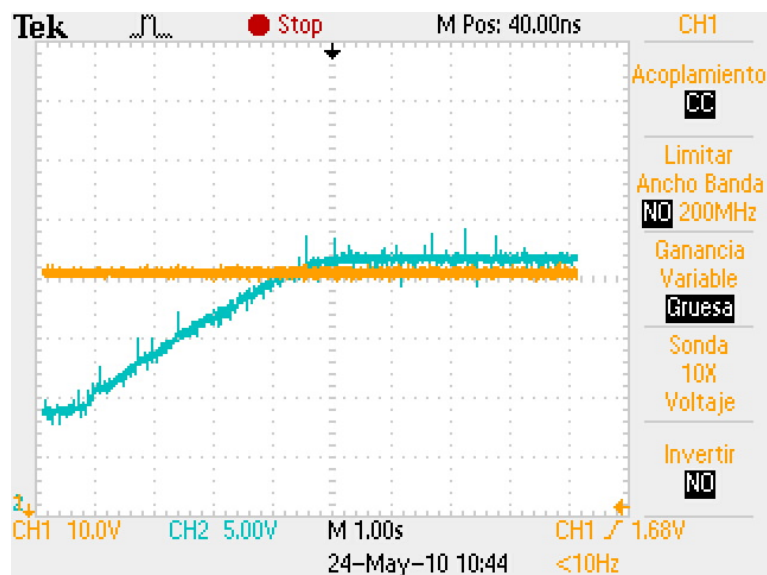


Figura 27. Variación de la entrada comparada con la salida.

Como se evidencia en la figura 27 tomada con un osciloscopio, en la cual se realizó una variación entre 10 V y 21,5 V sobre el canal 2 (Azul) que corresponde a la señal de entrada del convertidor, se observa que en todo momento la señal de salida se encuentra estable en un valor de 40,5 V que corresponde a la carga hasta el nivel de flotación. Esto corrobora el cumplimiento del primer requerimiento. Por otro lado se hace una prueba con un voltímetro digital para tener certeza sobre la medida de la salida teniendo en cuenta que la

resolución del osciloscopio en la presente escala es de +/- 2 V, con lo que se obtuvieron los valores presentados en la tabla 4.

Tensión de entrada	Tensión de salida
10 V	40,50 V
12 V	40,50 V
14 V	40,50 V
16 V	40,50 V
18 V	40,50 V
20 V	40,50 V
22 V	40,50 V

Tabla 4. Valores de entrada Vs. Valores de salida.

Teniendo en cuenta la tabla 4 el sistema no presenta variación de la salida variando la entrada, lo que es una característica importante en un convertidor y reafirma el buen diseño del mismo, por otra parte según lo anterior la carga de las baterías será en un valor exacto sin importar la entrada, aspecto importante ya que la entrada fluctúa aleatoriamente según el nivel de radiación lumínica aplicada al panel, la presente prueba se realizó con la tensión de flotación con una carga de 20  $\Omega$  .

- Regulación de la salida ante una variación de carga.

Uno de los aspectos importantes de un convertidor de tensión es la respuesta ante una variación de carga, para éste caso se medirá la variación de la salida, inicialmente teniendo el convertidor sin carga alguna y luego conectando una carga de 15 Ohms, lo que representa cargar el circuito a aproximadamente la cuarta parte de su capacidad, a continuación se expone la gráfica que se obtuvo al realizar dicha medida.

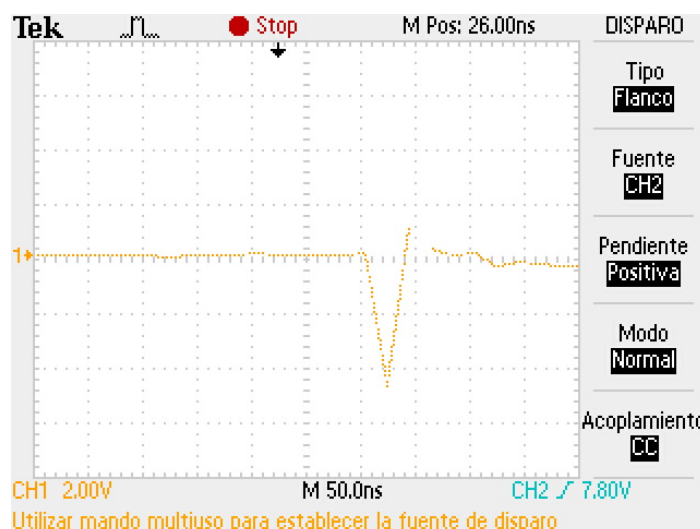


Figura 28. Respuesta ante variación paso de carga.

