TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO EN CELAYA

DEPARTAMENTO EN INGENIERÍA ELECTRONICA

“CARGADOR DE BATERIAS LI-PO CON BALANCE DE CELDAS”

PRESENTA:

SAUL FUENTES REYES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. HECTOR JUAN CARLOS LOPEZ TAPIA

CO-DIRECTOR DE TESIS:

DR. NIMROD VAZQUEZ NAVA

Celaya, Gto., 2023

Agradecimientos:

A Conahcyt por el apoyo económico que me brindo para la realización de este trabajo.

A mis compañeros de posgrado por su amistad y consejos.

A todos mis profesores por compartir sus conocimientos y tiempo.

A todos los profesores del Departamento de Electrónica por darme la oportunidad

de realizar mis estudios de maestría.

A mi asesor el Dr. Héctor Juan Carlos López Tapia por todo el tiempo que me dedico, los conocimientos que me compartió y su paciencia

A mi familia por todo su apoyo y cariño.

A mi mamá por su apoyo incondicional.

A Tania, mi mejor amiga y compañera en este viaje.

A los amigos que hice y me apoyaron en esta etapa de mi vida.

Índice

Índice de figuras V
Índice de tablas IX
Resumen X
Abstract XI
Introducción XII
Estado del arte 1
1.1 Baterías Li-Po 2
1.1.1 Características de una batería Li-Po 2
1.2 Carga de una batería Li-Po 4
1.3 Métodos de carga de una batería 4
1.3.1 Corriente constante 4
1.3.2 Voltaje constante 5
1.3.3 Corriente por goteo o carga lenta 5
1.3.4 Corriente-Voltaje constante 5
1.3.5 Carga por pulsos 6
1.4 Balance de celdas 6
1.5 Métodos de balance 7
1.5.1 Balance Pasivo 8
1.5.2 Balance Activo 10
1.5.2.1 Balance con capacitores 10
1.5.2.2 Balance con inductores 11
1.5.2.3 Balance con transformadores 13
1.5.2.4 *Balance con convertidores* 14
1.5.2.4.1 Convertidor Boost *14*
1.5.2.4.2 Convertidor Buck-Boost *15*
1.5.2.4.3 Convertidor Cûk *16*
1.5.2.4.4 Convertidor Ramp *16*
1.5.2.4.5 Convertidor Resonante *17*
1.5.2.4.6 Convertidor Flyback *18*

1.6 Conclusión topologías de balance 18
Balance de celdas propuesto 20
2.1 Topología de balance 21
2.2 Proceso de balance 22
2.3 Estados de operación 25
2.4 Etapas del cargador 27
2.5 Diseño del inductor 29
2.6 Control de corriente 32
2.7 Implementación de algoritmo de balance y topología propuesta 33
2.7.1 Controlador y software 33
2.7.1.1 Algoritmo de balance *34*
2.7.2 Diseño de circuitos impresos de topología propuesta 42
2.7.3 Diseño de impulsores 45
2.7.4 Sensores de voltaje 47
2.7.5 Sensor de corriente 47
Resultados de simulación y experimentales 49
3.1 Comparación entre técnicas de balance 50
3.2 Simulaciones de balance y carga de celdas 58
3.2.1 Caso 1 de simulación. 59
3.2.2 Caso 2 de simulación. 62
3.2.3 Caso 3 de simulación. 65
3.3 Resultados experimentales 69
3.3.1 Caso 1 de pruebas experimentales. 69
3.3.2 Caso 2 de pruebas experimentales. 71
3.3.3 Caso 3 de pruebas experimentales. 73
3.3.4 Caso 4 de pruebas experimentales. 74
Conclusiones 77
Trabajos a futuro 79
Referencias bibliográficas 80

Índice de figuras

Capítulo 1

Figura 1. 1. Batería Li-Po [9]. 4
Figura 1. 2. Método de carga CC-VC. 6
Figura 1. 3. Topologías de balance de celdas [17]. 8
Figura 1. 4. Comparación entre balance activo y pasivo [17]. 8
Figura 1. 5. Balances pasivos: (a) Balance con resistencia, (b) Balance con resistencia conmutada en [16]. 9
Figura 1. 6. Balance capacitor conmutado en [22]. 11
Figura 1. 7. (a) Balance con interruptores extra, (b) Balance con capacitor extra en [20]. 11
Figura 1. 8. Topología de balance con un solo inductor en [16]. 12
Figura 1. 9. Topología de balance con transformador conmutado en [16]. 13
Figura 1. 10. Topología de balance con múltiples transformadores en [24]. 14
Figura 1. 11. Topología de balance con convertidor Boost. 15
Figura 1. 12. Topología de balance con convertidor Buck-Boost. 15
Figura 1. 13. Topología de balance con convertidor Cûk. 16
Figura 1. 14. Topología de balance con convertidor Ramp. 17
Figura 1. 15. Topología de balance con convertidor Resonante. 17
Figura 1. 16. Topología de balance con convertidor Flyback en [25]. 18

