

SISTEMA DE GESTIÓN DE CARGA PARA BATERÍAS DE ION-LITIO

JORGE IVÁN PÉREZ VALDERRAMA  
YORLY MARCELA WALTEROS PARRA

PROYECTO: TRABAJO DE  
GRADO No. 1610  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO:  
ING. RAFAEL FERNANDO DÍEZ MEDINA Ph.D

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ELCTRÓNICA  
BOGOTÁ D.C.

2016

## AGRADECIMIENTOS.

Agradecemos al Ingeniero Rafael Díez por compartir su conocimiento y experiencia tanto en el desarrollo de este proyecto, como en la asignatura que cursamos con él. Su asesoría y acompañamiento durante el último año ha fortalecido nuestros conocimientos para así poder llevar a cabo este trabajo de grado.

A Dios y nuestras familias gracias por acompañarnos en este proceso, darnos apoyo y siempre tener una palabra de aliento en momentos difíciles. En especial al Ingeniero Jorge Pérez por siempre estar dispuesto a ayudarnos y apoyarnos en los inconvenientes que se nos presentaron. A Esperanza Valderrama por sus palabras de apoyo y motivación en momentos difíciles durante estos últimos 5 años. A Gladys Parra por su preocupación y cariño en cada dificultad que se nos presentó. A Marcela Martínez por ser tan especial y mantenernos en sus oraciones.

Nos sentimos agradecidos por todo el apoyo otorgado por el Ingeniero Juan David Poveda, durante el desarrollo de nuestra carrera y esta última etapa, donde su asesoría fue de vital importancia para la solución de inconvenientes en el desarrollo del proyecto.

A los ingenieros del departamento de electrónica que nos han formado a través de los últimos 5 años, especialmente a los Ingenieros Gabriel Perilla, Arnold Wiesner, Camilo Otálora, Luis Fernando Melchior por su paciencia y dedicación para orientarnos en el desarrollo de este trabajo de grado.

Finalmente queremos agradecer a nuestros compañeros Catherine Pulido, Camila Estupiñan, Paola García, Nicolás Gonzales, Margarita Valencia, Sergio Ruiz y Andrés Hernández por su colaboración, paciencia, apoyo y ayuda en la realización de nuestro proyecto de grado.

## Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN .....	8
2	MARCO TEÓRICO.....	9
2.1	BATERÍAS DE ION LITIO .....	9
2.1.1	HISTORIA .....	9
2.1.2	CARACTERÍSTICAS.....	9
2.1.3	PAQUETES DE BATERIAS DE LITIO .....	10
2.1.4	CELDAS DE ION LITIO.....	10
2.2	ESTADO DE CARGA .....	13
2.2.1	DEFINICION .....	13
2.2.2	MEDICIÓN .....	13
2.2.3	MÉTODO DE VOLTAJE DE CIRCUITO ABIERTO.....	14
2.3	BMS.....	15
2.4	CONVERTIDOR BUCK-BOOST .....	15
2.5	CONTROL POR HISTÉRESIS.....	17
3	OBJETIVO DEL PROYECTO.....	19
4	DESARROLLO .....	20
4.1	DIAGRAMA EN BLOQUES.....	20
4.2	CIRCUITO DE IGUALACIÓN .....	20
4.3	SIMULACIÓN DE UN CASO DE IGUALACIÓN .....	22
4.4	SENSORES DE VOLTAJE.....	24
4.5	GENERACION DE SEÑALES DE CONTROL PARA CIRCUITO DE IGUALACION.....	25
4.6	DRIVER DE CORRIENTE DE GATE.....	26
4.7	FUENTES AISLADAS .....	27
4.8	SENSORES DE TEMPERATURA.....	27
4.9	SENSOR DE CORRIENTE .....	28
4.10	GENERACION DE SEÑALES PARA INTERRUPTORES DE CONTROL EXTERNOS .....	28
4.11	LEDS INDICADORES .....	30
5	PROTOCOLO DE PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS .....	31
5.1	CARACTERIZACION DE BATERIAS EN PROCESO DE CARGA .....	31
5.2	CARACTERIZACION DE BATERIAS EN PROCESO DE DESCARGA.....	32
5.3	ESTADO DE CARGA E HISTERESIS.....	33
5.4	UBICACIÓN DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA.....	35
5.5	SENSORES DE VOLTAJE.....	36
5.6	SEÑALES DE CONTROL PARA EL CIRCUITO DE IGUALACION .....	37

5.7	COMPROBACION DE CASOS DE IGUALACION.....	38
5.8	IGUALACION CON 2 CELDAS .....	41
5.9	SEÑALES DE CONTROL PARA INTERRUPTORES EXTERNOS .....	42
5.10	IGUALACION DE VOLTAJE DURANTE PROCESO DE DESCARGA.....	43
5.11	IGUALACION DE VOLTAJE DURANTE PPROCESO DE CARGA .....	43
5.12	CONSUMO DEL CIRCUITO.....	44
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	45
7	BIBLIOGRAFIA.....	46
8	ANEXOS.....	47
8.1	MEDICION DE IMPEDANCIA DE LAS BATERIAS.....	47
8.2	CALCULOS DE LA INDUCTANCIA.....	48
8.3	SELECCIÓN DEL NUCLEO .....	52
8.4	CIRCUITO IMPRESO .....	54
8.5	DRIVER DE CORRIENTE.....	55
8.6	MOSFET Y DIODOS.....	56
8.7	PÉRDIDAS EN EL CIRCUITO DE IGUALACION.....	57
8.8	CALCULO DEL SENSOR DE VOLTAJE.....	58
8.9	CALCULO DEL SENSOR DE CORRIENTE.....	59
8.10	MICROCONTROLADOR PIC24FJ64GA002 .....	59
8.11	MICROCONTROLADOR PIC16F877A .....	60
8.12	MONTAJE FINAL .....	61

## Tabla de figuras

Figura 1 composición interna de celdas de ion litio [5] .....	11
Figura 2 Mecanismo de carga de una batería de iones de litio. [5] .....	11
Figura 3 Mecanismo de descarga de una batería de iones de litio [5].....	12
Figura 4 Comparación de capacidad específica para los elementos más utilizados en la fabricación de baterías. [4].....	12
Figura 5 Comparación de energía específica y densidad volumétrica de energía para varios tipos de batería. [4] .....	14
Figura 6 Relación típica entre SOC y OCV para una batería de ion [1]. .....	14
Figura 7 Convertidor Buck-Boost. ....	15
Figura 8 Estado 1. ....	16
Figura 9 Estado 2. ....	16
Figura 10 Corriente de la inductancia. ....	16
Figura 11 Control por histéresis. ....	17
Figura 12 Control por histéresis implementado con un flip flop.....	18
Figura 13 Control implementado con un microcontrolador. ....	18
Figura 14 Diagrama en bloques del sistema.....	20
Figura 15 Circuito de igualación [5]. ....	21
Figura 16 Circuito de igualación para dos celdas adyacentes. ....	22
Figura 17 Circuito de igualación para celdas no adyacentes.....	22
Figura 18 Esquemático de simulación con pérdidas. ....	23
Figura 19 Resultado de la igualación. ....	23
Figura 20 Corriente de la inductancia simulada.....	23
Figura 21 Voltajes de las celdas.....	24
Figura 22 Circuito de sensado de voltaje. ....	24
Figura 23 Esquemática microcontrolador PIC24FJ64GA002.....	25
Figura 24 Histéresis de diferencia. ....	26
Figura 25 Esquemático fuentes aisladas y drivers de corriente.....	27
Figura 26 Sensor de temperatura.....	28
Figura 27 Circuito de sensado de corriente. ....	28
Figura 28 Esquemático microcontrolador PII6F877A. ....	29
Figura 29 Interruptores externos. ....	29
Figura 30 Histéresis de temperatura.....	30
Figura 31 Leds indicadores. ....	30
Figura 32 Grafica de Voc vs Wh para carga. ....	31
Figura 33 Circuito equivalente con impedancia de la batería. ....	32
Figura 34 Grafica de Voc vs Wh para descarga.....	32
Figura 35 Circuito equivalente con impedancia de la batería. ....	33
Figura 36 Grafica de Voc vs SOC para proceso de descarga.....	34
Figura 37 Grafica de Voc vs SOC para proceso de carga. ....	34
Figura 38 Grafica de histéresis para cada batería.....	35
Figura 39 Temperatura de las celdas.....	36
Figura 40 Señales de control para celdas no adyacentes.....	37
Figura 41 Señales de control para celdas adyacentes.....	38

Figura 42 Comprobación de casos de igualación.....	40
Figura 43 Corriente de la inductancia. ....	40
Figura 44 Grafica de igualación para dos celdas.....	41
Figura 45 Grafica de diferencia a través del tiempo. ....	42
Figura 46 Señales de control para interruptores externos. ....	42
Figura 47 Grafica de descarga con circuito de igualación. ....	43
Figura 48 Grafica de carga con circuito de igualación.....	44
Figura 49 Circuito con impedancia de la batería.....	47
Figura 50 Corriente de la inductancia. ....	49
Figura 51 Tabla AWG.....	52
Figura 52 Parámetros para los núcleos de materia 77. ....	53
Figura 53 Circuito impreso. ....	54
Figura 54 Driver de corriente. ....	55
Figura 55 Esquemático del driver de corriente. ....	56
Figura 56 Grafica de corriente vs voltaje del diodo. ....	56
Figura 57 Circuito de igualación.....	57
Figura 58 Amplificador diferencial.....	58
Figura 59 PIC24FJ64GA002.....	59
Figura 60 PIC16F877A.....	60
Figura 61 Montaje final.....	61

## Tabla de tablas

Tabla 1 Señales de control .....	25
Tabla 2 Correspondencia señales de control con salidas del microcontrolador. ....	26
Tabla 3 Resultados prueba de igualación.....	41
Tabla 4 Parámetros de diodo y mosfet. ....	57

## 1 INTRODUCCIÓN

A medida que pasaban los años y la tecnología evolucionaba se evidenció la necesidad de construir equipos electrónicos portátiles, es por esta razón que las baterías tomaron importancia como sistemas indispensables y comenzaron su evolución de manera paralela. De esta forma las baterías de ion-litio se hicieron un espacio importante en el mercado, útiles en distintas aplicaciones. Hoy en día se utilizan estas baterías en dispositivos portátiles, ya que son una alternativa costo eficiente y de pequeño tamaño. Estas razones hacen que el mercado de baterías de litio presente un crecimiento a lo largo de los años [1]. Sin embargo, en muchas de las aplicaciones se requieren voltajes más altos a los entregados por una sola celda de ion-litio, por esta razón surge la necesidad de realizar arreglos en serie.

Como resultado del proceso de fabricación de las baterías, no existen dos celdas exactamente iguales, por esto cada una de las celdas se carga y se descarga de forma diferente, por esta razón al conectarlas en serie se corre el riesgo de sobrecargar o sobre descargar una de las celdas, generando daños directos, afectando su desempeño disminuyendo sus ciclos de carga.

Existen daños causados por sobrecarga, como aumento en la temperatura y generación de partículas de litio, que pueden ocasionar cortos circuitos dentro de la celda, de igual forma, si aumenta la temperatura de la celda por encima del rango permitido, puede acabar con la explosión de la misma [2].

A pesar de las cualidades de las baterías de litio existen inconvenientes ya que hay que mantenerlas dentro de su rango de operación seguro para evitar daños, disminución en su vida útil o prevenir accidentes. Debido a estos inconvenientes es necesario adicionar circuitos de protección para controlar su carga y su descarga como por ejemplo los BMS (*battery management system*) [3].

El BMS se encarga de monitorizar variables de interés como voltaje y temperatura de cada una de las celdas y a partir de esta toma de datos procurar que las baterías permanezcan dentro de la zona segura de operación, permitiendo aprovechar la batería en mayor proporción, ya que evita que su vida útil disminuya y previniendo efectos de sobrecarga y sobre descarga [3].

Este proyecto está centrado en el diseño e implementación de un gestor de carga para 4 baterías de ion-litio, con un voltaje nominal de 3,7 V y una capacidad de 2000 mAh conectadas en serie. A partir del sensado de voltaje, temperatura y corriente, se buscará mantener las baterías dentro de su rango de operación mediante la implementación de circuitos de igualación y de control.

## 2 MARCO TEÓRICO

Este capítulo define las características de las baterías de ion de litio así como su funcionamiento, los parámetros asociados y las gráficas y mediciones que permiten conocer su comportamiento a lo largo del tiempo. Se explica adicionalmente, el concepto de BMS y cómo los microcontroladores pueden ser de utilidad para lograr diseñar e implementar un BMS.

Se presenta un análisis conceptual para identificar la metodología más adecuada para el desarrollo del sistema a partir del estado del arte.

### 2.1 BATERÍAS DE ION LITIO

#### 2.1.1 HISTORIA

La historia de las baterías de litio se remonta al año de 1970, cuando las primeras baterías no recargables de este tipo salieron al mercado. Si bien, en la época de 1980 se realizaron intentos para desarrollar una batería recargable, estos intentos fracasaron debido a la alta inestabilidad en el litio que se utilizaba como material para el ánodo. El litio encabeza a los metales alcalinos en la tabla periódica, es el más ligero de los metales, tiene el mayor potencial electroquímico y provee la mayor cantidad de energía por peso teniendo una capacidad energética teórica de 3860Ah/kg [4], por estas razones las baterías recargables con litio en el ánodo logran densidades de energía muy altas. Sin embargo, se descubrió que los ciclos producían partículas no deseadas en el ánodo las cuales penetraban el separador y causaban un corto circuito; la temperatura de la celda podía incrementar muy rápidamente y alcanzar el punto de fusión del litio, causando escapes térmicos, lo cual representaba un gran riesgo para la seguridad.

La inestabilidad del litio, especialmente durante el proceso de carga, llevó las investigaciones hacia una solución no metálica utilizando iones de litio. En 1991, Sony comercializó la primera batería de iones de litio y hoy en día su tecnología se ha convertido en la más prometedora y de rápido crecimiento en el mercado [4].

#### 2.1.2 CARACTERÍSTICAS

Aunque poseen una menor cantidad de energía en comparación con otros tipos de batería, las baterías de litio son seguras siempre que se respeten los límites de voltaje y corriente. Estas baterías requieren de un bajo mantenimiento, no tienen efecto memoria y no necesitan ser descargada por completo para mantenerse en buenas condiciones; así mismo la auto descarga es mucho menor que la presentada con otras tecnologías. Adicionalmente, el voltaje nominal de 3.6V de las baterías de litio estándar, puede alimentar directamente una gran variedad de dispositivos electrónicos como teléfonos y cámaras [4].

Los inconvenientes de las baterías de ion litio radican principalmente en la necesidad de circuitos de protección, la afectación del rendimiento con la edad, las restricciones actuales en su transporte debido a su riesgo de incineración y su alto costo de fabricación en comparación con otros tipos de batería.

### 2.1.3 PAQUETES DE BATERIAS DE LITIO

Una batería de litio es realmente un paquete que contiene una o varias celdas dentro, el paquete se presenta en variedad de formas y tamaños.

Por lo general un paquete de baterías de litio contiene todos o algunos de los siguientes elementos [5]:

- Celdas de ion de litio, las cuales pueden ser pilas cilíndricas o prismáticas (cuadradas o rectangulares).
- Uno o varios sensores de temperatura para controlar la temperatura de la batería.
- Un convertidor de voltaje y un circuito regulador para mantener los niveles seguros de voltaje y corriente.
- Un conector que permite que la energía (y la información si la tiene) fluya bidireccionalmente en la batería.
- Una toma de voltaje, que supervisa la capacidad de energía de células individuales en el paquete de baterías
- Un monitor de estado de carga de la batería, que corresponde a un pequeño ordenador encargado de administrar todo el proceso de carga para asegurarse de que las baterías se carguen lo más rápido y completamente posible.

### 2.1.4 CELDAS DE ION LITIO

Al igual que la mayoría de baterías, las celdas de ion de litio poseen una cubierta externa de metal, dicha cubierta tiene un escape sensible a la presión que es importante debido a que la batería se encuentra presurizada. Si la batería se calienta demasiado se corre el riesgo de explosión por sobrepresión lo cual se mitiga gracias al escape que libera la presión adicional.

Esta cubierta de metal contiene una espiral larga que comprende tres láminas delgadas como se observa en la figura 1:

- Electrodo positivo: Fabricado con óxido de litio cobalto, o  $\text{LiCoO}_2$ .
- Electrodo negativo: Fabricado de carbono.
- Separador: Es una lámina muy fina de plástico micro perforado. Como su nombre indica, separa los electrodos positivos y negativos pero permite que los iones viajen entre electrodos.

Adicionalmente, dentro de la cubierta las láminas están sumergidas en un disolvente orgánico que actúa como electrolito (comúnmente se utiliza el éter).

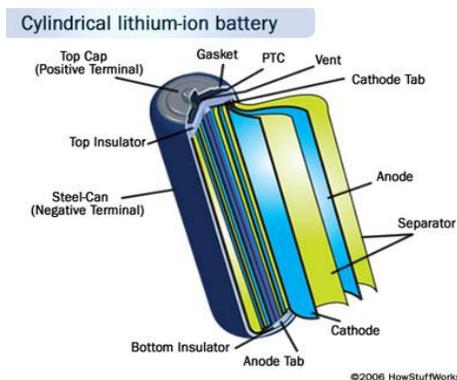


Figura 1 composición interna de celdas de ion litio. Tomada de [5]

Las baterías de ion litio funcionan bajo procesos denominados inserción y desinserción. Las reacciones que ocurren dentro de las baterías son en estado sólido entre dos compuestos, uno denominado huésped de naturaleza iónica, que reacciona ocupando lugares libre y otro compuesto denominado anfitrión. En las baterías de ion litio, el electrodo negativo está compuesto de litio y el electrodo positivo está formado por un comportamiento de anfitrión, comúnmente usado el carbono, permitiendo la inserción de los iones de litio.

Cuando la batería se carga, los iones de litio se mueven a través del electrolito desde el cátodo hasta el ánodo y se fijan al carbono. Lo anterior se ilustra en la figura 2.

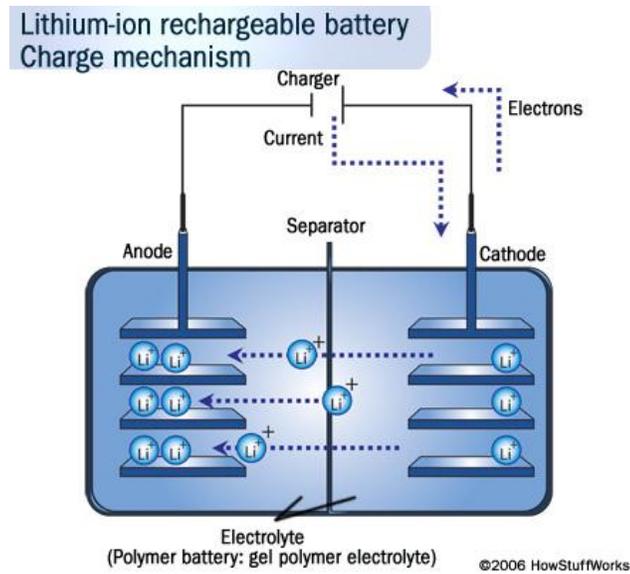


Figura 2 Mecanismo de carga de una batería de iones de litio. Tomada de [5]

Durante la descarga, los iones de litio se mueven de nuevo hacia el  $\text{LiCoO}_2$  a partir del carbono como se muestra en la figura 3 debido a la oxidación en el electrodo negativo del litio.

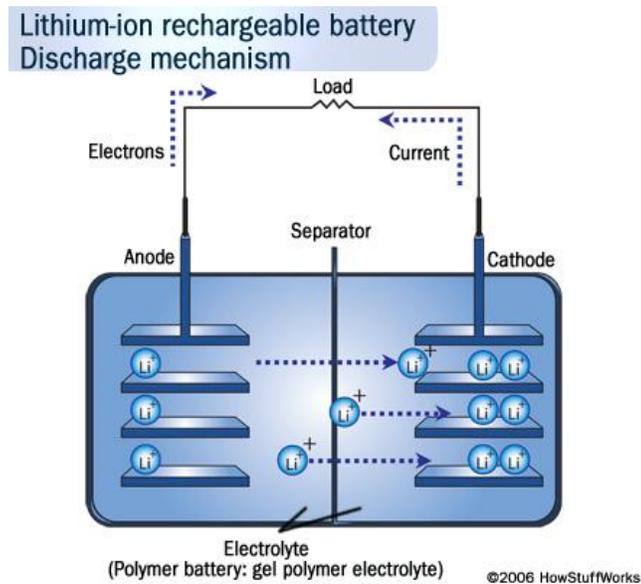


Figura 3 Mecanismo de descarga de una batería de iones de litio. Tomada de [5]

El movimiento de los iones de litio ocurre a un voltaje bastante alto, por lo que cada celda produce 3.7 voltios (mucho mayor que el voltaje de 1,5V de una pila alcalina AA, lo cual ayuda a que las baterías de iones de litio sean más compactas). [5] [4]

En cuanto al funcionamiento a nivel químico, se debe tener en cuenta la capacidad gravimétrica o capacidad específica, que corresponde a una medida que indica la capacidad de un elemento por unidad de peso. Está definida por:

$$\text{Capacidad específica} = \frac{N * F}{\text{Peso atómico}}$$

donde,

N = Valencia del material

F = Constante de Faraday = 96485 Coulombs/Mole = 26.801 Ah/Mole

En el caso del litio, la capacidad específica corresponde a:

$$\text{Capacidad específica litio} = \frac{1 \text{ Valencia} \times 26.801 \text{ Ah/g} \times 1000 \text{ mA/A}}{6.94 \text{ g/Mole}} = 3861 \text{ mAh/g}$$

En la figura 4 se muestra la capacidad específica de los elementos utilizados en los diferentes tipos de batería más importantes. Como se puede apreciar, el litio presenta una capacidad específica mayor a los demás elementos, esto implica que las baterías fabricadas con litio pueden tener una mayor capacidad que las otras, es decir, permiten almacenar una mayor cantidad de energía con un volumen y peso menores respecto a otros tipos de batería.