Para la figura 28 de manera adecuada el osciloscopio debe programarse para que su disparo esté en tipo manual con flanco de subida y sincronizado al canal 2 el que monitoreará la variación de tensión sobre la carga, el canal 1 que se encuentra conectado a la salida del convertidor se deberá encontrar en modo AC para poder apreciar la variación de la salida.

En la figura 28 se aprecia que la variación de la salida es de 5 V y dura 150 ns, lo que es apropiado para el tipo de carga a alimentar teniendo en cuenta que el sistema no inicia sin baterías conectadas. Por otra parte, el arranque ante la conexión de baterías dura 4 segundos, lo que representa un tiempo muy mayor al de recuperación medido, asimismo vale aclarar que la recuperación del sistema es debida principalmente a la carga almacenada en los capacitores de salida, ya que claramente la velocidad de respuesta del controlador es mucho menor a la medida.

2. Efectuar la carga de 3 baterías de 12 V nominales y 45 Ah en serie cumpliendo con los parámetros que se exponen en la hoja de especificaciones.

Basado en lo expuesto en el marco teórico con respecto a la carga de una batería, se establece que el sistema debe limitar la corriente de salida en el valor de  $C/4$  de la batería; puntualmente este sistema debe limitar la corriente en 11.25 A disminuyendo su tensión de salida.

Para verificar que el sistema efectúe dicha acción, se carga el mismo para solicitar una corriente superior a la máxima permitida, con lo cual se reducirá la tensión de salida del sistema para limitar la corriente.

A continuación se muestra en la figura 29 que en el canal 1 del osciloscopio mide la salida de tensión del sistema y en el canal 2 la corriente de salida del sistema, la medida del canal 2 se hará por medio de una pinza de corriente de efecto hall.

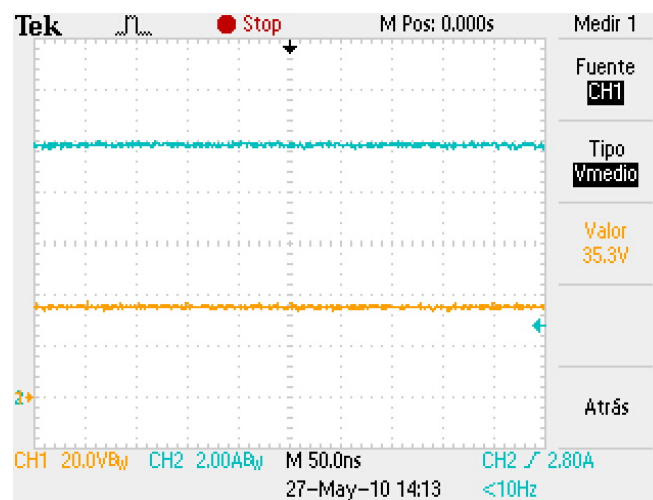


Figura 29. Variación de tensión de salida y limitación de corriente.

Se tiene que la corriente se limita en aproximadamente 11 A y la tensión de salida se mantiene en 35,3 V, con lo que se asegura que el sistema está limitando apropiadamente la corriente y será capaz de hacerlo durante la carga de baterías, a continuación se mostrará en la figura 30 el instante en el cual el convertidor está entregando su máxima potencia, prueba que se realizó por un momento debido al inconveniente expuesto antes.