Capítulo 2

Figura 2. 1. Topología de balance con cargador propuesta. 21
Figura 2. 2. Topología de balance con cargador para batería Li-Po de 7 celdas. 22
Figura 2. 3. (a) Estado de operación 1, (b) Estado de operación 2. 26
Figura 2. 4. (a) Estado de operación 3, (b) Estado de operación 4. 26
Figura 2. 5. Etapas del cargador durante el proceso de carga y balance. 27
Figura 2. 6. Etapas de carga y descarga de celdas. 28
Figura 2. 7. Señal de etapa de carga completa. 28
Figura 2. 8. (a)Situaciones de carga del inductor, (b)Situaciones de descarga del inductor. 29

Figura 2. 9. Circuito resultante de topología propuesta. 30
Figura 2. 10. Tiempo DT. 30
Figura 2. 11. Tiempo D'T 31
Figura 2. 12. Control por histéresis. 33
Figura 2. 13. Adquisición de voltajes de las celdas. 35
Figura 2. 14. Calculo de errores de los arreglos de celdas. 35
Figura 2. 15. Obtención de errores máximo y mínimo. 36
Figura 2. 16. Asignación de caso de descarga. 37
Figura 2. 17. Diagrama de bloques para forzar caso de descarga y carga. 37
Figura 2. 18. Generador de señal de etapas de cargador. 38
Figura 2. 19. Generador de señal de etapas con condición. 38
Figura 2. 20. Señal de etapas. 39
Figura 2. 21. Salidas de las señales de control. 40
Figura 2. 22. Diagrama de bloques modo de operación 3. 40
Figura 2. 23. Diagrama de bloques de control de corriente por histéresis. 41
Figura 2. 24. Panel frontal del programa. 41
Figura 2. 25. MOSFET’s superiores. 42
Figura 2. 26. Diagrama de circuito impreso de MOSFET´s superiores. 42
Figura 2. 27. MOSFET's intermedios. 43
Figura 2. 28. Circuito impreso de MOSFET's intermedios. 43
Figura 2. 29. MOSFET's inferiores. 44
Figura 2. 30. Circuito impreso MOSFET's inferiores. 44
Figura 2. 31. Diagrama de circuito inductor conectado con fuente de voltaje. 45
Figura 2. 32. Circuito impreso Inductor y fuente de voltaje. 45
Figura 2. 33. Impulsores para dos MOSFET's. 46
Figura 2. 34. Impulsor MOSFET conectado a fuente de voltaje. 46
Figura 2. 35. Circuito de sensado de voltaje. 47
Figura 2. 36. Conexión del sensor de corriente a la GPIC. 48
Figura 2. 37. Diagrama de circuito impreso de sensor de corriente. 48

Capítulo 3

Figura 3. 1. Voltajes capacitores caso 1 (a) Balance topología con un inductor, (b) Balance propuesto. 51
Figura 3. 2. Corriente en el inductor I_L caso 1 (a) Topologia un solo inductor, (b) Balance propuesto. 52
Figura 3. 3. Descarga y carga de celdas caso 1 (a) Topologia con un solo inductor, (b) Balance propuesto. 52
Figura 3. 4. Voltajes capacitores caso 2 (a) Balance topología un solo inductor, (b) Balance propuesto. 54
Figura 3. 5. Corriente en el inductor I_L caso 2 (a) Topologia un solo inductor, (b) Balance propuesto. 54
Figura 3. 6. Descarga y carga de celdas caso 1(a) Topologia con un solo inductor, (b) Balance propuesto. 55
Figura 3. 7. Voltajes capacitores caso 3 (a) Balance topología un solo inductor, (b) Balance propuesto. 56
Figura 3. 8. Corriente en el inductor I_L caso 3 (a) Topologia un solo inductor, (b) Balance propuesto. 57
Figura 3. 9. Descarga y carga de celdas caso 3 (a) Topologia con un inductor, (b) Balance propuesto. 57
Figura 3. 10. Simulación en PSIM (a) Topología propuesta, (b) Control de balance propuesto. 58
Figura 3. 11. Simulación de balance de capacitores caso 1. 59
Figura 3. 12. Voltaje total de los capacitores caso 1. 60
Figura 3. 13. Corriente en el inductor I_L caso 1. 60
Figura 3. 14. Errores máximo y mínimo caso 1. 61
Figura 3. 15. Señal de etapas caso 1. 61
Figura 3. 16. Casos de descarga y carga caso 1. 62
Figura 3. 17. Simulación de balance de capacitores caso 2. 63
Figura 3. 18. Voltaje total de los capacitores caso 2. 63
Figura 3. 19. Corriente en el inductor I_L caso 2. 64
Figura 3. 20. Errores máximo y mínimo caso 2. 64