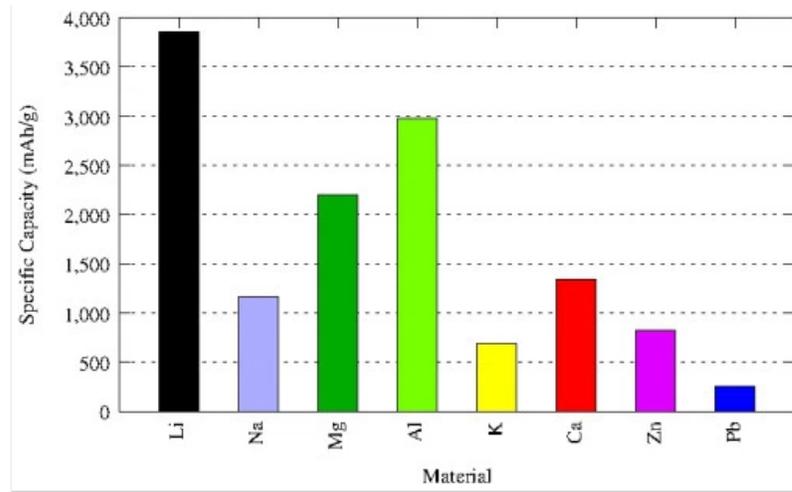


Figura 4 Comparación de capacidad específica para los elementos más utilizados en la fabricación de baterías. Tomada de [4]

Adicionalmente se debe tener en cuenta la densidad de energía volumétrica, la cual corresponde a la cantidad de energía que se puede almacenar por unidad de volumen. Al realizar una comparación teniendo en cuenta la densidad de energía gravimétrica y la densidad de energía volumétrica entre los principales tipos de batería se puede comprobar que la batería de litio presenta el mejor comportamiento respecto a los demás tipos:

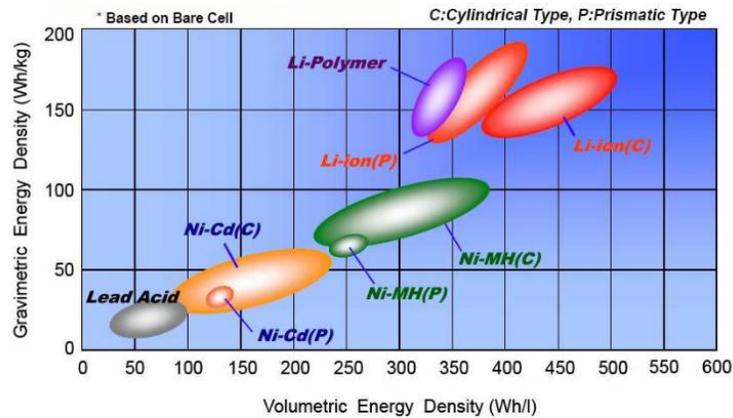


Photo Credit: NASA - National Aeronautics and Space Administration

Figura 5 Comparación de energía específica y densidad volumétrica de energía para varios tipos de batería. Tomada de [4]

## 2.2 ESTADO DE CARGA

### 2.2.1 DEFINICION

El estado de carga (SOC) de una batería o una celda corresponde al porcentaje de su capacidad total de energía que aún se encuentra disponible en determinado momento. No existe una manera directa de medir el SOC de una batería debido a factores como la edad, el voltaje de carga, la temperatura, la velocidad de descarga y el manejo inadecuado que afectan la medición. El desarrollo de una medición de estado de carga es un proceso muy complejo, por lo cual se define usualmente como una estimación en lugar de una medida o determinación como tal. No hay un único proceso adecuado para medir el SOC. [2]

En general, el SOC de una batería se define como la relación de su capacidad actual  $Q(t)$ , que corresponde a una medida en Wh, con la capacidad nominal  $Q_n$ . La capacidad nominal es dada por el fabricante y representa la cantidad máxima de carga que se puede almacenar en la batería [5].

$$\text{SOC}(t) = \frac{Q(t)}{Q_n}. \quad (1)$$

### 2.2.2 MEDICIÓN

Los diferentes métodos matemáticos de estimación se clasifican según la metodología de la siguiente manera [8, 10]:

- Medición directa: utiliza las propiedades físicas de la batería, como su voltaje e impedancia. Entre los diferentes métodos que se pueden encontrar en esta categoría se tienen el método de voltaje de circuito abierto, método de voltaje de terminal, método de medición de impedancia y método de espectroscopia de impedancia.
- Estimación Book-keeping: este método utiliza la corriente de descarga como entrada y toma en cuenta la corriente de descarga a lo largo del tiempo para calcular el SOC.

- Sistemas adaptativos: pueden ajustar automáticamente el SOC según las diferentes condiciones de descarga y las características de la batería. Se han desarrollado varios nuevos sistemas adaptativos para la estimación de SOC.
- Métodos híbridos: combinan dos o más métodos de estimación y permiten un rendimiento mejor. Generalmente producen una buena estimación de SOC.

### 2.2.3 MÉTODO DE VOLTAJE DE CIRCUITO ABIERTO

Para algunos tipos de batería existe una relación aproximadamente lineal entre el SOC y su voltaje de circuito abierto (OCV) dado por:

$$V_{OC}(t) = a_1 \times SOC(t) + a_0, \quad (2)$$

Donde SOC(t) corresponde al SOC de la batería en el tiempo t,  $a_0$  corresponde al voltaje entre los terminales de la batería cuando el SOC es 0% y  $a_1$  se obtiene mediante el valor de  $a_0$  y  $V_{oc}(t)$  con un SOC de 100%.

Una batería de ion de litio no tiene una relación lineal entre el OCV y SOC como se muestra en la figura 4. La relación entre el OCV y el SOC para este tipo de baterías se determina cargando o descargando la batería mientras se mide cada cierto tiempo el voltaje, la corriente y el tiempo transcurrido desde que inició la medición, hasta que la batería se encuentre plenamente cargada o descargada. A partir de los datos tomados se puede realizar el cálculo en Wh para cada instante de tiempo y se puede establecer de esta manera una gráfica que relaciona voltaje y SOC mostrada en la figura 4.[5].

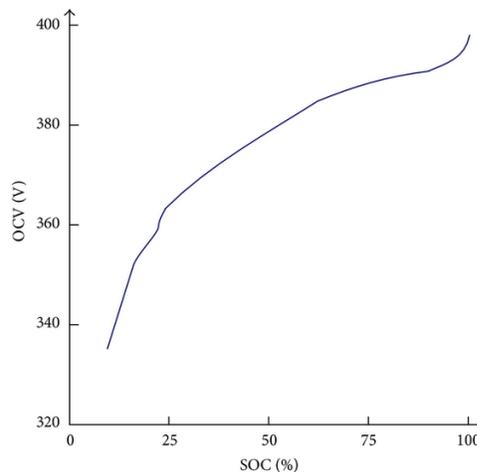


Figura 6 Relación típica entre SOC y OCV para una batería de ion [1].

Es importante aclarar que la relación entre OCV y SOC no es exactamente la misma para todas las baterías, por lo tanto debe medirse en cada una de las baterías para poder estimar con precisión el SOC.

## 2.3 BMS

Un sistema de administración de batería (BMS) es un circuito capaz de monitorear un paquete de baterías para que funcionen en los parámetros seguros de operación (voltaje, corriente y temperatura) durante su carga y descarga. Estos circuitos siguen el estado de cada una de las baterías, es decir, alarman o desconectan si el paquete de baterías se encuentra fuera de los parámetros seguros de operación además de equilibrar o igualar el voltaje.

Dependiendo de la aplicación es importante especificar cada uno de los bloques necesarios para diseñar un BMS. En este caso se implementaron las siguientes funciones:

Los objetivos generales de un BMS son:

- Protección de las celdas: esta función del BMS se ocupa de la protección de las baterías para evitar inconvenientes en la carga y descarga, que puedan llegar a afectar su vida útil causando incluso algún daño permanente. Lograr este objetivo representa una desventaja a nivel de costos económicos respecto a otros tipos de batería, sobre todo en industrias donde se utilizan baterías de gran potencia.
- Control de carga: es unas características más importantes debido a que entre las causas más comunes de daño de baterías se encuentra un inapropiado proceso de carga.
- Balance de voltaje en las celdas: en un paquete de baterías, la diferencia de voltaje entre celdas se debe a la impedancia interna de cada una de estas o a condiciones de operación diferente; esta diferencia tiende a aumentar en cada ciclo de carga o descarga y las celdas más propensas a daños pueden fallar con más facilidad, es por esto que la igualación de voltaje entre celdas surge como una necesidad para compensar estas celdas con la ecualización de carga en toda la cadena de baterías, extendiendo así su vida útil.

## 2.4 CONVERTIDOR BUCK-BOOST

Los convertidores DC-DC son circuitos que transforman una fuente dc de entrada en otro valor de salida. Un tipo de convertidor DC-DC es un buck-boost que se caracteriza por tener a la salida un voltaje más alto o más bajo que la entrada, por esta razón es conocido como un convertidor reductor elevador[3], la transferencia de energía se realiza cargando la inductancia en el tiempo  $T_{on}$  y descargándola en el tiempo  $T_{off}$ . La topología que se analizará se muestra en la figura 5.

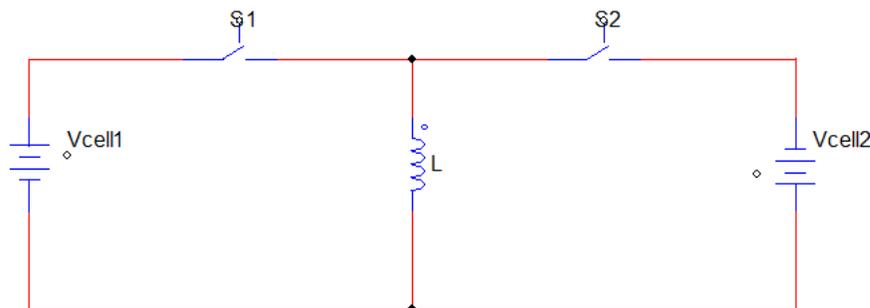


Figura 7 Convertidor Buck-Boost.

Los interruptores S1 y S2 están controlados por una señal cuadrada que los abrirá y cerrará, esta conmutación genera dos estados en el circuito.

- Intervalo  $0 \leq t \leq DT$

En este intervalo de tiempo el interruptor S1 está cerrado y el interruptor S2 está abierto teniendo el circuito equivalente mostrado en la figura 6, la inductancia se carga con una pendiente en su corriente de  $\frac{V_{cell1}}{L}$ .



Figura 8 Estado 1.

- Intervalo  $0 \leq t \leq DT$

En este intervalo de tiempo el interruptor S1 está abierto y el interruptor S2 está cerrado dando como resultado el circuito equivalente mostrado en la figura 7, la inductancia se descarga con una pendiente en su corriente de  $-\frac{V_{cell2}}{L}$ .



Figura 9 Estado 2.

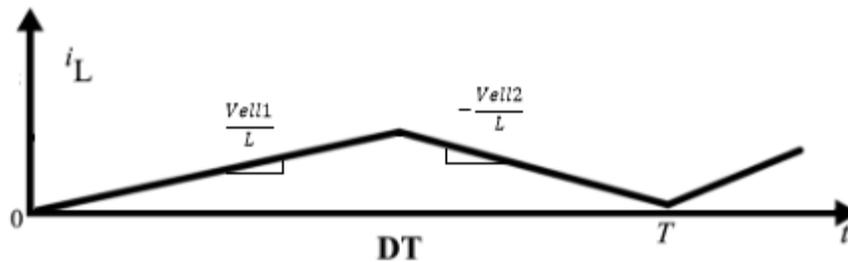


Figura 10 Corriente de la inductancia.

Para hallar la función de transferencia se procede a plantear el balance de flujo en cada estado del convertidor.

$$V_{cell1} * DT - V_{cell2} * T * (1 - D) = 0 \quad (3)$$

$$V_{cell1} * D - V_{cell2} + V_{cell2} * D = 0 \quad (4)$$

Como se puede apreciar la ecuación 5 corresponde a la función de transferencia de un convertidor buck-boost.

$$\frac{V_{cell2}}{V_{cell1}} = \frac{D}{1 - D} \quad (5)$$

## 2.5 CONTROL POR HISTÉRESIS

Esta estrategia de control se caracteriza porque su salida solo puede tomar dos valores, generalmente uno alto y otro bajo, semejante al comportamiento de un interruptor (estado abierto, estado cerrado). Por su simplicidad es uno de los controladores más utilizados. Estos controladores poseen histéresis que define la salida alta o baja del controlador, esta histéresis está definida entre dos valores límite donde la diferencia entre el valor superior e inferior es conocida como banda de histéresis [4].

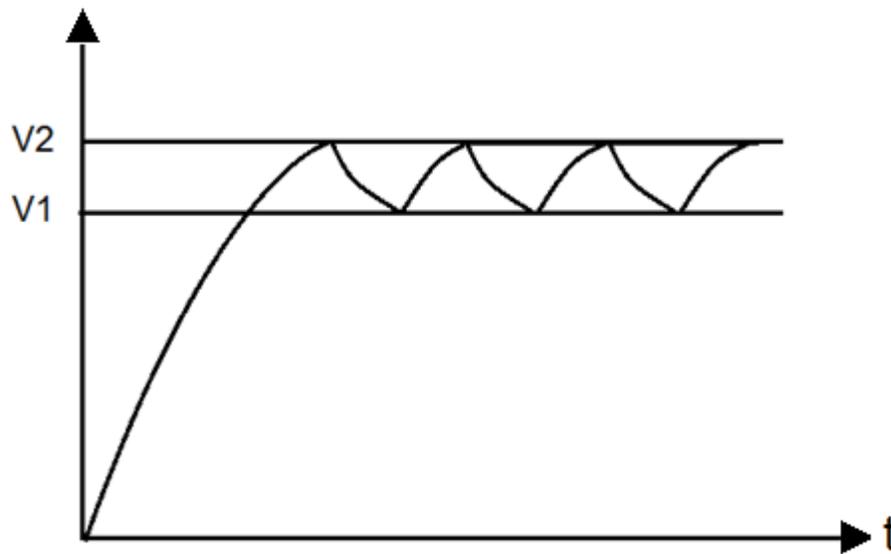


Figura 11 Control por histéresis.

Cuando la variable controlada aumenta y llega al límite superior, la salida de control se pone en alto, haciendo que la variable controlada disminuya hasta que llega al límite inferior donde la señal de control nuevamente cambia de estado, haciendo que la variable controlada aumente nuevamente, de esta manera se presenta una oscilación en la variable controlada que estará dentro de la banda de histéresis.

Esta estrategia de control se puede realizar de forma análoga o digital, uno de los circuitos más utilizados para la implementación del control por histéresis es el conocido *flip-flop*, para el funcionamiento de este circuito también es necesario usar dos comparadores cada uno de ellos con un valor de la banda de histéresis [4].

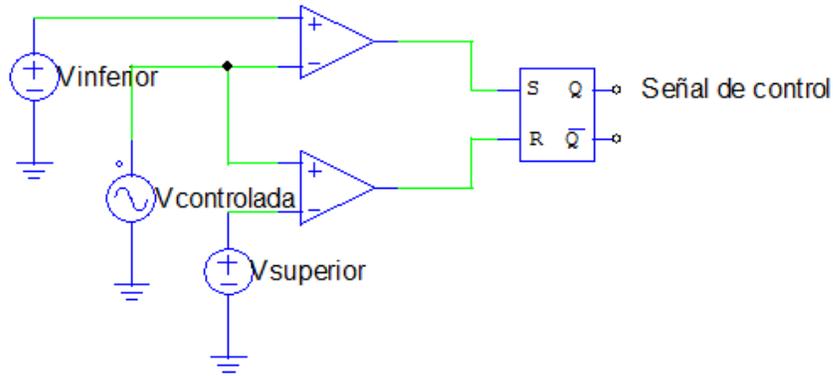


Figura 12 Control por histéresis implementado con un flip flop.

-Cuando la variable controlada es mayor al valor superior, el *flip-flop* recibe una señal en alto en el pin de reset, haciendo que la señal de control este en cero.

-Cuando la variable controlada es menor al valor inferior el *flip-flop* recibe una señal en alto en el set haciendo que la señal de control este en alto, de esta manera se genera la señal de control con una banda de histéresis.

Otra forma de generar el control por histéresis es mediante el uso de microcontroladores, en donde la señal de control es generada por medio de la comparación usando software



Figura 13 Control implementado con un microcontrolador.

En este caso se hace uso del conversor análogo-digital del microcontrolador para poder manipular la variable controlada dentro del programa. Al tener la variable controlada digital, se pueden establecer los dos valores de comparación que definen la banda de histéresis y finalmente generar la señal que varía de alto a bajo en una de las salidas digitales del microcontrolador.

### 3 OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo planteado al inicio del proyecto era:

Diseñar e implementar un circuito que permita el funcionamiento de un conjunto de 4 baterías de ion-litio conectadas en serie dentro de los rangos de operación de voltaje y temperatura para obtener un voltaje nominal de salida de 12V.

Para cumplir con este objetivo es necesario cumplir los siguientes objetivos específicos.

- Realizar la caracterización de las baterías para obtener sus parámetros.
- Balancear el voltaje de las celdas.
- Estimar el estado de carga de cada una de las baterías.
- Diseñar el sistema de protección de cada una de las celdas para condiciones de carga y descarga, asegurando que trabajen en los rangos adecuados de corriente y voltaje.
- Implementar un algoritmo para el accionamiento de las señales de control del BMS.

## 4 DESARROLLO

### 4.1 DIAGRAMA EN BLOQUES

El diagrama en bloques de la figura 12 muestra los bloques que se desarrollarán en este proyecto y como estos bloques se relacionan entre sí.

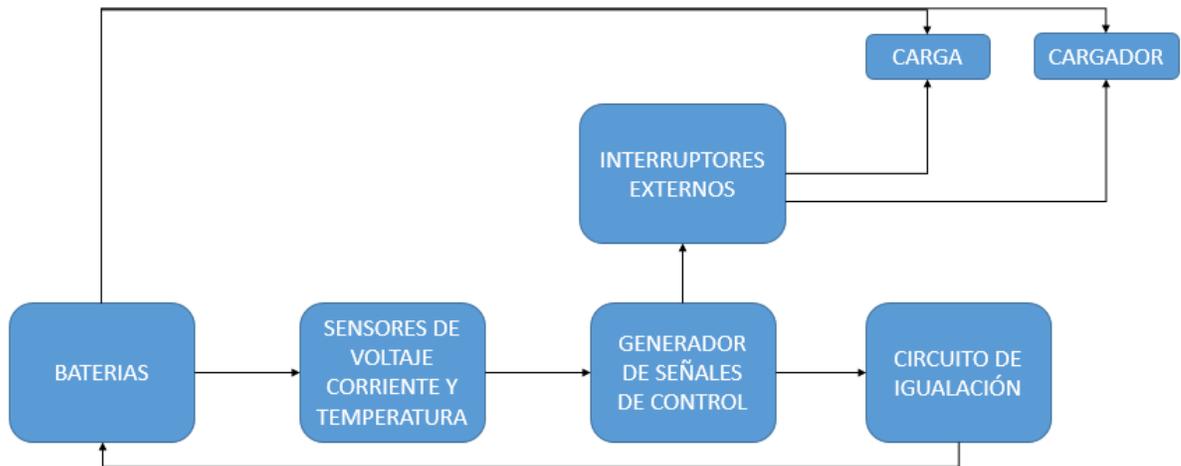


Figura 14 Diagrama en bloques del sistema.