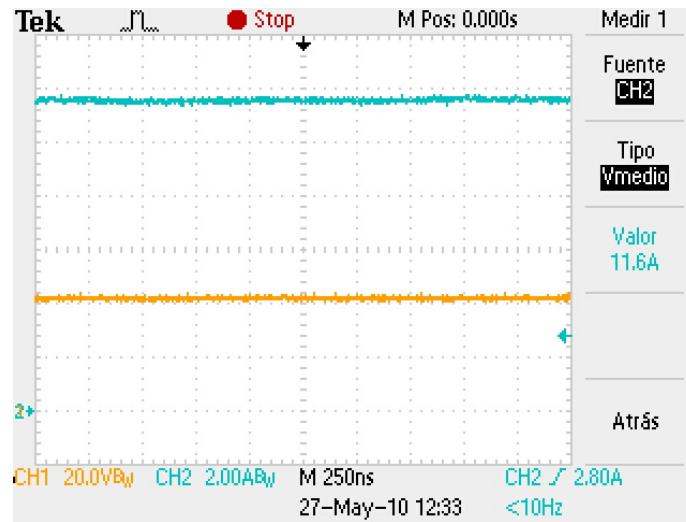


Figura 30. Sistema entregando al máxima potencia a la carga.

En la figura 30 se evidencia la tensión y la corriente entregadas a la carga, en este caso la tensión aplicada es de 40,5 V y la corriente es de 11,6 A, lo que representa el punto máximo de exigencia del sistema.

3. *Monitorear la carga de las baterías para que no supere los valores máximos permitidos tanto de corriente como de tensión.*

A continuación se exponen varias gráficas de medida de la tensión aplicada a las baterías y la corriente que circula por las mismas durante diferentes puntos de su periodo de carga, esto con la finalidad de no realizar pruebas aisladas de las características del sistema sino mostrar que el mismo cumple con las especificaciones para la carga, y que ésta se efectúa de manera autónoma.

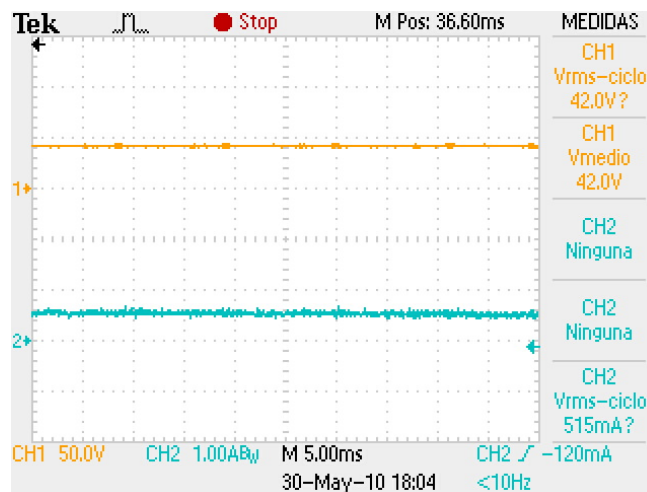


Figura 31. Etapa final de carga de las baterías.



En la figura 31 se muestra la etapa final de carga de las baterías en modo de igualación, la corriente que circula por ellas es de 515 mA y la tensión aplicada es de 42 V como se muestra en las mediciones a la derecha siendo el canal 2 la corriente circulante por las baterías y el canal 1 la tensión aplicada a las mismas.

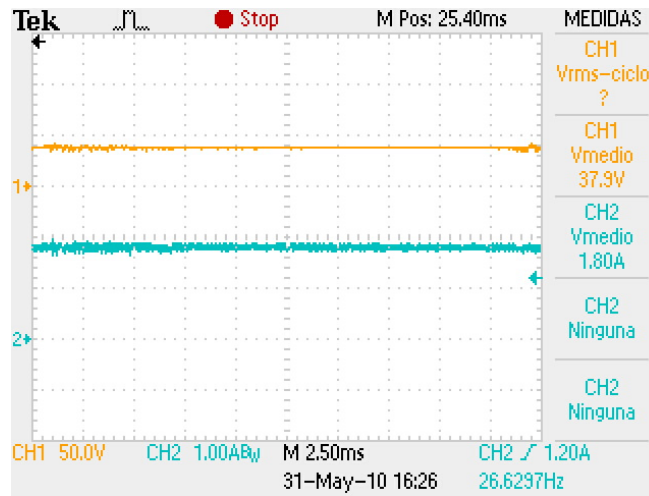


Figura 32. Inicio de carga de las baterías.