Figura 3. 21. Señal de etapas caso 2. 65
Figura 3. 22. Casos de descarga y carga caso 2. 65
Figura 3. 23. Simulación de balance de capacitores caso 3. 66
Figura 3. 24. Voltaje total de los capacitores caso 3. 67
Figura 3. 25. Corriente en el inductor I_L caso 3. 67
Figura 3. 26. Errores máximo y mínimo caso 3. 68
Figura 3. 27. Señal de etapas caso 3. 68
Figura 3. 28. Casos de descarga y carga caso 3. 68
Figura 3. 29. Balance y carga de capacitores caso 1. 70
Figura 3. 30. Corriente en el inductor caso 1 71
Figura 3. 31. Señales de control caso 2. 72
Figura 3. 32. Balance y carga de capacitores caso 2. 72
Figura 3. 33. Señales de control caso 3. 73
Figura 3. 34. Balance y carga de capacitores caso 3. 74
Figura 3. 35. Señales de control caso 4. 75
Figura 3. 36. Balance capacitores caso 4. 76

Índice de tablas

Capítulo 2

Tabla 2. 1. Combinaciones de celdas propuestos para balance..... 23
Tabla 2. 2. Combinaciones de celdas para carga y descarga. 24
Tabla 2. 3. Modos de operación topología propuesta. 25
Tabla 2. 4. Etapas de cargador y modo de operación correspondiente. 27

Capítulo 3

Tabla 3. 1. Parámetros de simulación. 50
Tabla 3. 2. Voltajes iniciales caso 1. 50
Tabla 3. 3. Voltajes iniciales caso 2. 53
Tabla 3. 4. Voltajes iniciales caso 3. 55
Tabla 3. 5. Parámetros de simulación. 58
Tabla 3. 6. Voltajes iniciales caso 1. 59
Tabla 3. 7. Voltajes iniciales caso 2. 62
Tabla 3. 8. Voltajes iniciales caso 3. 66
Tabla 3. 9. Casos de carga y descarga para dos capacitores. 69
Tabla 3. 10. Parámetros para pruebas experimentales. 69
Tabla 3. 11. Voltajes iniciales de capacitores caso 1. 70
Tabla 3. 12. Voltajes iniciales de capacitores caso 2. 71
Tabla 3. 13. Voltajes iniciales de capacitores caso 3. 73
Tabla 3. 14. Voltajes iniciales de capacitores caso 4. 75

Resumen

En la actualidad las baterías son una parte importante en la vida diaria, ya que prácticamente todos los dispositivos móviles como celulares inteligentes, laptops, equipo fotográfico, drones e incluso autos eléctricos las utilizan. En las baterías Li-Po es muy importante tener en cuenta el proceso de carga como también implementar un sistema de balance de celdas. Ya que estos puntos son muy importantes para cuidar la batería y prolongar su vida útil.

En la literatura se presentan una gran cantidad de trabajos relacionados a los diferentes métodos de carga y topologías de balance para las baterías Li-Po. En los métodos de carga se busca cuidar tanto la sobrecarga y sobre descarga, ya que en el primer caso puede incendiar la batería y en el segundo se daña internamente la batería. Estos métodos se pueden diferenciar de acuerdo con el método de carga que utilice el cargador. En los métodos de balance de celdas se pueden realizar dependiendo del su principio de funcionamiento y los elementos utilizados. Estos puntos son fundamentales para aprovechar al máximo este tipo de baterías.