- El bloque de las baterías está compuesto por cuatro celdas de ion litio conectadas en serie.
- El bloque de sensores está compuesto por cuatro sensores de voltaje que tomarán los datos del voltaje sobre cada una de las celdas, a su vez tendrá cuatro sensores de temperatura que se encargarán de medir la temperatura sobre cada batería y finalmente el sensor de corriente que medirá la corriente que le entrega el cargador al conjunto de baterías.
- El bloque generador de señales de control se encargará de producir las señales de control para el circuito de igualación, también estará encargado de las señales de control que conectan o desconectan los interruptores externos dependiendo de las condiciones de voltaje y temperatura.
- El bloque de circuito de igualación es el encargado de realizar la ecualización de voltaje del conjunto de baterías.
- El bloque de interruptores externos es el encargado de conectar la carga o el cargador a las baterías dependiendo de su estado, también genera una desconexión del conjunto de baterías cuando la temperatura excede el valor adecuado.

### 4.2 CIRCUITO DE IGUALACIÓN

El esquemático mostrado en la figura 13 corresponde a un circuito de igualación de voltaje activo, ya que la energía que se extrae de la celda con mayor voltaje no se pierde, si no que se transfiere en mayor parte a la celda con menor voltaje. Cada una de las baterías del circuito puede cargar o ser cargada, esta situación da como resultado 12 casos de igualación. Este circuito solo hace uso de un elemento inductivo para realizar la transferencia de energía de la celda con mayor voltaje a la celda con menor voltaje por medio del uso de señales de control [5].

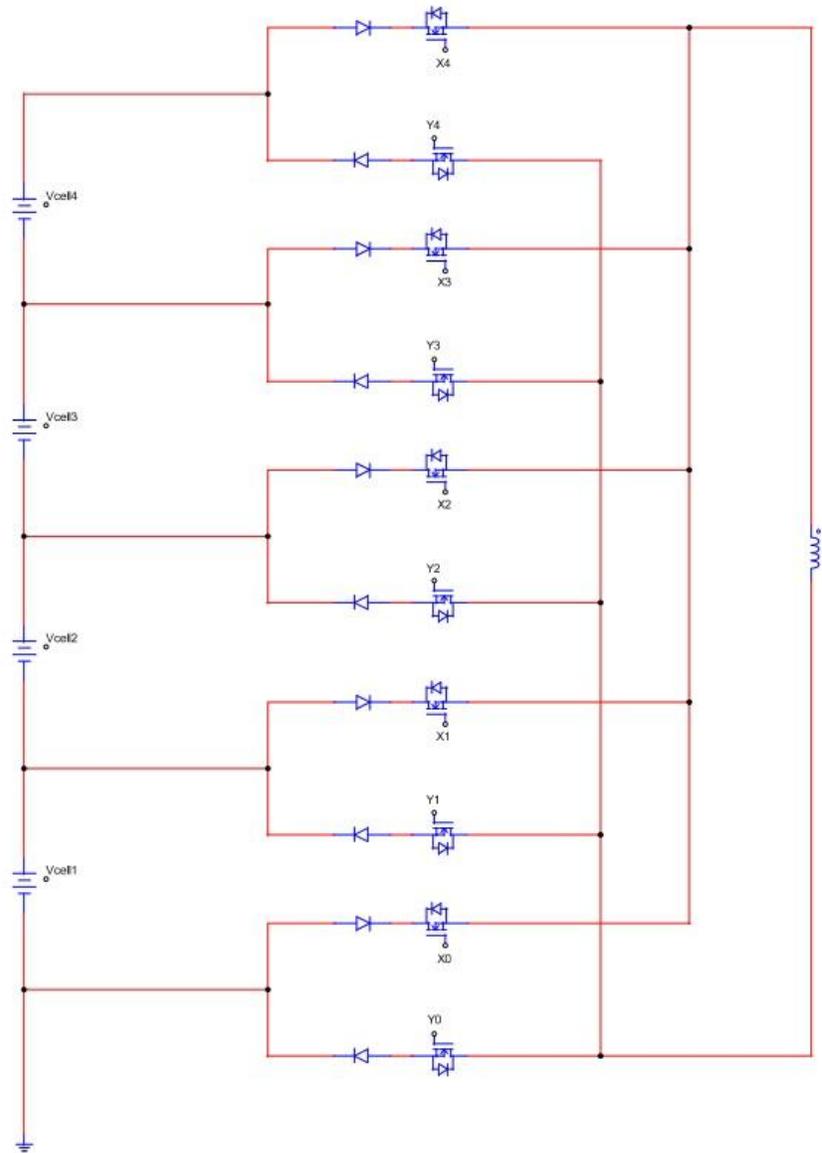


Figura 15 Circuito de igualación. Tomada de [5]

Dentro de los 12 casos de igualación se tienen dos grupos diferentes, el primero cuando las celdas son adyacentes y el segundo cuando las celdas no son adyacentes.

Se analizará el caso en donde las dos celdas son adyacentes para entender el funcionamiento del convertidor y las señales de control que se deben activar. Como ejemplo se toma la celda 1 con mayor voltaje a la celda 2 ( $V_{cell1} > V_{cell2}$ ). La celda uno debe conectarse a la inductancia en el tiempo de encendido ( $T_{on}$ ) para poder entregar la corriente por su terminal positivo, así que el interruptor  $X1$  deberá cerrarse para permitir la circulación de corriente, el terminal negativo debe conectarse al otro terminal de la inductancia, por lo tanto la señal de control que se debe activar es  $Y0$ . En el tiempo de apagado ( $T_{off}$ ) se debe descargar la inductancia por el terminal positivo de la celda 2, por esta razón la señal que se debe activar es  $Y2$  y para cerrar el circuito se mantiene activado  $X1$ , para permitir la circulación de corriente. De este análisis se puede notar que cuando las celdas son adyacentes solo se necesitan generar tres señales de control en donde una de ellas siempre estará encendida, en este caso  $X1$ . El circuito correspondiente a este caso se muestra en la figura 14.

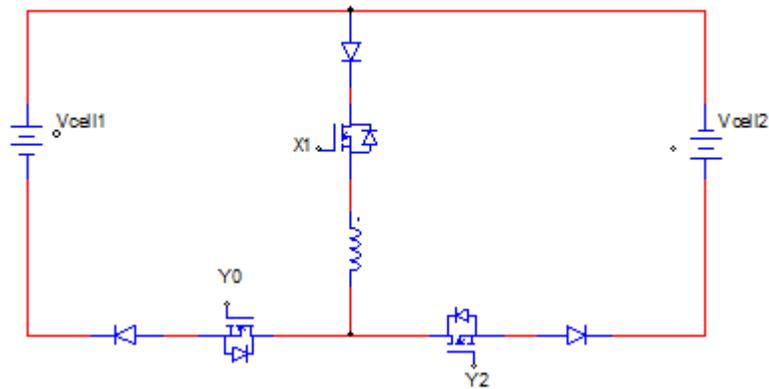


Figura 16 Circuito equivalente de igualación para dos celdas adyacentes.

Ahora se analizará el caso en que las dos celdas no son adyacentes para observar la diferencia en la generación de las señales de control que se deben producir. Como ejemplo se toma la celda 1 con mayor voltaje y la celda 3 con el menor voltaje ( $V_{cell1} > V_{cell3}$ ). Como en el ejemplo anterior, se debe generar la conexión de la celda 1 a la inductancia para cargarla, para realizar esta acción se deben activar las señales X1 y Y0 en el tiempo  $T_{on}$ . Para el tiempo  $T_{off}$  se debe realizar la conexión de la inductancia a la celda 3 para realizar la transferencia de energía, para esto se deben activar las señales Y3 y X2 dando como resultado el circuito de la figura 15.

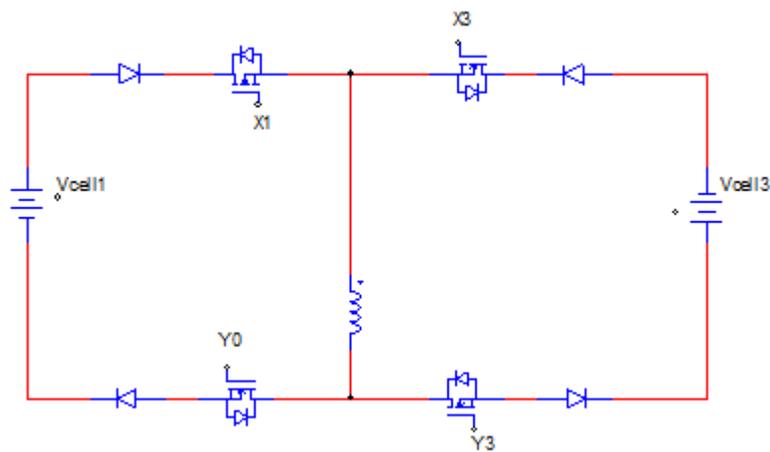


Figura 17 Circuito equivalente de igualación para celdas no adyacentes

Las señales de control serán generadas con un ciclo útil constante, debido a que en el proceso de transferencia de energía el voltaje de la fuente y la carga tendrán un crecimiento y decrecimiento lento, haciendo que la corriente sobre la inductancia permanezca en un valor constante.

#### 4.3 SIMULACIÓN DE UN CASO DE IGUALACIÓN

Se realiza la simulación de un caso de igualación partiendo de los cálculos de la inductancia del anexo 8.2, al igual que las pérdidas de cada componente mostradas en el anexo 8.6. Para que en la simulación se pueda lograr ver una igualación y hacer más rápido el cálculo, se hace uso de condensadores que emulan el comportamiento de las baterías. El esquemático simulado se muestra en la figura 16.

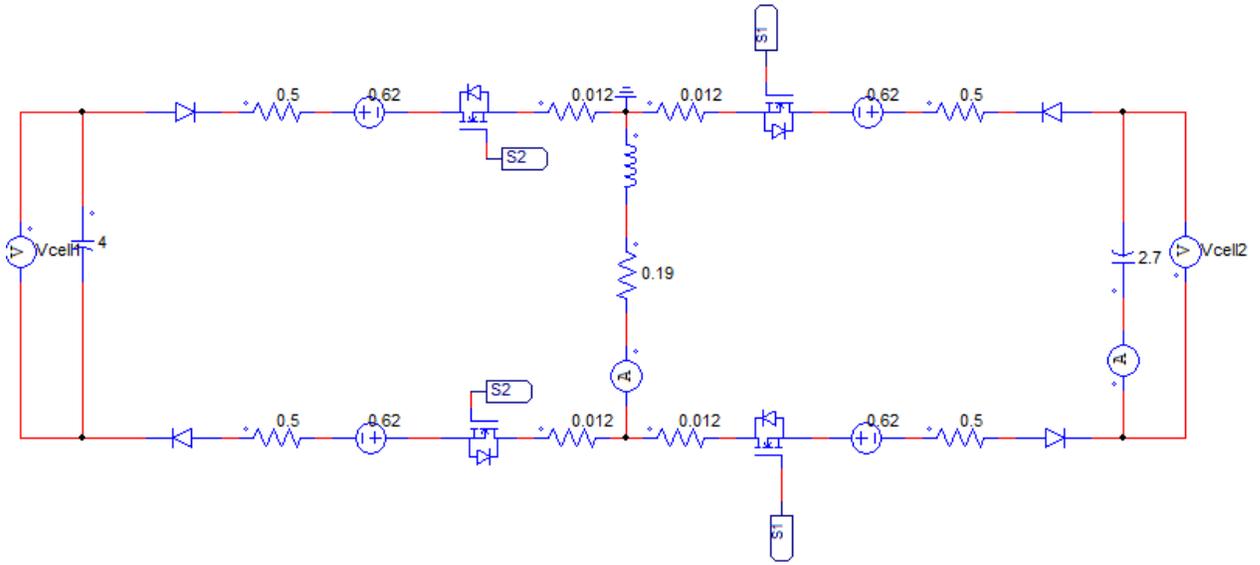


Figura 18 Esquemático de simulación con pérdidas.

El resultado al conectar los condensadores al circuito de igualación se muestra en la figura 17.

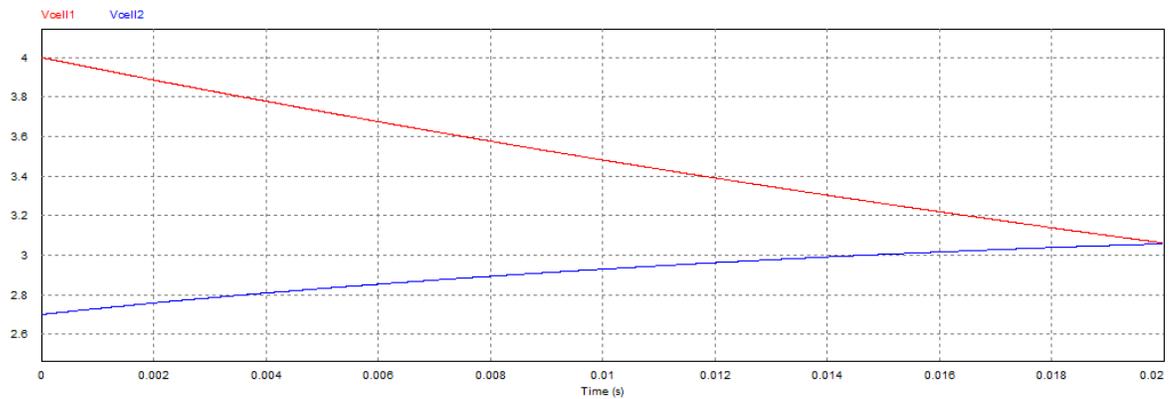


Figura 19 Resultado de la igualación.

Se puede notar que a medida que va transcurriendo el tiempo, el condensador que representa a la celda 1 va transfiriendo su energía al condensador con menor voltaje por medio de la corriente de la inductancia mostrada en la figura 18 explicada en el anexo 8.2, hasta lograr una igualación en sus voltajes.

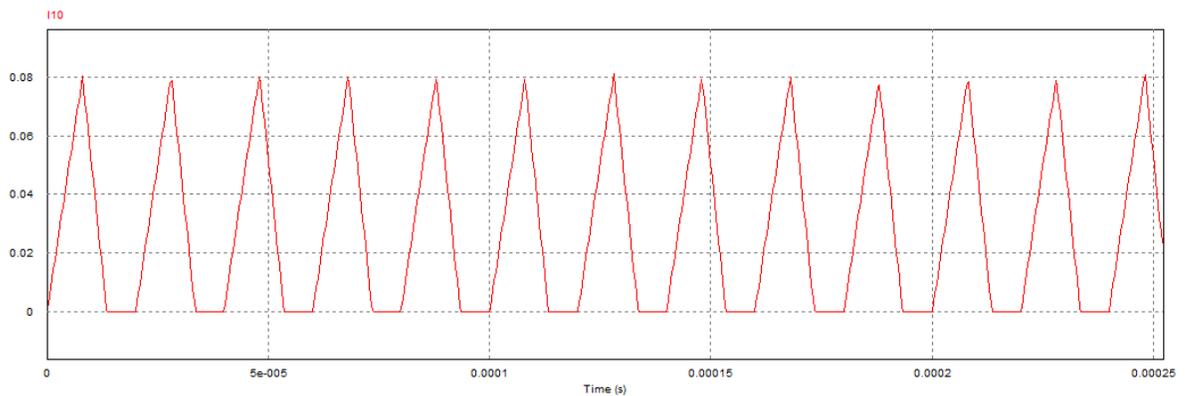


Figura 20 Corriente simulada de la inductancia.

#### 4.4 SENSORES DE VOLTAJE

Para la generación de las señales de control es necesario hacer una medición de los voltajes de cada una de las celdas, para así poder escoger el caso de igualación que se llevará a cabo. Se debe realizar un acondicionamiento de las señales ya que el voltaje de cada una de las celdas será conectado al conversor análogo digital del microcontrolador PIC24FJ64GA002, éste puede tener un voltaje máximo en las entradas análogas de 3.6V. En este caso se alimentará el microcontrolador con un voltaje de 3.3V, el cual será la referencia del conversor análogo digital.

El voltaje de las baterías asumiendo que todas están cargadas con un voltaje de 4,2V es mostrado en la figura 19.

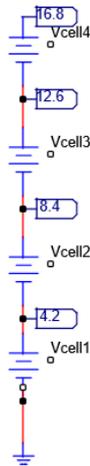


Figura 21 Voltajes de las celdas.

Se puede observar que los voltajes de cada batería superan el valor máximo permitido en las entradas análogas del microcontrolador, debido a esto se hace necesario hacer una atenuación del voltaje medido de las celdas por medio de un amplificador operacional, éste se configurará en modo diferencial para así obtener un mayor rechazo modo común y al mismo tiempo obtener el voltaje de cada una de las celdas. El amplificador será configurado como se muestra en la figura 20 partiendo de los cálculos de la sección 8.8.

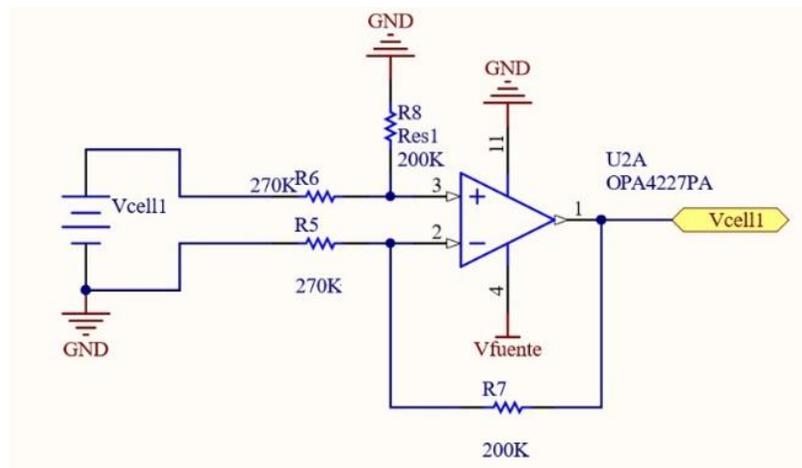


Figura 22 Circuito de sensado de voltaje.

#### 4.5 GENERACION DE SEÑALES DE CONTROL PARA CIRCUITO DE IGUALACION

A partir del análisis del circuito de igualación realizado en la sección 4.2 se realiza la siguiente tabla de activación de los interruptores que se usará para generar las señales de control dependiendo del caso de igualación que se quiera llevar a cabo.

	Vcell1>Vcell2	Vcell1>Vcell3	Vcell1>Vcell4
Ton	X1-Y0	X1-Y0	X1-Y0
Toff	X1-Y2	X2-Y3	X3-Y4
	Vcell2>Vcell1	Vcell2>Vcell3	Vcell2>Vcell4
Ton	X2-Y1	X2-Y1	X2-Y1
Toff	X0-Y1	X2-Y3	X3-Y4
	Vcell3>Vcell1	Vcell3>Vcell2	Vcell3>Vcell4
Ton	X3-Y2	X3-Y2	X3-Y2
Toff	X0-Y1	X1-Y2	X3-Y4
	Vcell4>Vcell1	Vcell4>Vcell2	Vcell4>Vcell3
Ton	X3-Y2	X3-Y2	X3-Y2
Toff	X3-Y4	X1-Y2	X2-Y3

Tabla 1 Señales de control

Se puede observar que para realizar el circuito de igualación de 4 baterías conectadas en serie, es necesario la generación de 10 señales de control. Estas serán generadas usando las salidas digitales de un microcontrolador por medio de retardos especificados en el programa; debido a los bajos tiempos de estado en alto y bajo requeridos para las señales de control (del orden de microsegundos) y a la cantidad de señales de control que se deben generar, se hace necesario el uso de un microcontrolador que permita controlar las 10 salidas en una misma instrucción (debe ser mayor a 8 bits). El PIC24FJ64GA002 posee 16 bits de salida que satisfacen la generación de las señales de control para el circuito de igualación como se muestra en la figura 21.