En la figura 32 se muestra el instante en el cual las baterías son conectadas al sistema con una tensión de 37,9 V en éste momento el sistema se encuentra limitando la corriente en 1,8 A debido a que la fuente de alimentación del mismo no es capaz de entregar mas potencia. La tensión aplicada a los almacenadores es mayor a la tensión a la cual se encuentran cargados con el fin de desencadenar una circulación de corriente a través de los mismos, por lo cual la tensión aplicada y la medida sin el cargador conectado no coincidirán.

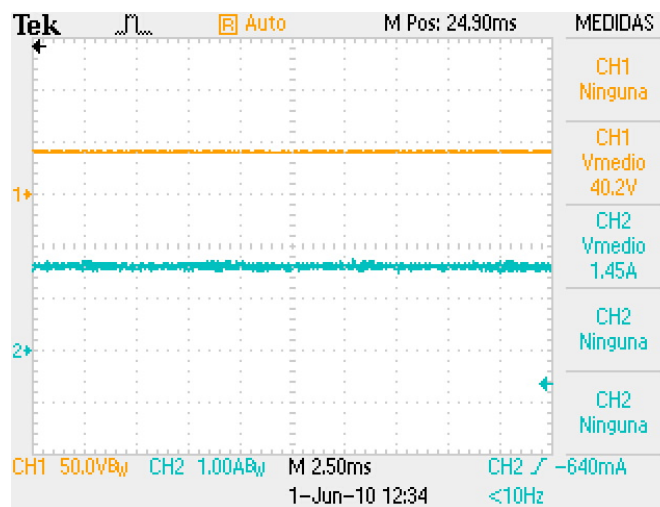


Figura 33. Punto intermedio de carga de las baterías.

En la figura 33 se muestra un instante intermedio en la carga de las baterías en el cual la corriente se encuentra limitada pero la tensión aplicada ha subido con respecto a la figura 32, lo que indica que los almacenadores han adquirido carga.

## Conclusiones

1. Aunque el sistema funciona adecuadamente de acuerdo a las especificaciones dadas, sería conveniente implementar un control micro-procesado que permita manipular información de la curva de potencia del panel, con lo que se hará una conversión mas eficiente de energía.
2. La conexión de tierras entre la etapa de control y etapa de potencia se debe hacer en un único punto y preferiblemente entre el source del transistor inferior de la rama y el punto de tierra del integrado que maneja el PWM.
3. La lectura de tensión a la salida es mas acertada si se hace por medio de un amplificador diferencial con ganancia igual a la calculada para el sensor a cambio de un divisor resistivo.
4. Todo el circuito, incluyendo etapas de control y de potencia, deberá encontrarse dentro de una caja metálica para evitar radiación producto de las conmutaciones hacia el exterior, lo que podría afectar el correcto funcionamiento de otros equipos y lecturas inadecuadas de las señales del convertidor en cuestión.
5. Se deben evitar cables de interconexión con gran longitud para prevenir el acople electromagnético de señales que introduzcan ruido al sistema, en tal caso que sea inevitable su uso, éste deberá ir entorchado junto con un cable de tierra para implementar un filtro en modo común y así reducir dichas señales indeseables.
6. Debido a que el sistema necesita gran cantidad de energía para su arranque, es necesario realizar un inicio suave en el cual la tensión de salida se incremente gradualmente para evitar solicitar una gran cantidad de corriente a los paneles y que éstos se vean afectados.

## **Bibliografía**

1. ERICKSON, Robert; MAKSIMOVIC, Dragan, Fundamentals of Power Electronics, Segunda edición, Editorial Kluwer Academic Publishers, 2004.
2. MOHAN, Ned; UNDELAN, Tore, Power Electronics, Segunda edición, Editorial John Wiley & Sons inc.
3. Panasonic, Methods of charging the valve-regulated Lead-Acid Battery, 2005, Anexo 3.
4. Goetzberger, A, Photovoltaic Solar Energy Generation, Primera edición , Editorial.
5. HAY, Karim, Apuntes de clase electronica no lineal.
6. MIRANDA C, Danilo, Riesgos Eléctricos.
7. JONGSM, J, High frequency ferrite power transformer and choke design, Part 3.
8. Cálculo de circuitos impresos, disponible en linea en <http://www.allplak.com.ar/Calculo-de-Circuitos/Calculo-de-Circuitos-Impresos.html>.