El objetivo de este trabajo fue diseñar y probar un cargador con balance de celdas para baterías Li-Po para de esta manera se pueda lograr tanto una mejora en el tiempo de balance y la carga de la batería. El diseño de la topología puede ser aplicado para baterías con diferente número de celdas.

Abstract

Batteries are an important part of daily life, since probably all mobile devices such as smartphones, laptops, photographic equipment, drones and even electric cars use them. In Li-Po batteries it is very important to take into account the charging process as well as implement a cell balance system. Since these points are very important to take care of the battery and prolong its useful life.

In the literature, a large number of works related to the different charging methods and balance topologies for Li-Po batteries are presented. The charging methods seek to take care of both overload and overdischarge, since in the first case it can set the battery on fire and in the second the battery is internally damaged. These methods can be differentiated according to the charging method used by the charger. Cell balance methods can be performed depending on their operating principle and the elements used. These points are essential to make the most of this type of battery.

The objective of this work was to design and test a charger with balance of cells for Li-Po batteries in order to achieve both an improvement in the balance time and the battery charge. The topology design can be applied to batteries with different numbers of cells.

Introducción

Gracias al avance de la tecnología y el desarrollo de dispositivos móviles se ha tenido la necesidad de desarrollar sistemas que sirvan de almacenamiento y puedan proveer energía a estos dispositivos. Las baterías de polímero de litio (Li-Po) se han colocado en la actualidad como uno de los mejores sistemas de almacenamiento ya que ha tenido un gran crecimiento en el mercado de las baterías recargables respecto a años pasados [1].

Al utilizar este tipo de baterías se deben tener en cuenta varios factores, uno de estos factores es el proceso de carga ya que al igual que otras baterías del tipo recargable es necesario realizar el proceso de carga con cuidado, especialmente si se utiliza un método carga rápida [2]. En la actualidad se han desarrollado varios métodos para cargar una batería Li-Po uno de los métodos más usados es el de voltaje-constante de corriente-constante (CC-CV), se debe tener en cuenta un buen método de carga ya que la edad de las baterías se ven muy afectadas por las condiciones de sobrecarga, por lo que implementando un buen método de carga puede prolongar la vida útil de la batería y evitar que se incendie [3].

La manera más común en que las baterías Li-Po están conectadas es en serie, debido a esto se debe prestar mucha atención a las condiciones de voltaje de cada celda, porque después de su uso cada celda tiene un voltaje diferente. Cuando la condición de cada celda es diferente, se presenta que cuando la batería se está cargando, cada celda tendrá un tiempo diferente para alcanzar la capacidad máxima [3]. Por esta razón otro factor importante para el proceso de carga de estas baterías es el balance de celdas y es necesario para evitar la sobrecarga o sobre descarga causada por estas diferencias de voltaje entre las celdas. La aplicación de un sistema de balance asegura que se prolongue la vida útil de la batería [4].

Tener en cuenta estos factores en el proceso de carga de las baterías Li-Po ayuda a que la batería no se dañe, que se prolongue su vida útil y que además pueda entregar su máxima capacidad al dispositivo que la emplee. Por estas razones son muy importantes las investigaciones enfocadas a estos dos procesos tanto la carga y el balance de celdas.

La tesis está estructurada en 3 capítulos:

Capítulo 1. Estado del arte

En este se explica a detalle las características de las baterías Li-Po cómo también los factores que intervienen en su proceso de carga. Además, se realiza una revisión de los diferentes métodos de carga que existen para cargar este tipo de batería y también se analizan los métodos de balance a partir de su funcionamiento y se revisan algunas topologías que se presentan en la literatura.

Capítulo 2. Propuesta de topología de cargador con balance de celdas y algoritmo de balance.

Contiene el análisis de la topología propuesta como también los modos de operación. También se desarrolla un algoritmo de balance de celdas para la topología de balance propuesta. Este algoritmo de balance se desarrolla en el software LabVIEW para implementarlo con una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments.

Capítulo 3. Resultados de simulación y experimentales.

Se presentan las simulaciones en el software PSIM para comprobar la topología propuesta como también el algoritmo de balance. Y se implementa físicamente un caso de balance utilizando una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments. Para finalizar se presentan las conclusiones generales de la tesis y los posibles trabajos futuros que derivan de la presente investigación.

Capítulo 1

Estado del arte

En el presente capítulo se definen las características generales de las baterías Li-Po, como también los diferentes métodos de carga que existen en la literatura y las precauciones que se deben tomar en cuenta durante su proceso de carga. Además, también se describe la importancia de implementar una topología de balance de celdas y se analizan varias topologías de balance que se presentan en la literatura tomando en cuenta su principio de funcionamiento.