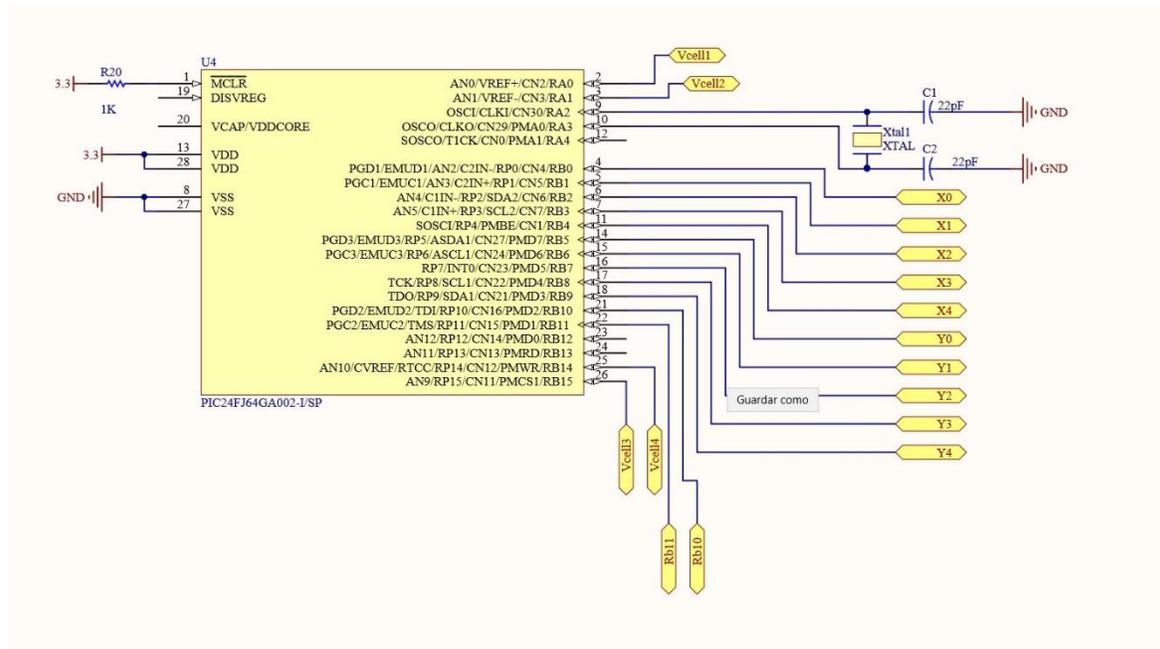


Figura 23 Esquemática microcontrolador PIC24FJ64GA002.

Se hará uso del puerto *b* de salida del microcontrolador asignando las salidas digitales como se muestra en la tabla 2.

NOMBRE DE LA SEÑAL DE CONTROL	PUERTO DEL PIC
X0	Rb0
X1	Rb1
X2	Rb2
X3	Rb3
X4	Rb4
Y0	Rb5
Y1	Rb6
Y2	Rb7
Y3	Rb8
Y4	Rb9

Tabla 2 Correspondencia señales de control con salidas del microcontrolador.

Habiendo establecido los puertos de salida de las señales de control en el microcontrolador PIC, se procede a realizar la configuración de señales de control por medio de retardos. Cuando se tiene la medida de voltaje de cada una de las celdas se identifica cuál es la de mayor voltaje y la de menor voltaje, luego de esto se comprueba la diferencia entre estas dos celdas, si la diferencia entre las dos celdas es mayor a 50 mV se activarán las señales de control correspondientes a este caso y se realizará el proceso de igualación hasta alcanzar una diferencia de 20mV. Al finalizar la igualación se comenzará el proceso nuevamente. Esta lógica es implementada en el algoritmo del microcontrolador.

La lógica utilizada representa una acción de control por histéresis explicada en la sección 2.5. En donde la variable controlada será la diferencia y tendrá una banda de histéresis marcada por dos valores límite, uno superior 50mV y uno inferior 20mV como se muestra en la figura 22.

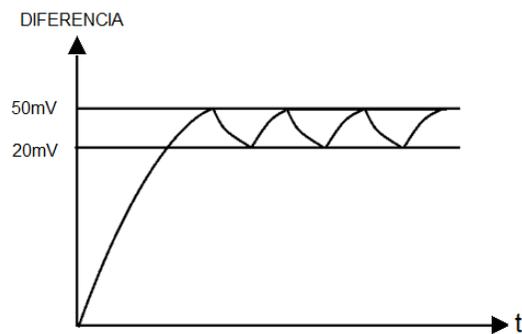


Figura 24 Histéresis de diferencia.

#### 4.6 DRIVER DE CORRIENTE DE GATE

Para el encendido de los mosfets es necesario usar drivers que proporcionen la corriente necesaria, el microcontrolador no es capaz de suministrar esta corriente. Para lograr el encendido de un Mosfet se tiene que establecer una diferencia de potencial positiva entre el gate y el source ( $V_{gs}$ ). Si se analiza el circuito de igualación, se puede observar que los source de los mosfets X están unidos, al contrario los source de los mosfets Y no lo están, de igual forma se puede notar que los source de los mosfets no están referidos a tierra. Para lograr encender los interruptores el voltaje en gate debe ser positivo con respecto el source de

los mosfets, sin embargo los source son flotantes, creando la necesidad de una referencia diferente a la tierra del circuito.

Una solución para este problema es la implementación de drivers de corriente aislados, se consideran aislados ya que tienen dos referencias independientes, esto permite conectar la salida del microcontrolador al driver con la tierra del circuito y generar la señal cuadrada para el interruptor tomando como referencia el source de cada mosfet,

Debido a que son drivers aislados necesitan una alimentación para la segunda referencia de la cual se extraerá la corriente de encendido del gate. Para este objetivo se usará una fuente aislada explicada en la sección 4.7.

#### 4.7 FUENTES AISLADAS

Para el funcionamiento de los drivers de corriente es necesario realizar una alimentación aislada de la tierra del circuito. Para lograr esta alimentación se hace uso de una fuente aislada de referencia ROE-0515S. Esta fuente tiene como voltaje de salida 15V, que corresponde al voltaje necesario para activar el driver. Como se mostró en la sección 4.2, los mosfets X tienen el source común, esto significa que pueden generarse los voltajes de gate referidos a una misma tierra, que en este caso serán los 5 source de los interruptores, por esta razón solo se necesita una fuente aislada, por lo contrario, los interruptores Y tienen el source flotante, por tal motivo cada HCPL3120 demanda una fuente aislada independiente para su funcionamiento,

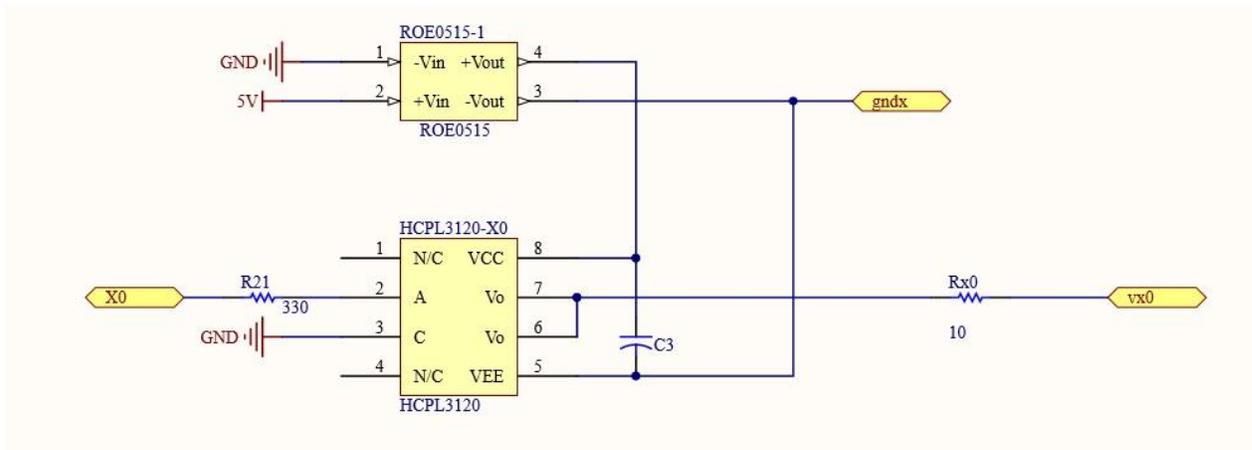


Figura 25 Esquemático fuentes aisladas y drivers de corriente.

#### 4.8 SENSORES DE TEMPERATURA

Los sensores de temperatura son usados para monitorizar la variación de temperatura de cada una de las celdas. Para lograr este objetivo se usa un sensor de temperatura LM35 que se colocará en el punto más caliente de cada una de las baterías. Este sensor genera una salida en voltaje proporcional a la temperatura que se está midiendo, con una resolución de 10mV/°C.



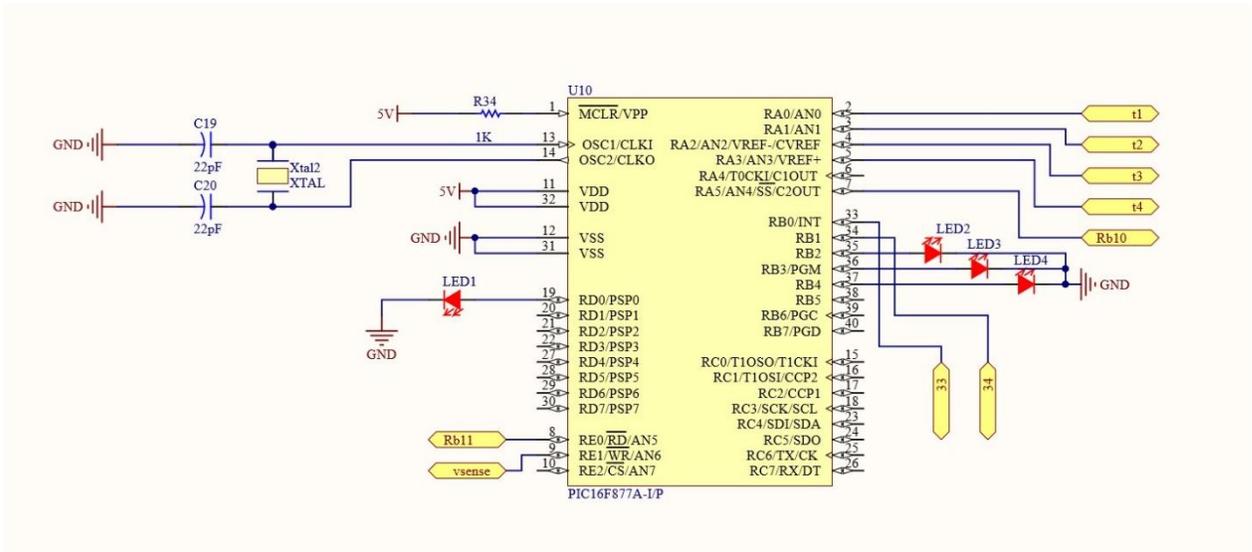


Figura 28 Esquemático microcontrolador PIC16F877A.

Estos interruptores se proponen como medida de seguridad, para garantizar que las baterías operen dentro del rango de operación de voltaje y temperatura, de esta manera cuando las baterías se encuentran cargadas se conecta la carga y cuando se descargan totalmente se conecta el cargador. De igual forma cuando la temperatura aumenta del valor máximo, se interrumpe la actividad que se está llevando a cabo (carga o descarga) y espera a que la temperatura regrese nuevamente a un valor seguro creando así un valor de histéresis,

Se tienen dos interruptores, uno para la carga y el cargador respectivamente. Las señales de estos interruptores provendrán del microcontrolador, por esta razón se hace necesario el uso de drivers aislados y como se explicó en la 4.6, cada uno de estos interruptores tiene el source flotante por lo que se necesitan dos fuentes aisladas para alimentarlos.

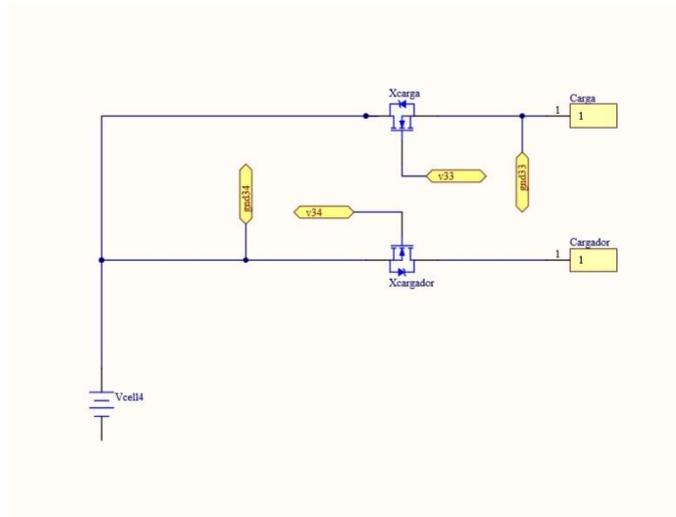


Figura 29 Interruptores externos.

El funcionamiento de los interruptores externos mostrados en la figura 27 se basa en la activación de las señales de control que conectan la carga o el cargador dependiendo del voltaje de cada celda. Cuando se detecta que el voltaje en una celda es alto se realiza la conexión de la carga, iniciando así la descarga de las baterías. Cuando se detecta un voltaje muy bajo (cerca del límite de operación mínimo), se realiza la conexión al cargador y se desconecta la carga.

En cualquier instante de los dos procesos se puede generar una desconexión de la carga o el cargador por un aumento en la temperatura de la celda. Cuando cualquier celda supera los 40°C se genera una apertura de los dos interruptores que conectan la carga y el cargador, en el instante en que la temperatura regrese a un valor de 35°C se vuelve a hacer la conexión del proceso que se estaba llevando a cabo (carga o descarga).

Se presenta un control por histéresis como se ve en la figura 28, esta vez en la temperatura en donde se establece una banda de histéresis con límite superior 40°C y límite inferior de 35°C.

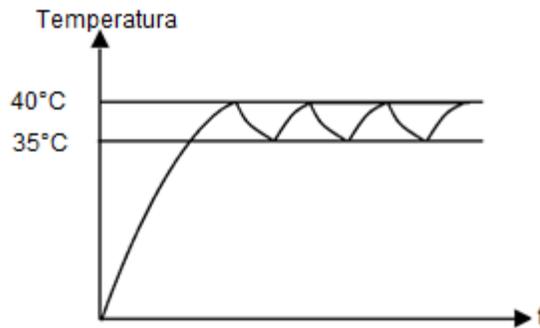


Figura 30 Histéresis de temperatura.

#### 4.11 LEDS INDICADORES

Es importante para estos sistemas visualizar su correcto funcionamiento, para ello es necesario el uso de leds indicadores que muestren la siguiente información.

- LED verde: indica que las baterías están en proceso de descarga, por tal razón el interruptor de conexión a la carga estará cerrado.
- LED amarillo: indica que las baterías están en proceso de carga, por tal razón el interruptor de conexión al cargador estará cerrado.
- LED rojo 1: Indica que se ha dado una desconexión del proceso que se estaba llevando a cabo (carga o descarga) por condiciones de temperatura.
- LED rojo 2: Indica que la corriente suministrada por el cargador excede la corriente máxima de carga.

En su modo de funcionamiento inicial las baterías estarán conectadas a la carga.

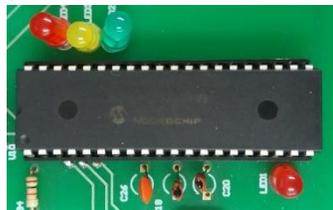


Figura 31 Leds indicadores.

## 5 PROTOCOLO DE PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Para comprobar el funcionamiento del sistema diseñado se realizaron diferentes pruebas en cada etapa del circuito. En primer lugar se verificó el lugar en donde se deben ubicar los sensores de temperatura, luego se comprobaron los sensores de voltaje y la generación de señales de control para el circuito de igualación, partiendo de esto se comprobaron cada uno de los casos de igualación. El sistema fue probado con la igualación de dos baterías para finalmente comprobar el funcionamiento del circuito bajo condiciones de carga y descarga.

### 5.1 CARACTERIZACION DE BATERIAS EN PROCESO DE CARGA

Para la realización de esta prueba se usó una fuente del laboratorio como cargador, se configuró la limitación de corriente para no dañar las baterías y se tomaron datos durante intervalos de tiempo determinados (5 minutos). Teniendo el voltaje de cada celda y la corriente entregada por la fuente la fuente se halló la potencia y energía en cada intervalo de tiempo, para luego hacer la suma de todos los intervalos encontrando los Wh de cada una de las celdas, el resultado de esta prueba se muestra en la figura 30.

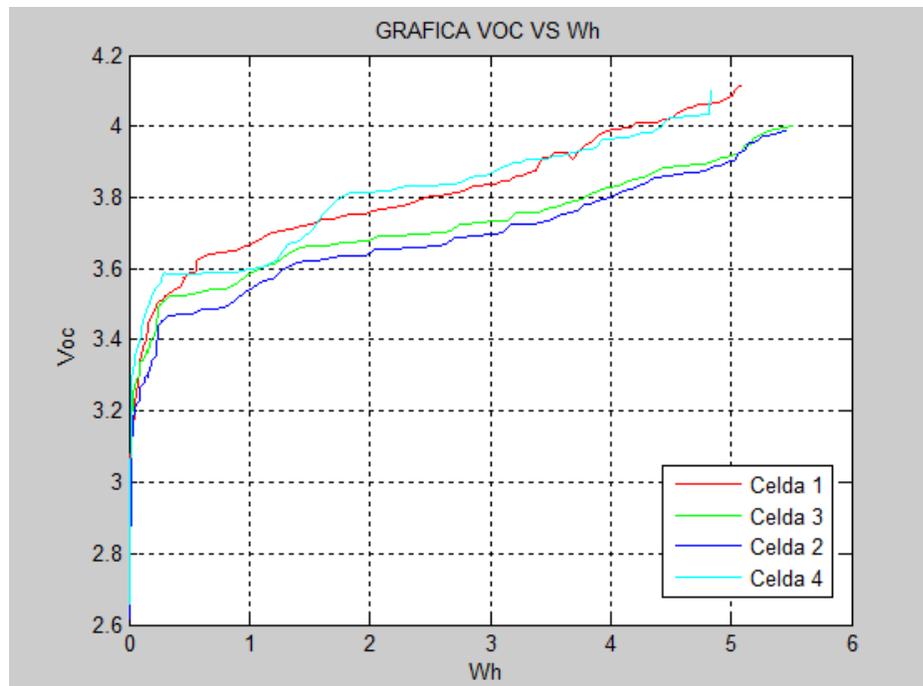


Figura 32 Grafica de Voc vs Wh para carga.

Luego de realizar la tabulación de estos datos, se procedió a hallar el voltaje Voc partiendo del circuito mostrado en la figura 31 restandole a la medición la caída de voltaje que se presenta en la impedancia interna de cada batería mostrada en el anexo 8.1.

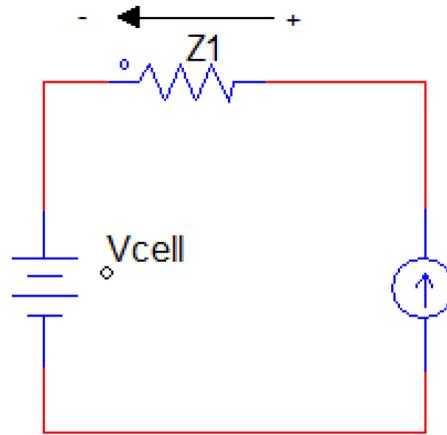


Figura 33 Circuito equivalente con impedancia de la batería.

El comportamiento durante la carga de cada una de las celdas es diferente a pesar de que son de la misma referencia, por esta razón se hace necesario el uso de circuitos igualadores que compensen esta diferencia para que al conectar las celdas en serie se mantengan dentro del rango de operación.

## 5.2 CARACTERIZACION DE BATERIAS EN PROCESO DE DESCARGA

En este caso se realizó la descarga de las baterías mediante una resistencia constante, al igual que en la sección 5.1 se realizó la medición de los voltajes de voltaje de cada celda en intervalos de tiempo de 5 minutos, se encontró la potencia como  $P = \frac{V^2}{R}$ , al multiplicar la potencia por el intervalo de medición obtenemos la energía para cada instante de tiempo, luego se hace la suma acumulativa de estos valores para así encontrar el valor de Wh de cada celda.

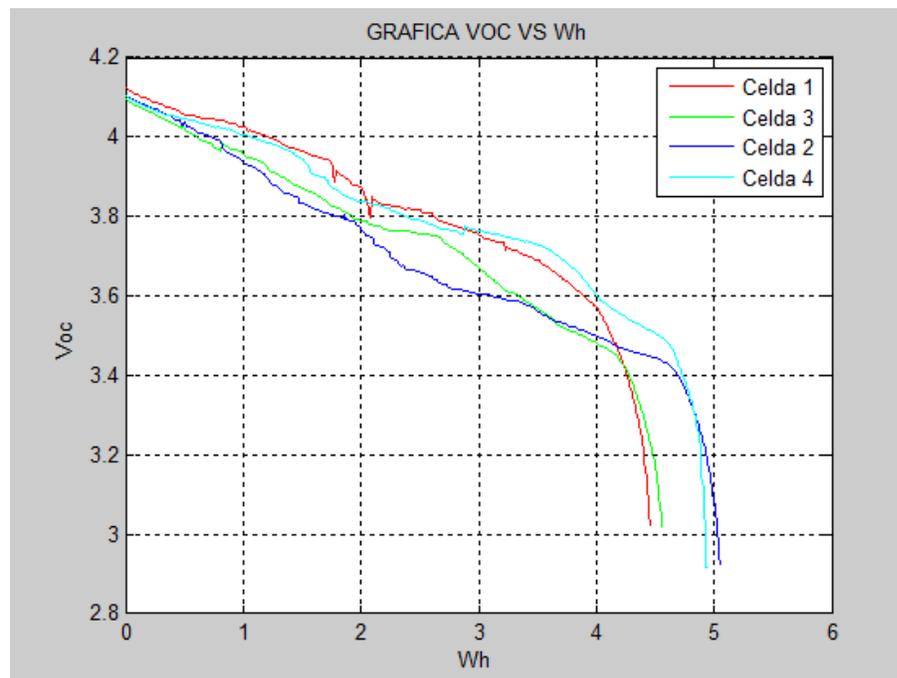


Figura 34 Grafica de Voc vs Wh para descarga.