1.1 Baterías Li-Po

Las baterías Li-Po son baterías del tipo recargables y hablando de dispositivos de almacenamiento son un avance respecto a las baterías de iones de litio (Li-Ion), la característica que las diferencia es que la batería Li-Po utiliza un electrolito tipo gel el cual sirve para optimizar la movilidad de los iones. La batería Li-Po tiene como característica que puede ser diseñada de muchas maneras para que se pueda adaptar a todo tipo de sistemas. Por esta razón es ampliamente usada en teléfonos inteligentes, computadoras portátiles, cámaras, drones, vehículos eléctricos y básicamente en cualquier sistema donde se necesite de una batería [5].

Las ventajas que tienen las baterías Li-Po son una gran capacidad de almacenamiento, son ligeras y con poco volumen, no tienen efecto memoria, cuentan con una gran estabilidad térmica, pueden soportar altas corrientes y gracias a su electrolito en gel da como resultado que sus celdas sean más delgadas y flexibles [6]-[7].

Es muy importante tener en cuenta las precauciones al cargar una batería Li-Po, ya que como estas utilizan un electrolito volátil puede incendiarse o explotar durante su proceso de carga. Un aspecto muy importante en el proceso de carga de las baterías Li-Po es que sus celdas pueden presentar diferentes voltajes tanto en la descarga como en la carga. Por esta razón se deben balancear todas las celdas de la batería, de esta manera se estará prologando su vida útil y la batería se estará cargando a su máxima capacidad de una forma correcta.

1.1.1 Características de una batería Li-Po

Al utilizar baterías Li-Po se debe tener en cuenta que dependiendo el modelo de la batería existen algunas características generales que pueden ayudar a saber cómo utilizarlas de una manera correcta, además permite conocer las precauciones que se deben tener en cuenta para no provocar una explosión de la batería [8]. Estas características son:

Capacidad de almacenamiento: Es la cantidad de energía eléctrica que se puede almacenar en la batería y suele medirse en Amperios hora (Ah). Por ejemplo, si una

batería tiene una capacidad de 5000 mA significa que puede dar hasta 5000 mAh de forma constante por una hora.

Tasa de descarga: Es la cantidad de energía máxima a la que se puede descargar una batería de forma segura por un periodo de tiempo determinado. Esta característica viene en la batería o en sus hojas de datos, regularmente viene marcada por un número y la letra C. Para saber cuál es el máximo de energía que puede entregar de manera segura, se hace una operación entre la capacidad de almacenamiento y la tasa de descarga [8].

Tasa de carga: Esta característica no se indica en la mayoría de las baterías, pero debe tomarse en cuenta para no dañar la batería, ya que existe una limitante con respecto a la cantidad de energía a la que podemos cargar nuestra batería. Si la batería no indica esta característica debe cargarse a 1C, lo que equivale a cargarla al máximo de su capacidad, sin embargo, en algunos casos es posible cargar las baterías hasta 2C o 3C dependiendo del cargador, en la actualidad existen cargadores de carga rápida que pueden utilizar cargas de hasta 4C [8].

Voltaje por celda: El voltaje nominal por celda es de 3.7V y cuando está completamente puede llegar a los 4.2 V. Es muy importante que la celda nunca se cargue por encima de este valor, ya que existe el riesgo de explosión o liberación de gases por sobrecarga. Para que la celda no presente una sobre descarga y pueda dañar la batería no debe descargarse a menos de 3V y en algunas baterías pueden descargarse hasta los 2.5V.

Numero de Celdas de la batería: El número de celdas se indica en la batería con un dígito que indica el número de celdas seguido de la letra S. Las celdas de la batería pueden estar conectadas en serie, en paralelo o en serie y paralelo, pero en la mayoría de las baterías están conectadas en serie. Si las celdas están en serie estas se sumarán y darán el voltaje total de la batería.

En la figura 1.1[9] se muestra una batería Li-Po con las características ya mencionadas.



Figura 1. 1. Batería Li-Po [9].