En este caso se encontró el valor del Voc partiendo del circuito equivalente de la figura 33 sumando a las medidas de voltaje la caída sobre la impedancia de cada una de las celdas mostradas en el anexo 8.1.

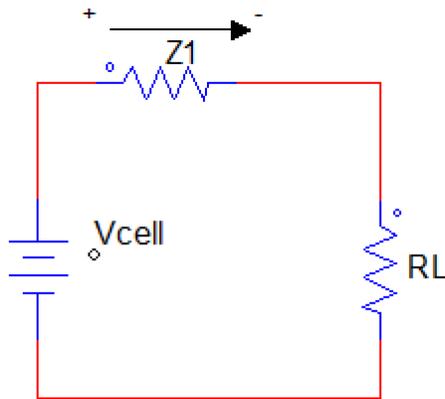


Figura 35 Circuito equivalente con impedancia de la batería.

Al igual que en la prueba 5.1 las baterías presentan un comportamiento de descarga diferente, uno de los parámetros que hace que este comportamiento sea diferente es el de la impedancia de cada una de las celdas encontrado en la sección 8.1, haciendo que unas celdas se descarguen más rápido que otras. Esta característica aumenta el riesgo de sobre descargar alguna de las celdas conectadas en serie y sacarla del rango de operación, situación que puede ser corregida por los circuito de igualación.

### 5.3 ESTADO DE CARGA E HISTERESIS

A partir de las pruebas 5.1 y 5.2 se realizó la estimación del estado de carga haciendo uso de la ecuación 7.

$$SOC(t) = \left(1 - \frac{Q(t)}{Qn}\right) * 100 \quad (7)$$

En donde  $Q(t)$  es la capacidad durante cada medición y  $Qn$  corresponde al valor final de capacidad. Los resultados se muestran en la figura 34.

De forma análoga se encontró el valor del estado de carga SOC para el proceso de carga haciendo uso de los datos de las pruebas 5.1 y la ecuación 1, mostrando sus resultados en la figura 35.

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Qn} * 100 \quad (8)$$

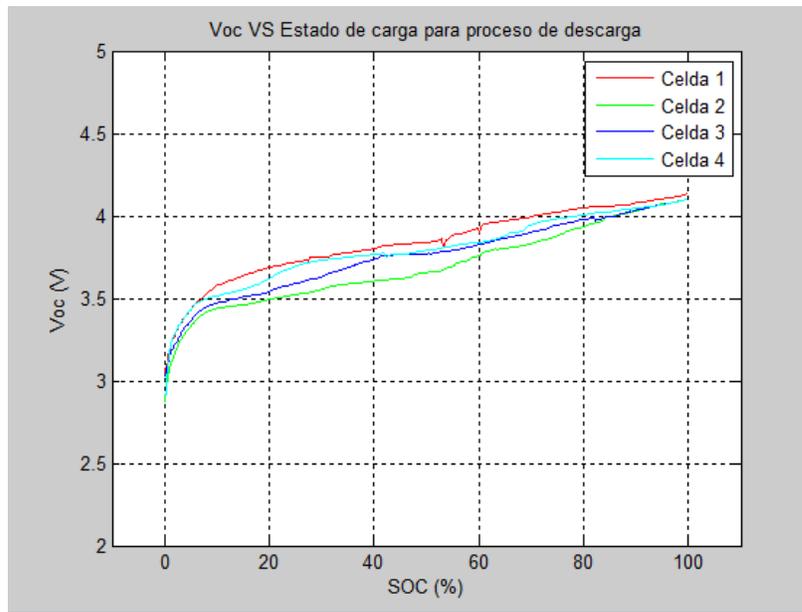


Figura 36 Grafica de Voc vs SOC para proceso de descarga.

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n} * 100$$

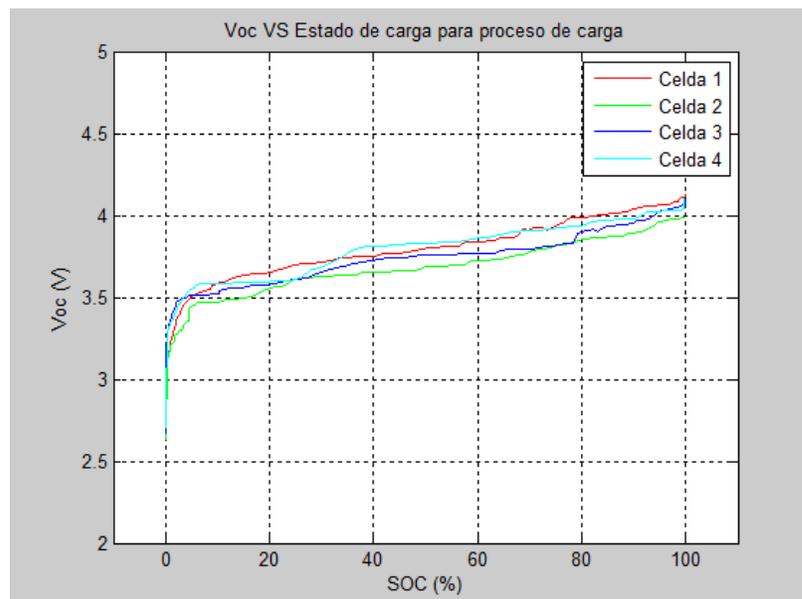


Figura 37 Grafica de Voc vs SOC para proceso de carga.

Se hace necesario conocer la histéresis de las baterías para poder estimar el valor de variación máxima de voltaje entre el proceso de carga y descarga, para así definir nuestro rango de igualación ya que este proceso debe realizarse tanto en carga como en descarga.

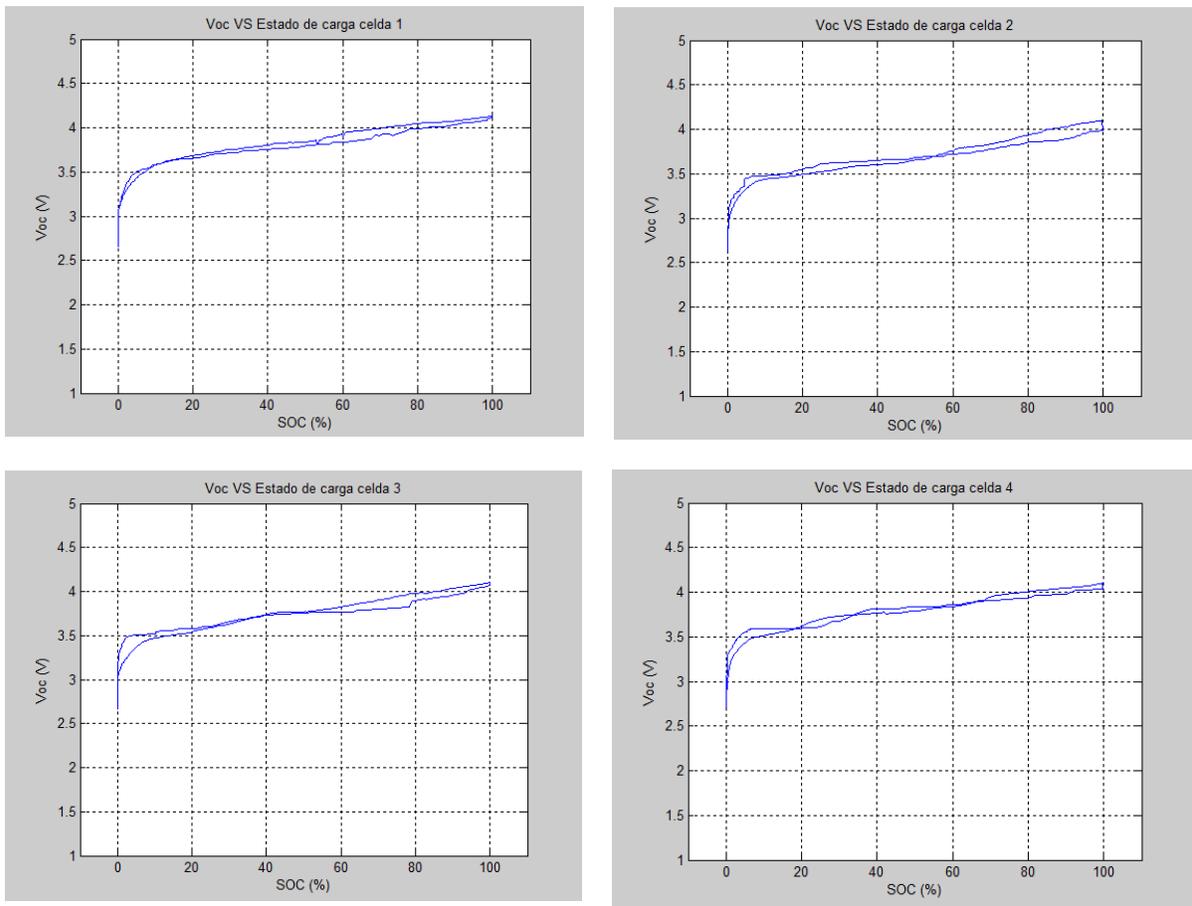
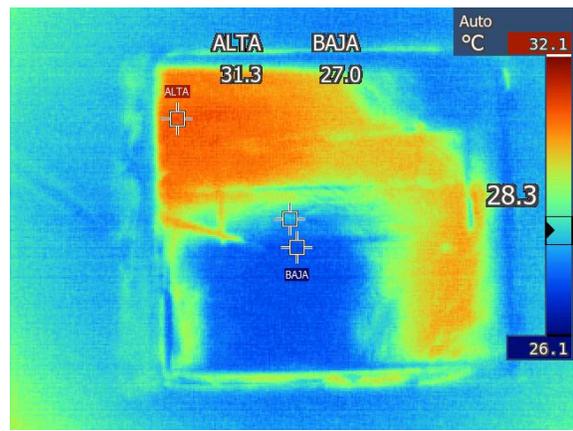
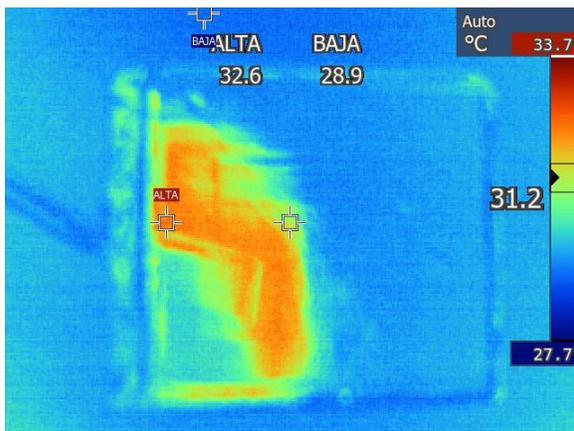


Figura 38 Grafica de histéresis para cada batería.

En la figura 36 se puede ver que el gap en la histéresis es mínimo, por esta razón se puede hacer una estimación del estado de carga por medio del voltaje a circuito abierto (Voc) ya que para cada valor de voltaje le corresponde un valor único de estado de carga.

#### 5.4 UBICACIÓN DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA

Para encontrar la ubicación de los sensores de temperatura se hicieron pruebas bajo condiciones de carga y con ayuda de una cámara térmica FLUKE TI25 se tomaron imágenes de los puntos más calientes de las baterías.



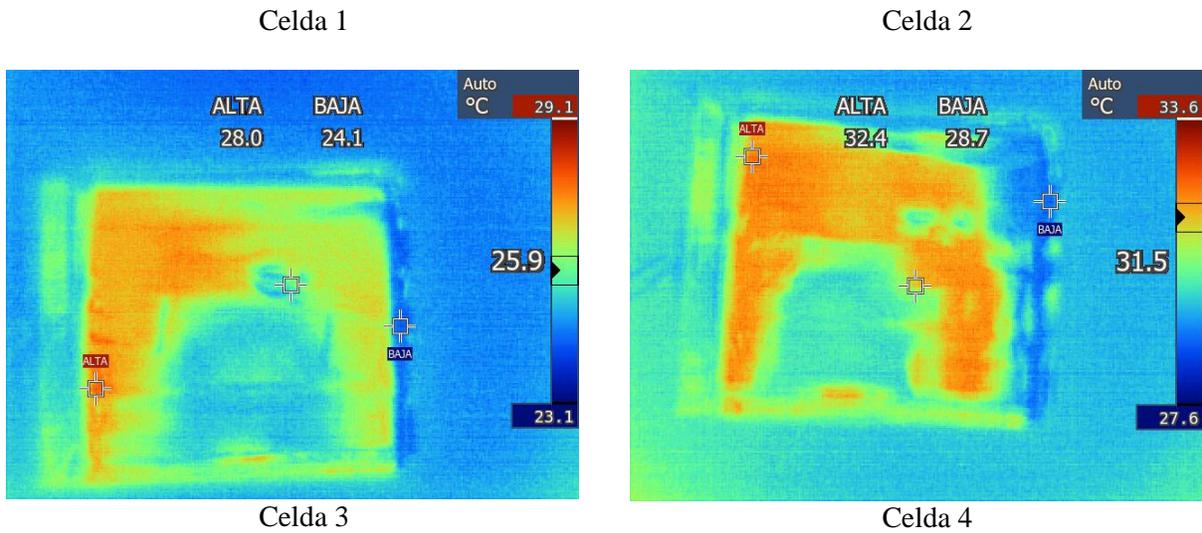


Figura 39 Temperatura de las celdas.

Según la figura 37 se encontró que el sensor de temperatura debe ubicarse lo más cercano posible a los terminales de entrada de corriente de las baterías. Como se puede ver en las figuras, este punto es el que presenta mayor calentamiento con relación al resto de la batería.

## 5.5 SENSORES DE VOLTAJE

Para comprobar el funcionamiento de los sensores de voltaje se conectó en la entrada un voltaje conocido y se midió la salida del amplificador para corroborar las ganancias.

- Sensor celda 1

$$G = \frac{2.9718}{4.0424} = 0.7351 \quad (9)$$

- Sensor celda 2

$$G = \frac{2.99045}{4.04196} = 0.7398 \quad (10)$$

- Sensor celda 3

$$G = \frac{2.97743}{4.04187} = 0.7366 \quad (11)$$

- Sensor celda 4

$$G = \frac{2.9682}{4.04191} = 0.7345 \quad (12)$$

Se puede observar que estas ganancias difieren de la ganancia calculada en el anexo 8.8, pero esta diferencia puede ser compensada en el programa del microcontrolador al momento de hacer la conversión analógica digital.

## 5.6 SEÑALES DE CONTROL PARA EL CIRCUITO DE IGUALACION

Como se vio en la sección 4.2 tenemos doce casos de igualación, divididos en dos grupos, cuando las celdas son adyacentes y cuando las celdas no son adyacentes. Para esta prueba se generaron las señales de control para cada uno de estos casos.

El primer caso probado fue en el que las dos celdas no son adyacentes, se deben generar 4 señales de control dos con ciclo útil del 40% y las otras dos con 60% mostrado en la sección 8.2, resultando en señales complementarias como se observa en la figura. En esta prueba se generó el caso  $V_{cell1} > V_{cell3}$ , así que las señales X1 y Y0 corresponden a los canales 2 y 3 respectivamente y las señales X2 y Y3 corresponden a los canales 1 y 4 de la figura 38.

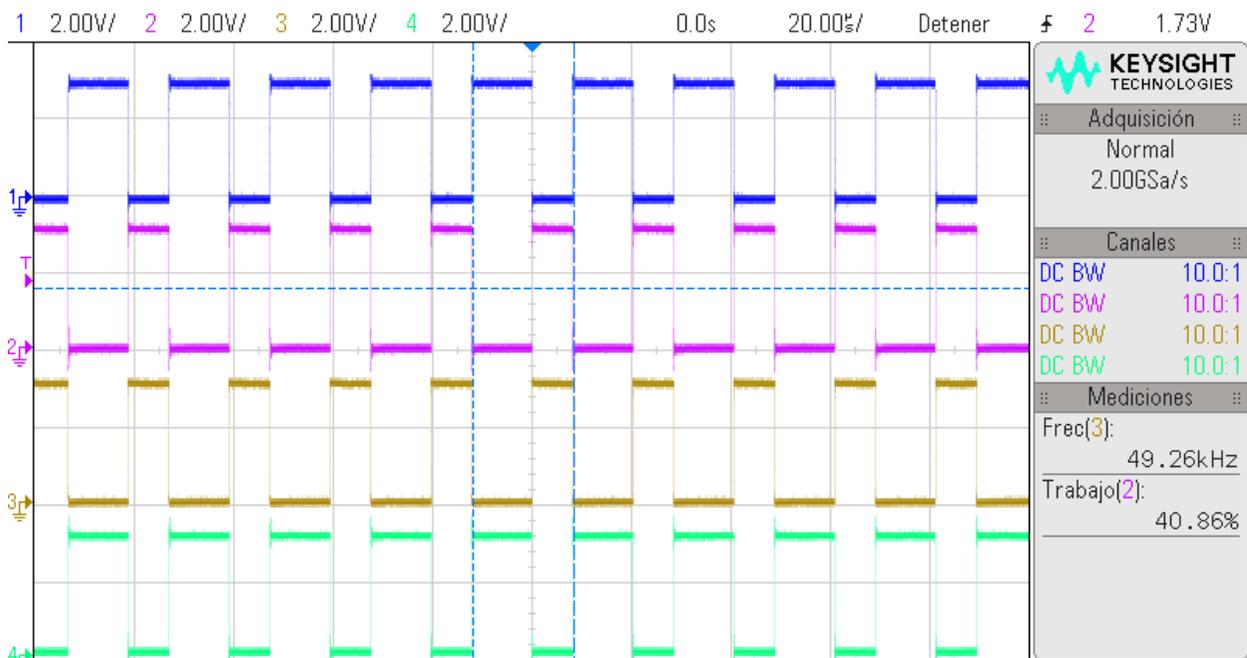


Figura 40 Señales de control para celdas no adyacentes.

El segundo caso bajo prueba es el de celdas adyacentes, en donde solo se generan tres señales de control y una permanece siempre activa como se explicó en la 4.2, el caso particular de esta prueba es  $V_{cell1} > V_{cell2}$ , así que la señal que está siempre activa en el canal 1 corresponde a X1, la señal en el canal 2 corresponde a Y0 y finalmente la señal en el canal 3 corresponde a Y2, en la figura 39.

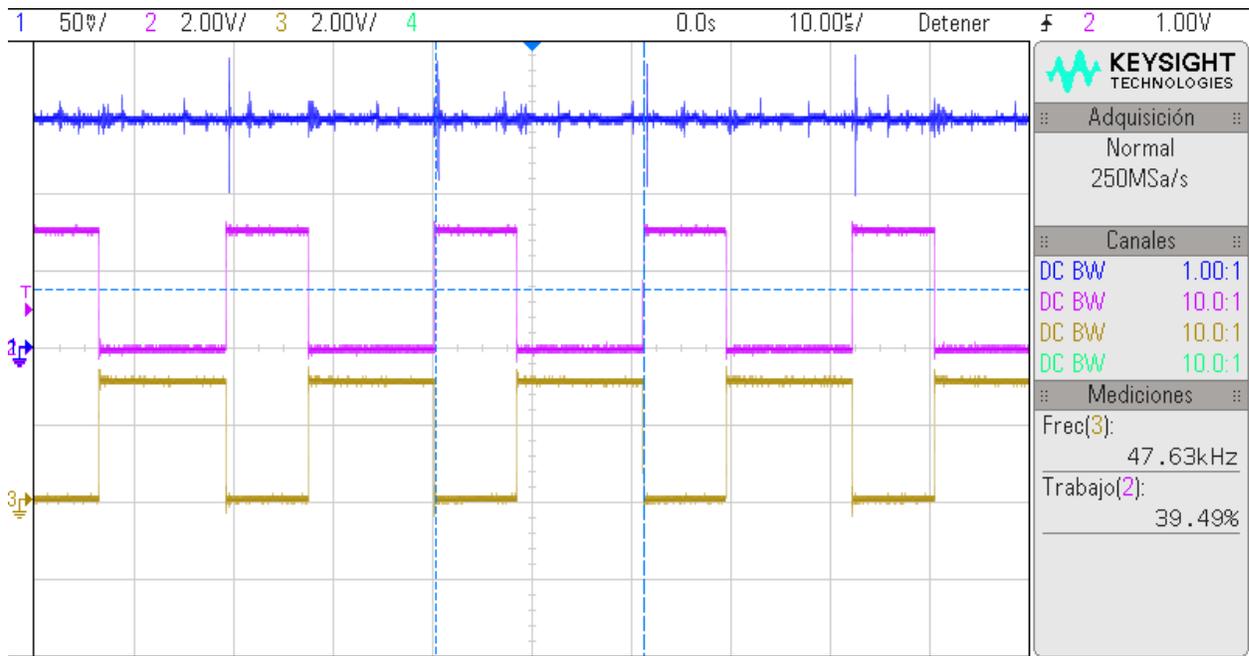


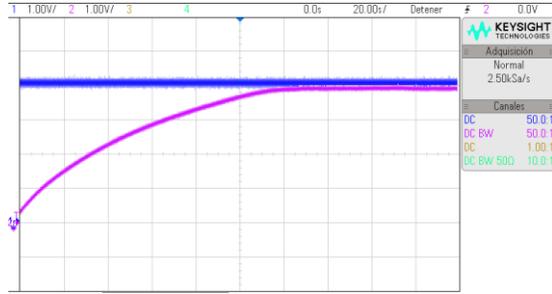
Figura 41 Señales de control para celdas adyacentes.

## 5.7 COMPROBACION DE CASOS DE IGUALACION

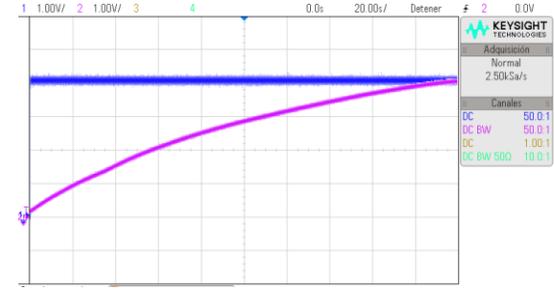
Teniendo la comprobación de las señales de control, se procedió a verificar cada uno de los casos de igualación. El comportamiento de las baterías es lento, así que para hacer las pruebas más ágiles se realizó la prueba usando la celda más cargada como una fuente y la celda menos cargada como un condensador y se observó el siguiente comportamiento para cada uno de los casos de igualación en la figura 40.

## Pruebas de igualación

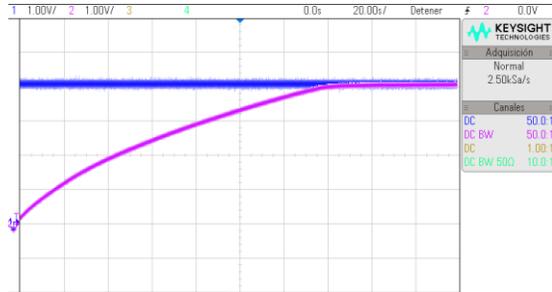
• Vcell1>Vcell2



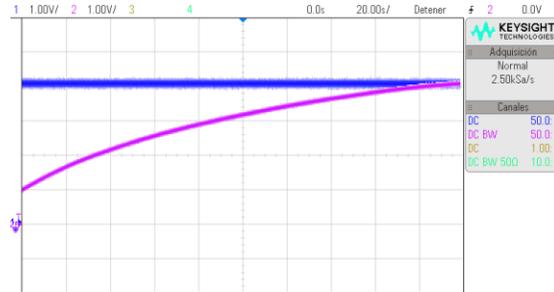
• Vcell1>Vcell3



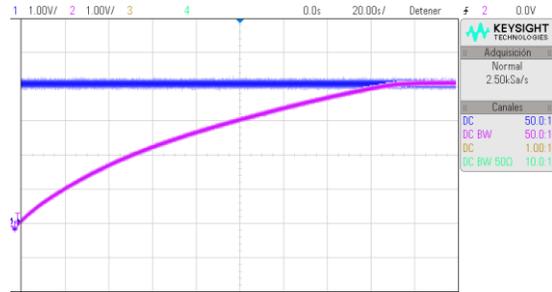
• Vcell1>Vcell4



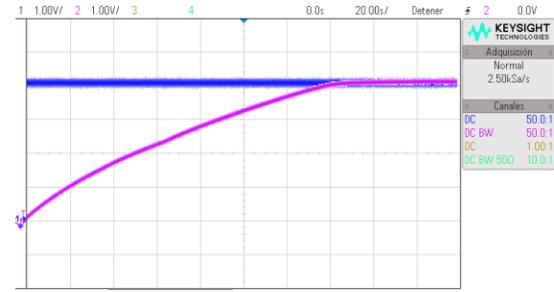
• Vcell2>Vcell1



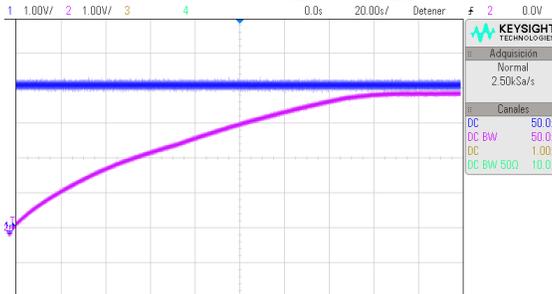
• Vcell2>Vcell3



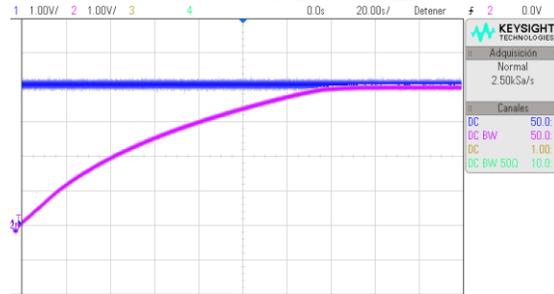
• Vcell2>Vcell4



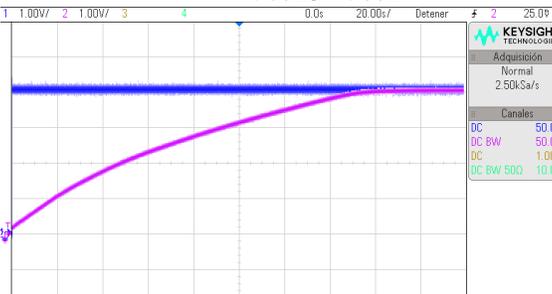
• Vcell3>Vcell1



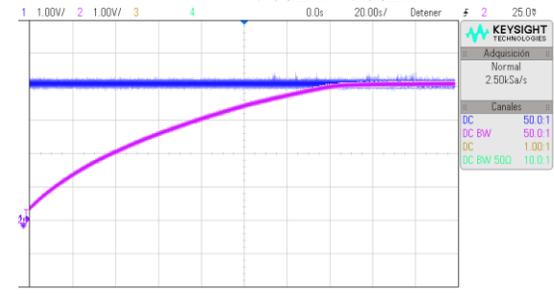
• Vcell3>Vcell2



• Vcell3>Vcell4



• Vcell4>Vcell1



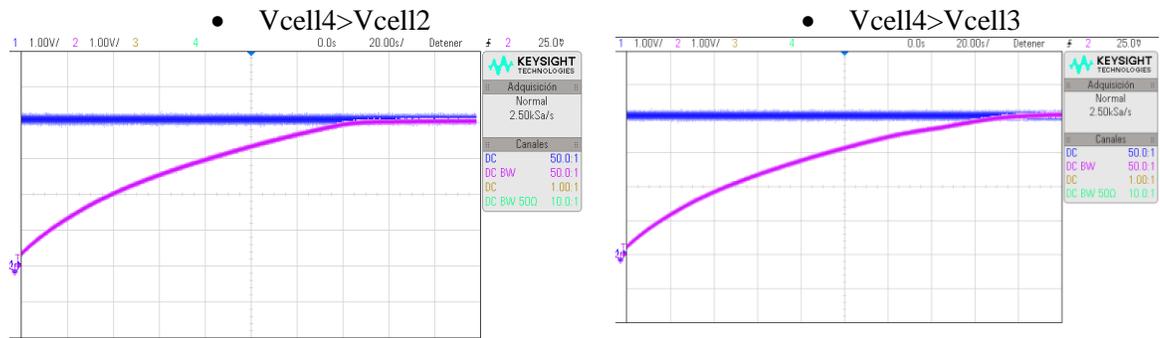


Figura 42 Comprobación de casos de igualación.

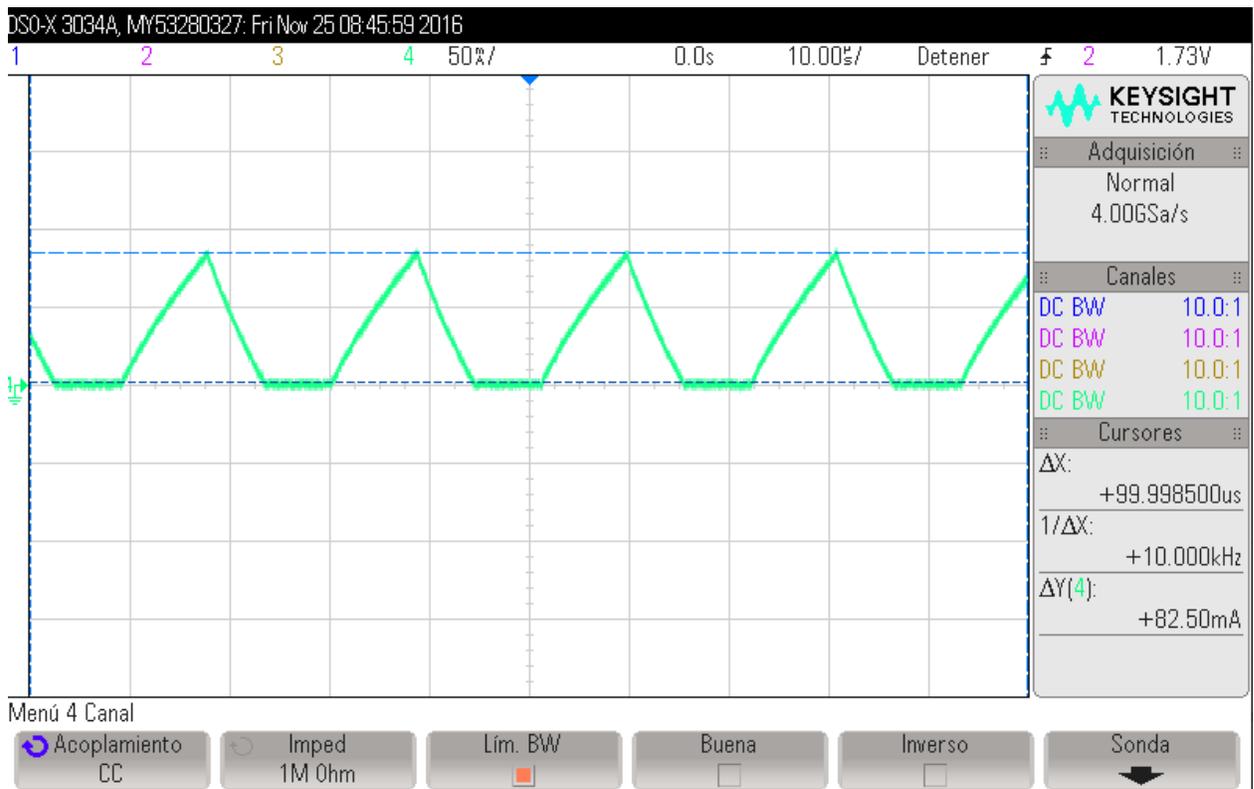


Figura 43 Corriente de la inductancia.

La grafica de la corriente de la inductancia en la figura 41 da un referente del correcto funcionamiento del circuito de igualación, ya que durante las pruebas realizadas fue necesario visualizar en todo momento esta señal en el osciloscopio para así comprobar la transferencia de energía entre celdas.

A partir de las pruebas hechas para cada uno de los casos se puede obtener la diferencia entre los voltajes finales del condensador para encontrar la diferencia a la cual llegaron después de hacer uso del circuito de igualación.

Caso	Voltaje de la fuente	Voltaje condensador del	Diferencia
Vcell1>Vcell2	3.99 V	3.89 V	100mV
Vcell1>Vcell3	4.07 V	4.05 V	20mV
Vcell1>Vcell4	4.07 V	4.12 V	20mV

Vcell2>Vcell1	4.11 V	4.09 V	20mV
Vcell2>Vcell3	4.08 V	4.13 V	50mV
Vcell2>Vcell4	4.03 V	4.09 V	60mV
Vcell3>Vcell1	3.99 V	3.90 V	90mV
Vcell3>Vcell2	4.03 V	4.01 V	20mV
Vcell3>Vcell4	4.07 V	4.05 V	20mV
Vcell4>Vcell1	4.04 V	4.10 V	60mV
Vcell4>Vcell2	4.11 V	4.06 V	50mV
Vcell4>Vcell3	4.11 V	4.09 V	20mV

Tabla 3 Resultados prueba de igualación.

## 5.8 IGUALACION CON 2 CELDAS

Luego de probar el funcionamiento de los casos de igualación, se procedió a hacer la igualación de dos celdas de ion litio tomando datos de su voltaje cada 2 minutos dando como resultado la figura 42.

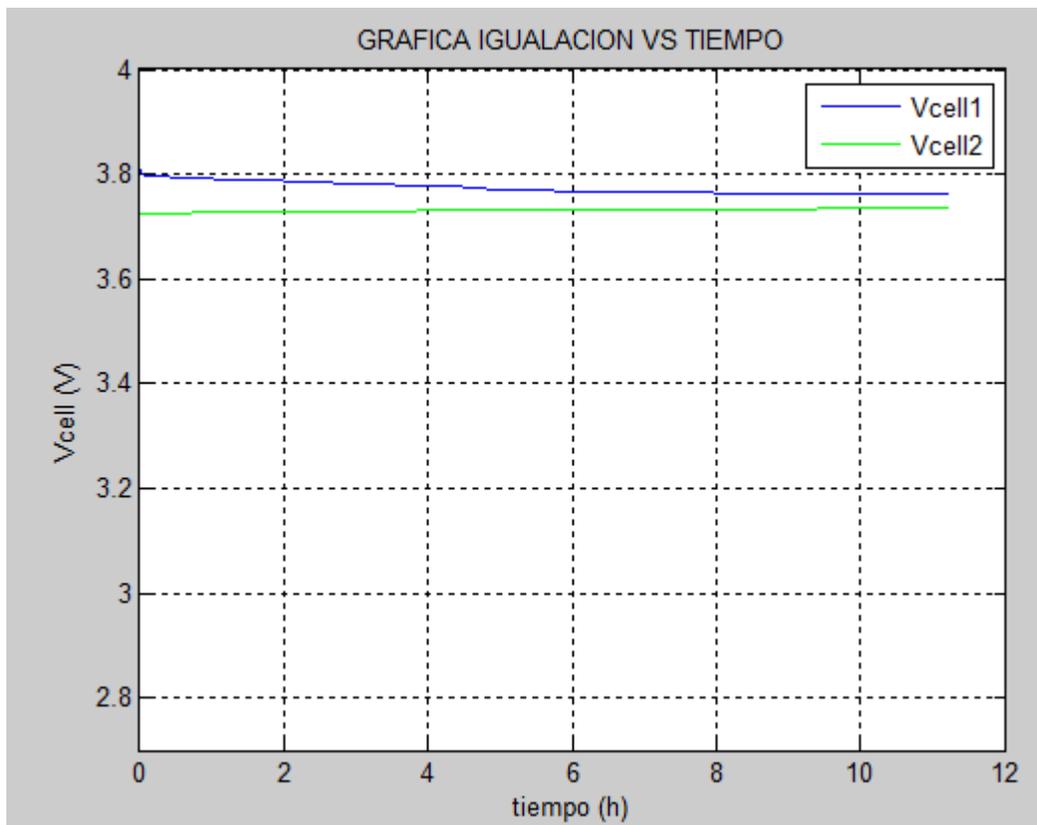


Figura 44 Grafica de igualación para dos celdas.

En la figura 42 se puede observar como a medida que pasa el tiempo se transfiere energía de la celda 1 que tiene el voltaje más alto a la celda 2 que tiene el voltaje más bajo. Al finalizar el proceso de igualación las celdas se encontraban con una diferencia de 27mV. La grafica de diferencia se muestra en la figura 43.

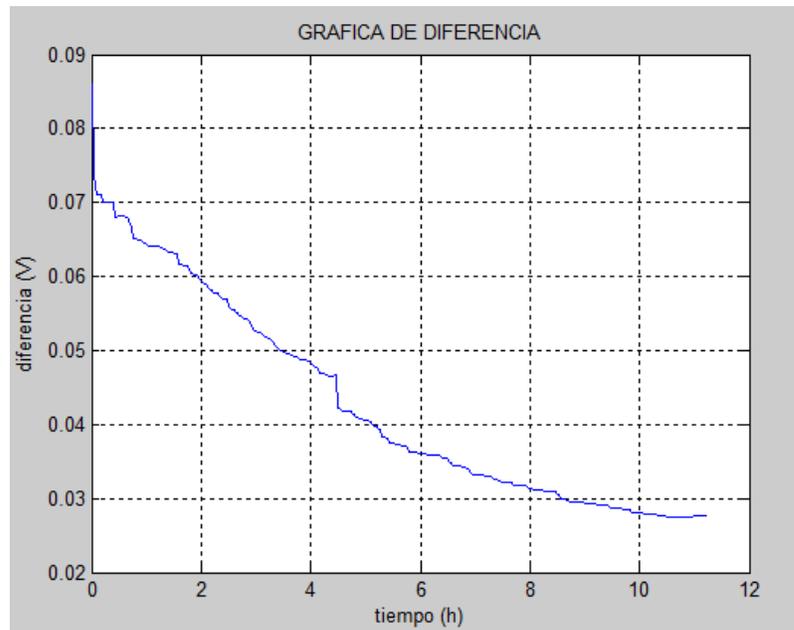


Figura 45 Grafica de diferencia a través del tiempo.

## 5.9 SEÑALES DE CONTROL PARA INTERRUPTORES EXTERNOS

Para poder observar el funcionamiento de los interruptores externos, se simuló una batería con una fuente y se varió su voltaje empezando en un valor de 3.3, disminuyéndolo hasta llegar al voltaje mínimo en el cual se conectó el cargador, luego se aumentó el voltaje de la fuente simulando el proceso de carga de las baterías hasta llegar al voltaje máximo para posteriormente conectar el arreglo de baterías a la carga nuevamente. En la figura es posible ver la transición de los dos estados carga y cargador.

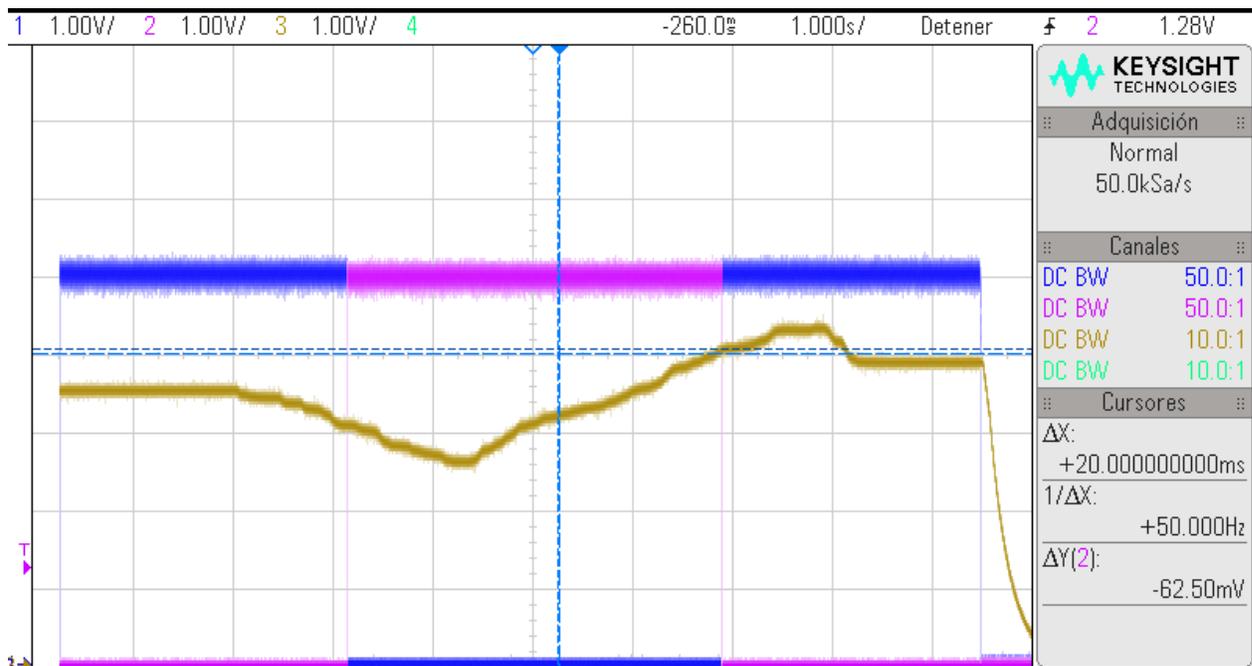


Figura 46 Señales de control para interruptores externos.

El voltaje que simula el comportamiento de la batería es el mostrado en el canal 3, la señal de conexión a la carga se muestra en el canal 1 y finalmente la señal que representa la conexión del cargador se muestra en el canal 2 de la figura 44. Se observa que cuando las baterías se descargan, el cargador es conectado hasta que se logran cargar

### 5.10 IGUALACION DE VOLTAJE DURANTE PROCESO DE DESCARGA.

Para esta prueba se conectó el conjunto de baterías a una carga de  $100\Omega$  por medio del interruptor externo que tiene esta función. Se midió el voltaje de cada una de las celdas en un intervalo de 2 minutos arrojando los resultados de la figura 45.

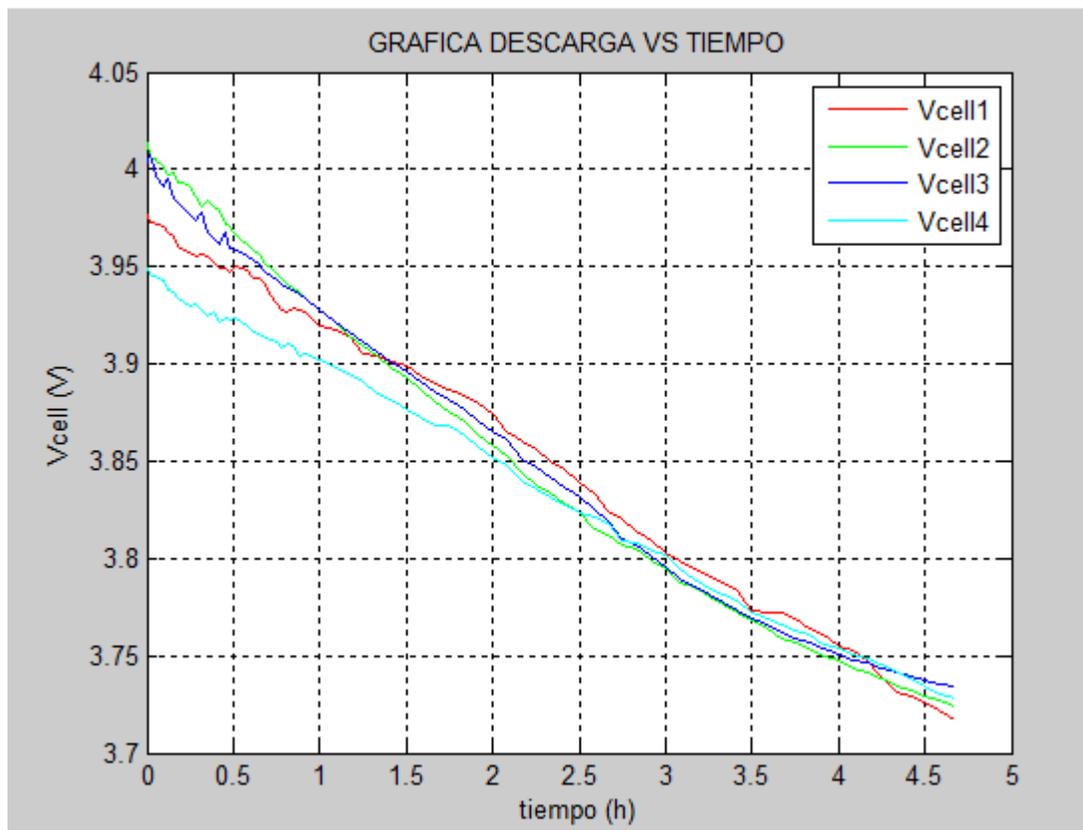


Figura 47 Grafica de descarga con circuito de igualación.

Se puede notar que las baterías inician con valores diferentes, en donde la máxima diferencia corresponde a un valor de 65 mV. Al finalizar el proceso de igualación se logró una diferencia máxima entre las baterías de 17mV,

### 5.11 IGUALACION DE VOLTAJE DURANTE PPROCESO DE CARGA

En esta prueba se activó el interruptor que conecta el conjunto de baterías al cargador, para así iniciar el proceso de carga con una corriente de 400mA. Se tomaron valores de voltaje de cada celda durante 5 horas cada 2 minutos, Esta prueba arrojó los resultados mostrados en la figura 46.

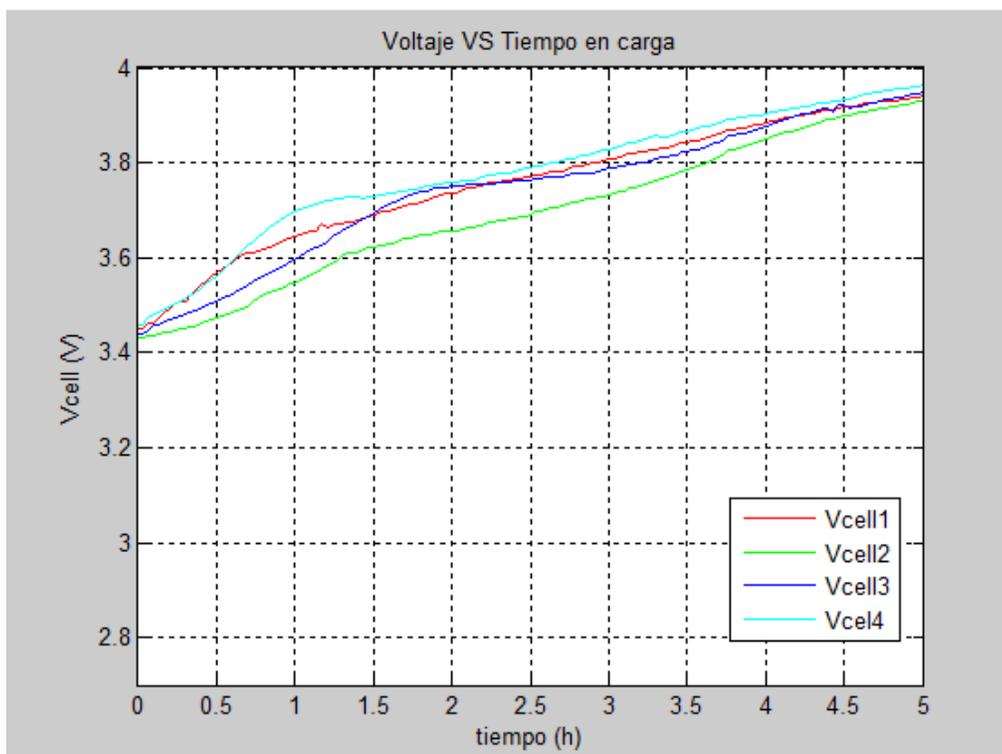


Figura 48 Grafica de carga con circuito de igualación

Al inicio de la prueba, las baterías tenían con una diferencia máxima de 52mV, al finalizar el proceso de igualación se logró una diferencia máxima de 47mV, dejando a las baterías dentro del rango de la banda de histéresis definido en la sección 4.5. Se evidencia que, aunque una de las baterías aumentó su voltaje en menor medida (Vcel2), el circuito de igualación permitió que todas las celdas puedan ser cargadas al mismo tiempo, razón por la cual el proceso de carga es exitoso.

## 5.12 CONSUMO DEL CIRCUITO

Cuando el circuito se encuentra haciendo el proceso de igualación presenta un consumo de 320mA, es por esto que en nuestra aplicación se usa una fuente de alimentación para proveer esta corriente. En caso de hacer independiente del circuito y conectar las baterías, se debe disminuir el consumo usando multiplexacion para el sensado de voltaje y temperatura para reducir el uso de los microcontroladores de dos a uno, de igual forma usar el modo sleep de los microcontroladores y finalmente la utilización de componentes de bajo consumo, de lo contrario el circuito de igualación descargaría las baterías en alrededor de 6.2 horas.

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de la caracterización de cada una de las baterías se pudo determinar que tienen parámetros diferentes, razón por la cual presentan un comportamiento distinto tanto en el proceso de carga como en el proceso de descarga. Esta diferencia producto del proceso de fabricación es evidenciada en las mediciones de las características medidas de cada celda tales como voltaje a circuito abierto, capacidad, impedancia y estado de carga. Esta situación evidencia la necesidad de hacer uso de circuitos de igualación.

Las gráficas de histéresis definieron un valor de igualación de 50mV, al realizar la ecualización de las baterías, se logró igualar las baterías dentro del rango establecido, tanto para el proceso de carga y el proceso de descarga.

Se realizó la medición de la capacidad de cada celda, midiendo la potencia de cada una por intervalo de tiempo definido, se halló la capacidad de cada una y aplicando la definición del estado de carga se pudo determinar este parámetro. Fue posible determinar que el estado de carga es diferente para cada celda y que no se encuentra una relación lineal entre este parámetro y el Voc.

.A través de la implementación de interruptores externos se logró asegurar que las baterías trabajen dentro del rango de operación de voltaje, de igual forma los sensores de temperatura ofrecen una protección de daños térmicos sobre las baterías. Esto se traduce en el mejoramiento de la vida útil de las baterías.

La generación de las señales de control fue realizada a través de microcontroladores, por esta razón el diseño estaba sujeto a la velocidad de estos dispositivos, las señales de control fueron generadas y como resultado del tiempo de realización de cada instrucción del microcontrolador se presentó una diferencia de 1.4% entre la frecuencia teórica y práctica.

Para desarrollos futuros sobre este tema será importante tener en cuenta el consumo del BMS, para así lograr que el proceso sea totalmente independiente de fuentes externas y poder alimentarlo con el paquete de baterías.

Para reducir el consumo de los microcontroladores se puede usar el modo sleep, en el cual el dispositivo solo consume una pequeña cantidad de energía activándose únicamente para realizar la lectura de los ADC. Otra forma de reducir el consumo de los microcontroladores es reducir su cantidad realizando una multiplicación externa para así lograr la medición de voltaje y temperatura con un solo microcontrolador.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- [1] «Market Reearch,» [En línea]. Available: <http://www.marketresearch.com/product/sample-8323376.pdf>.
- [2] «Power UK,» [En línea]. Available: [http://www.mpoweruk.com/lithium\\_failures.htm](http://www.mpoweruk.com/lithium_failures.htm).
- [3] J. Garche y A. Jossen, *Battery management systems (BMS) for increasing battery lifetime*.
- [4] «Battery University,» Battery University, [En línea]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/archive/is\\_lithium\\_ion\\_the\\_ideal\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/archive/is_lithium_ion_the_ideal_battery). [Último acceso: 2 10 2016].
- [5] «Electronics how stuff works,» [En línea]. Available: <http://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/lithium-ion-battery1.htm>. [Último acceso: 4 10 2016].
- [6] «Electronics Lab,» [En línea]. Available: [http://www.electronicslab.com/articles/Li\\_Ion\\_reconstruct/index.html](http://www.electronicslab.com/articles/Li_Ion_reconstruct/index.html) . [Último acceso: 2 10 2016].
- [7] «PRBA,» [En línea]. Available: <http://www.prba.org/wp-content/uploads/State-of-Charge-Li-ion-Batteries-and-DG-Regulations-PRBA-White-Paper-March-2016.pdf> . [Último acceso: 6 10 2016].
- [8] «Hindawi,» [En línea]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2013/953792/> . [Último acceso: 5 10 2016].
- [9] T. Dong, J. Li y F. Zhao, «Analysis on the influence of measurement error on state of charge estimation of LiFePO4 power battery,» de *International conference on Materials for renewable Energy and Environment* , Shanghai, 2011.
- [10] V. Prajapati, H. Hess y E. William, «A literature review of state of charge estimation techniques applicable to lithium poly-carbon monofluoride (Li/CFx),» de *The india international conference on Power Electronics* , New Delhi, 2011.
- [11] T. Instruments, *Undersanding Buck-Boost power stages in swith mode power supplies*, 2002.
- [12] M. Garcia, *Implementacion de un control estabilizador de la dinamica periodica de un convertidor boost PWM*, Cataluña, 2003.

[13] J. Reynaud, C. Carrejo, O. Gantet, P. Aloïsi, B. Estibals y C. Alonso, «Active balancing circuit for advanced lithium-ion batteries used in photovoltaic application,» de *International Conference on Renewable Energies and power quality*, Las Palmas de Gran Canaria, 2010.

[14] «Saurorja: solar energy» [En línea]. Available: <https://saurorja.org/2011/08/14/specific-capacity-of-cathode-materials/>. [Último acceso: 13 12 2016].

## 8 ANEXOS

### 8.1 MEDICION DE IMPEDANCIA DE LAS BATERIAS

Para realizar esta medición se usó una resistencia de  $10\Omega$ , para lograr que la resistencia de carga fuera comparable con la impedancia de la batería. Se midió el voltaje sobre la resistencia el cual corresponde al voltaje del divisor de voltaje formado entre la impedancia de la batería y la resistencia de carga, luego se midió el valor de voltaje de la batería en circuito abierto. A partir del divisor de voltaje que se muestra en la figura 47 se puede hallar la impedancia.

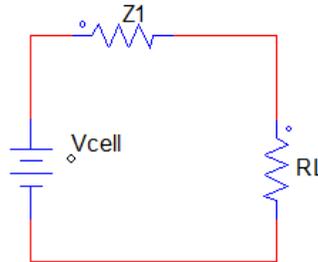


Figura 49 Circuito con impedancia de la batería.

$$V_{con-carga} = \frac{V_{sin-carga} * R_L}{Z + R_L} \quad (13)$$

- Celda 1

$$3.859 V = \frac{4.1193 V * 10\Omega}{Z1 + 10\Omega} \quad (14)$$

Despejando para el valor de la impedancia se tiene:

$$Z1 = 684m\Omega \quad (15)$$

- Celda 2

$$(16)$$

$$3.859 V = \frac{4.00 V * 10\Omega}{Z2 + 10\Omega}$$

Despejando para el valor de la impedancia se tiene:

$$Z2 = 960m\Omega \quad (17)$$

- Celda 3

$$3.775 V = \frac{4.077 V * 10\Omega}{Z3 + 10\Omega} \quad (18)$$

Despejando para el valor de la impedancia se tiene:

$$Z3 = 797m\Omega \quad (19)$$

- Celda 4

$$3.797 V = \frac{4.023 V * 10\Omega}{Z4 + 10\Omega} \quad (20)$$

Despejando para el valor de la impedancia se tiene:

$$Z4 = 590m\Omega \quad (21)$$

## 8.2 CALCULOS DE LA INDUCTANCIA

Para realizar el cálculo de la inductancia se tuvieron en cuenta parámetros como el corriente pico máximo. Esta fue escogida fue de 80 mA debido a que este es el valor de la tasa estándar de carga de cada celda de ion litio según el datasheet.

El periodo es:

$$T = \frac{1}{F} = \frac{1}{50KHz} = 20\mu s \quad (22)$$

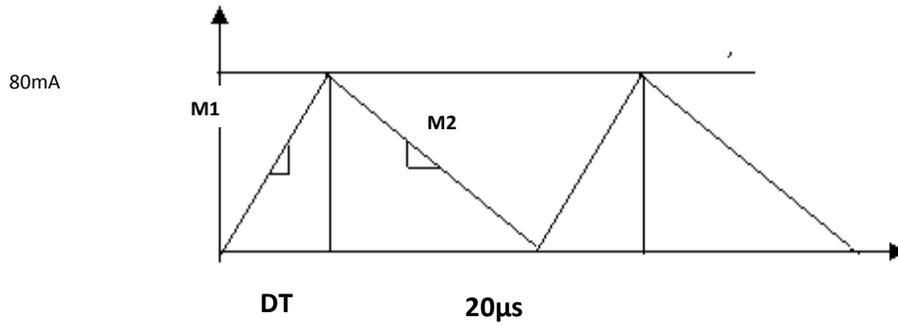


Figura 50 Corriente de la inductancia.

$$M1 = \frac{v_{cell3}}{L} = \frac{4.2}{L} \quad (22)$$

$$M1 = \frac{v_{cell4}}{L} = \frac{2.7}{L} \quad (23)$$

En la figura 48 se muestra la onda de la corriente inductancia en el caso crítico, este fue escogido con el criterio de voltaje de la fuente de 4.2v y voltaje en la carga de 2,7v (valores críticos de voltaje en la celdas) adicionalmente se diseñó en modo discontinuo para garantizar la transferencia de energía en cada uno de los ciclos y así asegurar que no quede energía residual almacenada en el núcleo de la inductancia de un periodo a otro.

Para calcular la inductancia se plantearon las ecuaciones por cada tiempo de conmutación para poder hallar L y posteriormente DT, Con este valor ya es posible conocer el ciclo útil al cual se trabajara.

$$I_p = \frac{v_{cell3} * DT}{L} \quad (24)$$

De ecuación 24 se despeja DT

$$DT = \frac{80mA * L}{v_{cell3}} \quad (25)$$

Luego se toma la pendiente en el intervalo  $DT \leq t \leq 20\mu s$ , para ello se utilizan los puntos correspondientes para plantear la ecuación 26 de la recta correspondiente a este intervalo.

Se toman los puntos (DT,400), (20µs ,0) para simplificar el cálculo se toma  $20\mu s = D2T$ , con estos se procede a hallar el punto de corte con el eje y

$$y = mx + b \quad (26)$$

$$m = \frac{-80mA}{D2T - DT} \quad (27)$$

Se hace  $y = 0$  , despejando b

$$b = \frac{80mA}{D2T - DT} \quad (28)$$

Finalmente  $I_p$

$$I_p = \frac{-V_{cell}4}{L}DT + \frac{80mA}{D2T - DT} \quad (29)$$

De la ecuación 29 se reemplaza DT y se iguala  $I_p=80mA$

$$80mA = \frac{-2.7V}{L} * \frac{80mA * L}{4.2} + \frac{80mA}{D2T - \frac{80mA * L}{4.2}} \quad (30)$$

Simplificando la expresión anterior se obtiene:

$$80mA = \frac{(-80mA * 4.2V * 2.7V * D2T + (80mA^2) * (2.7) + (80mA) * (4.2v) * D2T)}{D2T * 4,2^2 - 80mA * L} \quad (31)$$

Despejando D2T

$$80mA = \frac{(-80mA * 4.2V * 2.7V * D2T + (80mA^2) * (2.7) + (80mA) * (4.2v) * D2T)}{D2T * 4,2^2 - 80mA * L} \quad (31)$$

$$D2T = \frac{L(80mA^2 * (4.2) + 80mA^2 * 2.7)}{80mA * 4.2 * 2.7} \quad (32)$$

$$D2T = \frac{L(64mA * (4.2) + 64mA^2 * 2.7)}{0.907} \quad (33)$$

$$D2T = \frac{0.04416 * L}{0.907} \quad (34)$$

$$D2T = 0,04868 * L \quad (35)$$

Sabiendo que  $D2T=20\mu S$

$$20\mu s = 0,04868 * L \quad (36)$$

$$L = 400\mu H \quad (37)$$

Se despeja DT

$$DT = \frac{80mA * 400\mu H}{4,2} \quad (38)$$

$$DT = 7,61\mu s \quad (39)$$

Se procede a hallar el ciclo útil al cual se trabajara.

$$D = \frac{7,61\mu s}{20\mu s} \quad (40)$$

$$D = 0.38 \quad (41)$$

Para escoger el calibre del alambre se utilizó la siguiente expresión

$$\frac{I}{A} = 3A/mm^2 \quad (42)$$

Tomando como la  $I_{rms}=56,5mA$  y hallando el área

$$A = \frac{56,5mA}{3A/mm^2} \quad (43)$$

$$A = \frac{56,5mA}{3A/mm^2} \quad (44)$$

$$A = 0.018mm^2 \quad (45)$$

Con esta área es posible referirse a la tabla AWGN para hallar el calibre de cable correspondiente:

AWG N°	Diam. mm.	Area mm <sup>2</sup>
16	1,290	1,3100
17	1,150	1,0400
18	1,024	0,8230
19	0,912	0,6530
20	0,812	0,5190
21	0,723	0,4120
22	0,644	0,3250
23	0,573	0,2590
24	0,511	0,2050
25	0,455	0,1630
26	0,405	0,1280
27	0,361	0,1020
28	0,321	0,0804
29	0,286	0,0646
30	0,255	0,0503

Figura 51 Tabla AWG.

A partir de la figura 49 fue escogido un cable calibre 24 para la elaboración de la inductancia.

### 8.3 SELECCIÓN DEL NUCLEO

A partir de la corriente de la inductancia que fue hallada en la sección 8.2 se puede hallar la energía que almacena el núcleo por cada ciclo.

$$E = \frac{1}{2} * L * ip^2 \quad (46)$$

$$E = \frac{1}{2} * 400\mu H * (80mA)^2 \quad (47)$$

$$E = 1,28\mu J \quad (48)$$

Con esta energía fue posible encontrar un núcleo capaz de manejar una energía similar a esta y el encontrado fue el EA-77250 que disipa a su vez una potencia de 10W

<b>E-Core Magnetic Properties</b>							
<i>Part No.</i>	$A_e$ <i>mm<sup>2</sup></i>	$l_e$ <i>mm</i>	$V_e$ <i>mm<sup>3</sup></i>	$A_s$ <i>mm<sup>2</sup></i>	$A_W$ <i>mm<sup>2</sup></i>	$A_C \times A_W$ <i>mm<sup>4</sup></i>	$A_L$ value <i>mh/1000 turns</i>
E-77-188	22.5	40.1	900	1050	55.7	1250	1060
E-77-250	40.4	48.0	1930	1700	80.6	3250	1660
E-77-375	90.3	68.8	6240	3630	151.0	13700	2760
E-77-500	160.0	76.7	12300	5410	163.0	26100	4470
E-77-625	184.0	98.0	18000	7550	287.0	52900	5300

Figura 52 Parámetros para los núcleos de materia 77.

En la figura 50 se pueden ver los parámetros necesarios para hallar el número de vueltas

$$N \geq \frac{L * I}{A_e * \Delta B} \quad (49)$$

$$N \geq \frac{400\mu H * 56.5mA}{22.5mm^2 * 0.2T} \quad (50)$$

$$N \geq 5 \quad (51)$$

## 8.4 CIRCUITO IMPRESO

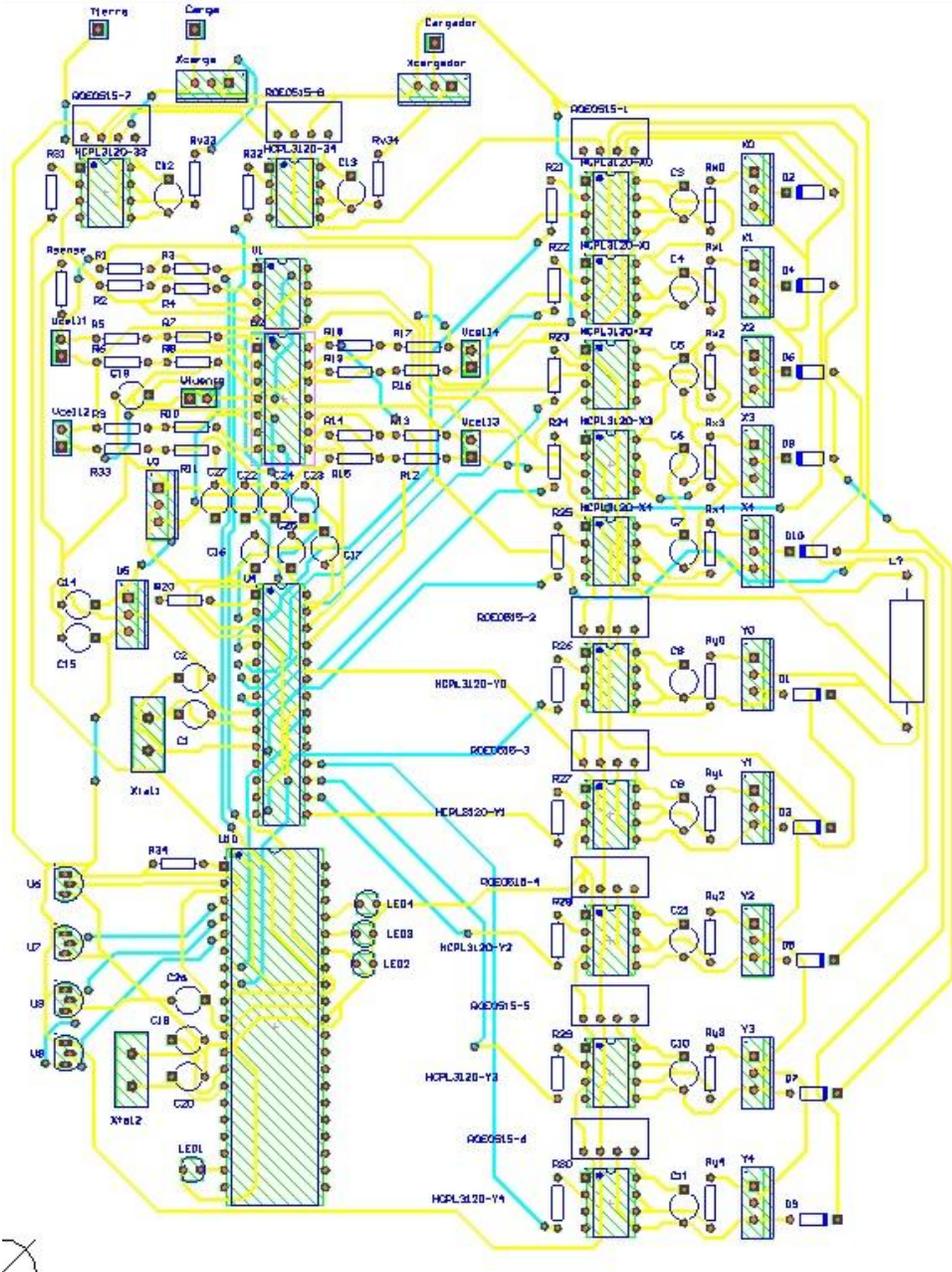


Figura 53 Circuito impreso.

## 8.5 DRIVER DE CORRIENTE

Estos circuitos son los encargados de suministrar la corriente de encendido a los interruptores, es necesario hacer uso de una resistencia en el gate del interruptor para limitar la corriente que es entregada como se muestra en la figura 52.

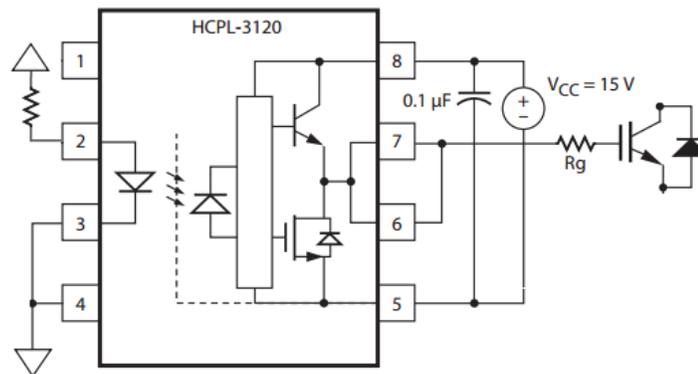


Figura 54 Driver de corriente.

El cálculo de la resistencia de gate debe hacerse partiendo de que el tiempo de encendido debe ser mucho menor al tiempo de conmutación, por esta razón se escoge el criterio de que el tiempo de encendido será 100 veces menor al tiempo de conmutación. La corriente necesaria para lograr el encendido del interruptor será:

$$i = \frac{Q}{t} \quad (52)$$

En donde Q (valor tomado del datasheet IRF1010) es la carga total en gate y t es el tiempo de encendido del interruptor, reemplazando los valores se tiene que.

$$i = \frac{130 \times 10^{-9}}{1} \quad (53)$$

$$100 * 50 \times 10^3 \quad (54)$$

$$i = 0.65A$$

Sabiendo que el voltaje de alimentación del driver aislado es de 15V se puede calcular la resistencia de gate como:

$$R_g = \frac{15V}{0.43A} = 23.07\Omega \quad (55)$$

Con el cálculo de la resistencia de gate se hace el montaje de los HCPL como se muestra en la figura

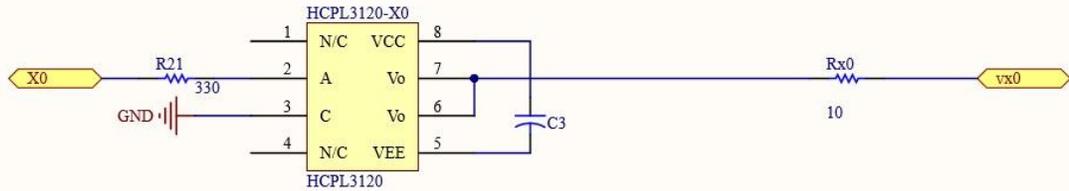


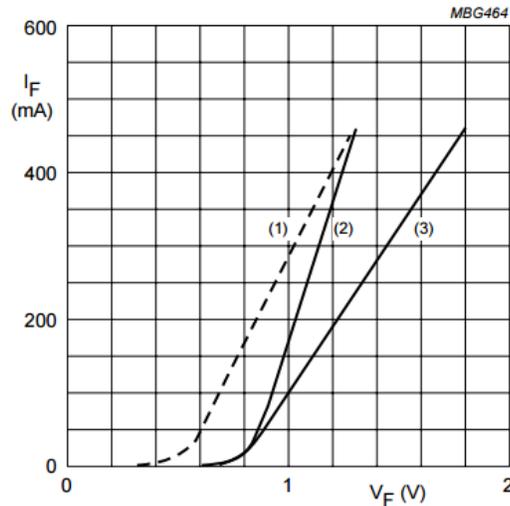
Figura 55 Esquemático del driver de corriente.

En donde la resistencia  $R_{x0}$  corresponde a la resistencia que se conectará al gate del interruptor. En la entrada  $X0$  se conecta la señal generada por el microcontrolador que activara el led del driver aislado.

## 8.6 MOSFET Y DIODOS

Para la selección del Mosfet se tuvo en cuenta el valor de la resistencia de encendido  $R_{ds}$  y el tiempo de conmutación de los interruptores. El mosfet escogido fue el de referencia IRF1010, ya que posee una resistencia de encendido de  $12m\Omega$  y un tiempo de encendido menor al tiempo de conmutación correspondiente a  $200nS$ .

Los diodos utilizados son los 1n4148 ya que poseen una velocidad de conmutación de  $4nS$  acorde con los requerimientos del diseño. La resistencia de encendido del diodo se puede hallar a través de la gráfica de corriente vs voltaje mostrada en el datasheet.



- (1)  $T_j = 175\text{ }^\circ\text{C}$ ; typical values.
- (2)  $T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ; typical values.
- (3)  $T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ; maximum values.

Figura 56 Grafica de corriente vs voltaje del diodo.

Para el cálculo de la resistencia del diodo hallamos la pendiente de la curva de corriente vs voltaje de la figura 54 dando como resultado una resistencia de:

$$R_d = 0.5\Omega \quad (56)$$

## 8.7 PÉRDIDAS EN EL CIRCUITO DE IGUALACION

Para el cálculo de las pérdidas es necesario conocer parámetros de importancia mostrados en la tabla 4.

Parámetro	Valor
$R_{ds}$	12mΩ
$I_{lrms}$	56.5mA
$I_{avg}$	40mA
$V_f$	0.62
$R_l$	0.19 Ω
$R_d$	0.5Ω

Tabla 4 Parámetros de diodo y mosfet.

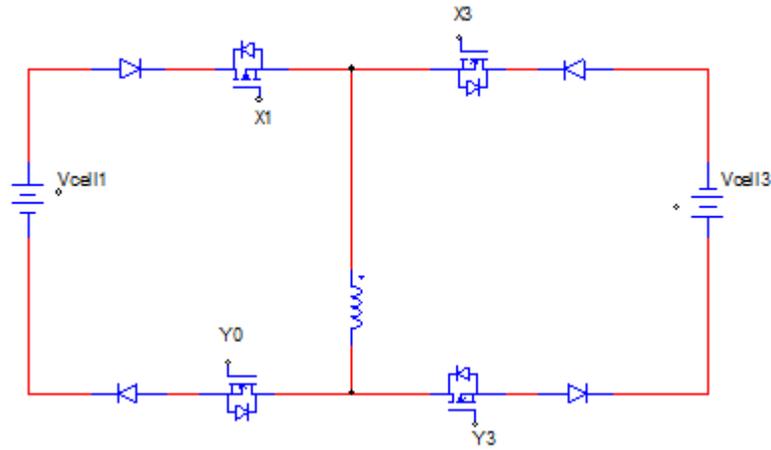


Figura 57 Circuito de igualación.

Se tiene en cuenta que durante el proceso de igualación, máximo se tienen dos interruptores, dos diodos y la inductancia. Para el cálculo de las pérdidas se debe tener en cuenta la resistencia de encendido del mosfet, la corriente rms sobre la inductancia, la resistencia asociada al diodo y finalmente la resistencia serie asociada a la inductancia dando como resultado:

$$P_{loss} = 4 * (R_{ds} * I_{lrms}^2) + 4 * (R_d * I_{lrms}^2 + V_f * I_{avg}) + R_l * I_{lrms}^2 \quad (57)$$

$$P_{loss} = 4 * (12m\Omega * 56.5mA^2) + 4 * (0.5\Omega * 56.5mA^2 + 0.62 * 40mA) + 0.19 \Omega * 56.5mA^2 \quad (58)$$

$$P_{loss} = 153.2mW + 105.5mW + 608.6\mu W \quad (59)$$

$$P_{loss} = 259.3mW \quad (60)$$

## 8.8 CALCULO DEL SENSOR DE VOLTAJE

Para la implementación del sensor de voltaje se hace uso de un amplificador configurado de forma diferencial como se muestra en la figura 56.

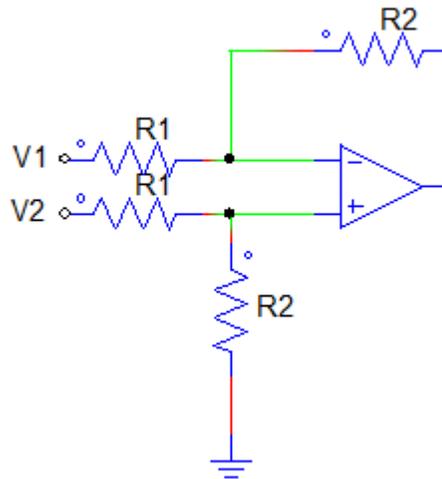


Figura 58 Amplificador diferencial.

La salida del amplificador diferencial está dada por la ecuación 61.

$$V_{out} = \frac{R2}{R1}(V2 - V1) \quad (61)$$

El voltaje máximo de las baterías es de 4.2V, se quiere aprovechar todo el rango del ADC así que se debe configurar una ganancia de 0.78 en el amplificador diferencial para que con 4.2V obtengamos un valor de medida de 3.3V

$$G = \frac{4.2}{3.3} = 0.78 \quad (62)$$

Para lograr la ganancia deseada de 0.78 se supone una resistencia  $R2=200K\Omega$ , para así hallar el valor de  $R1$ .

$$\frac{200K\Omega}{R1} = 0.78 \quad (63)$$

$$R1 = 256.4K\Omega \approx 270K\Omega \quad (64)$$

El integrado seleccionado para la realización de este sensor de voltaje es el OPA4227, ya que tiene un alto rechazo en modo común y un bajo offset a la salida.

## 8.9 CALCULO DEL SENSOR DE CORRIENTE

Teniendo en cuenta las condiciones máximas de corriente de carga y sabiendo que el circuito de igualación usa 80mA, la corriente máxima que las baterías pueden recibir es de 320mA. Se tiene una resistencia de sensado de 0.1Ω, así que el voltaje sobre la resistencia será:

$$V_s = 0.1\Omega * 320mA = 32mV \quad (65)$$

Como esta muestra de voltaje es muy pequeña se hace uso de un amplificador de voltaje configurado en modo diferencial como en la figura 56 con una ganancia de 39.

Para lograr la ganancia deseada de 39 se supone una resistencia  $R_2=3.9K\Omega$ , para así hallar el valor de  $R_1$ .

$$\frac{3.9K\Omega}{R_1} = 39 \quad (66)$$

$$R_1 = 100\Omega \quad (67)$$

Con el conocimiento de la ganancia se y el voltaje de entrada se puede deducir el voltaje en el cual el microcontrolador debe generar la alerta de sobrecarga:

$$V_{alerta} = 32mV * 39 = 1.248V \quad (68)$$

Para la implementación de este circuito se usó un integrado con bajo offset a la salida y gran rechazo en modo común de referencia lm358.

## 8.10 MICROCONTROLADOR PIC24FJ64GA002

Es un microcontrolador de 16 bits. Posee 64 KB de memoria Flash, 8 KB RAM, periféricos avanzados, 16 canales ADC (10 bit), comparadores analógicos, soporte para reloj de 31 KHz a 8 MHz.

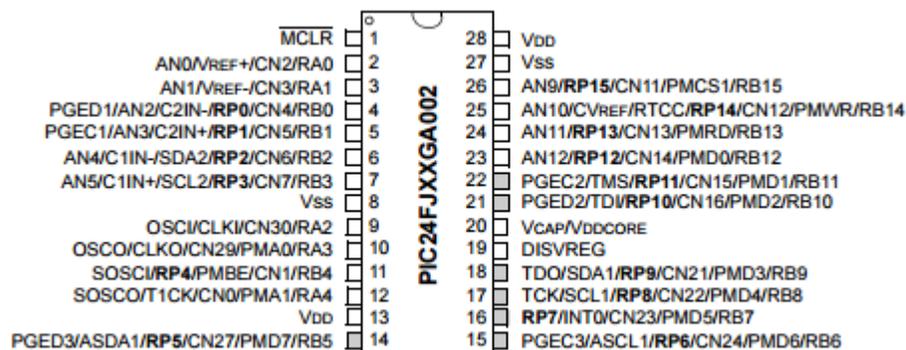


Figura 59 PIC24FJ64GA002.

## 8.11 MICROCONTROLADOR PIC16F877A

Es un microcontrolador de 8 bits que puede ejecutar instrucciones en 200ns, tiene 35 instrucciones para ser programado y presenta la arquitectura PIC de Microchip en un chip de 40 pines. Este microcontrolador posee 256 bytes de EEPROM, 2 comparadores, 8 canales ADC (de 10 bits), PWM, SPI, I<sup>2</sup>C™. Por todas sus características, es ideal para aplicaciones avanzadas de conversión AD en diferentes industrias.

La figura 6 muestra la distribución de pines para el microcontrolador PIC16F877.

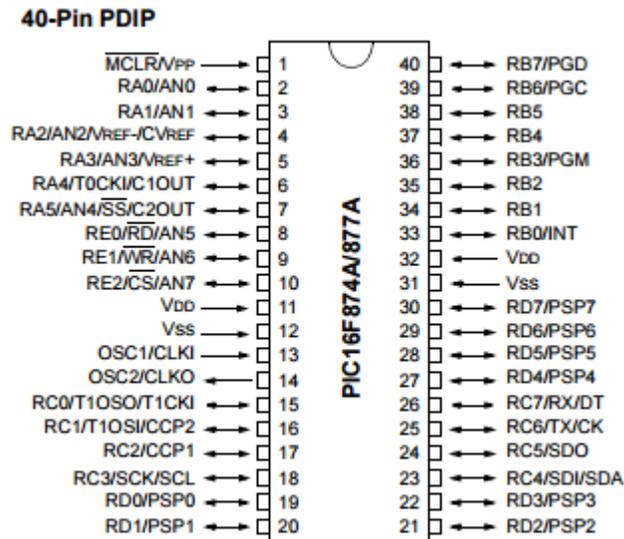


Figura 60 PIC16F877A.

8.12 MONTAJE FINAL

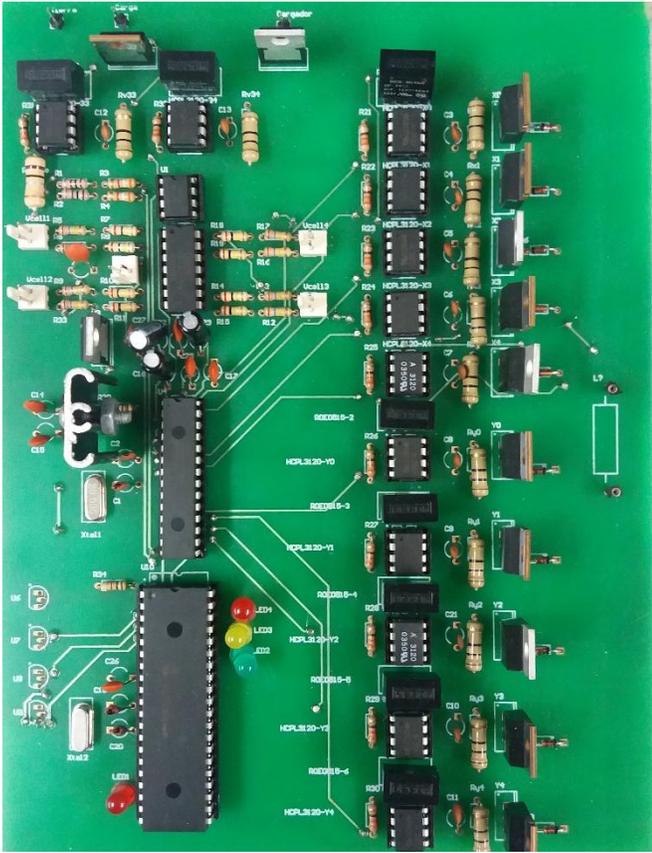


Figura 61 Montaje final.