1.2 Carga de una batería Li-Po

El proceso de carga es muy importante en las baterías Li-Po, por esta razón en la actualidad se han desarrollado distintas formas de cargar una batería Li-Po. El dispositivo que se encarga de este proceso es el cargador, ya que este tiene que controlar la energía que suministra a la batería. Todos los cargadores tienen como principal característica suministrar energía a la batería y la manera en que lo hará será que método de carga utilice. Este método se debe ajustar de acuerdo con los parámetros de la batería para que sea más eficiente. Cada batería Li-Po tiene sus parámetros de carga como por ejemplo la corriente máxima que se puede suministrar, el tiempo de carga, el voltaje máximo que soporta. Estos parámetros dependen en gran medida del número de celdas que tenga la batería [8].

1.3 Métodos de carga de una batería

La función principal de los métodos de carga es incrementar el estado de carga (SOC por sus siglas en ingles) de las baterías Li-Po. Para este proceso se debe tener en cuenta las especificaciones como el rendimiento de la batería, tiempo de carga, protección de la batería contra sobrecargas y sobre descargas. Todo esto para incrementar el rendimiento y la vida útil de la batería [10].

1.3.1 Corriente constante

Este método consiste en cargar la batería suministrándole corriente constante. En la etapa inicial de la carga este método limita la corriente y de esta manera previene las sobre corrientes para la batería. En este método el voltaje de carga depende de

la corriente de carga, una de las ventajas de este método es que se puede calcular muy fácil el tiempo de carga y el SOC [10].

1.3.2 Voltaje constante

Este método carga la batería aplicando un voltaje constante en sus terminales. Durante la etapa inicial de carga, la corriente de carga es alta y conforme el voltaje de la batería va alcanzando el voltaje establecido del cargador, la corriente de carga disminuye. Este método de carga se utiliza en aplicaciones que requieren períodos de carga prolongados para alcanzar la carga completa. Una de sus desventajas es que como sus usos son de una carga prolongada esto puede causar aumentos de temperatura y degradación de la vida útil de la batería [10].

1.3.3 Corriente por goteo o carga lenta

Este método consiste en proporcionar a la batería una carga con corriente por pulsos o en cortos periodos de tiempo. Está diseñado para compensar el auto descarga de la batería. Este método puede alcanzar la carga completa de la batería utilizando una corriente de carga muy pequeña. Esto se usa típicamente para arrancar o iniciar métodos de carga, pero no es adecuado para baterías que son fáciles de dañarse por sobrecargas [10].

1.3.4 Corriente-Voltaje constante

Uno de los métodos para cargar una batería Li-Po y el que usa la mayoría de los cargadores es el método de corriente constante-voltaje constante (CC-VC) [11], [3]. Este proceso de carga se divide en tres etapas, estas son:

- Corriente por goteo: Si el voltaje de la celda de la batería está por debajo de un voltaje determinado, el cargador empieza a operar en modo corriente por goteo, en el cual la corriente suministrada no es constante, si no por pulsos o por cortos periodos de tiempo.

- Corriente Continua: Después de que la batería alcanza un voltaje mayor al de sobre descarga, se comienza a suministrar corriente de manera constante, por lo que se almacena corriente rápidamente dentro de la batería.

• Voltaje Constante: Cuando el voltaje de la batería es 4.1V antes de que la batería se cargue completamente, la corriente comienza a disminuir poco a poco hasta que el voltaje de la batería se establece en 4.2V. Una vez alcanzado este voltaje la la celda de la batería está completamente cargada.

En la Figura 1.2 se ve el proceso de carga usando el método de corriente constante-voltaje constante.

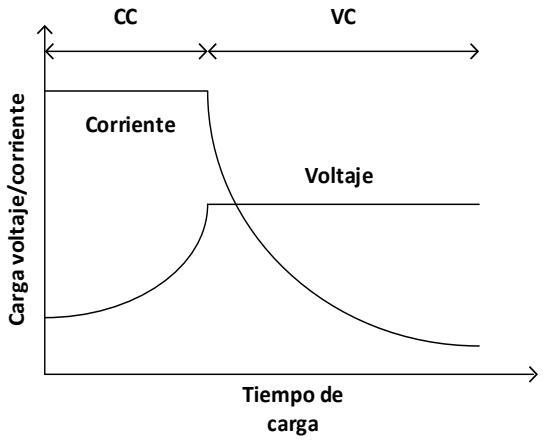


Figura 1. 2. Método de carga CC-VC.

1.3.5 Carga por pulsos

Este método de carga consiste en aplicar periódicamente una corriente pulsada a la batería. Esto permite que el voltaje de la batería se vuelva más estable. En este método de carga, es importante tener en cuenta la frecuencia de carga, el pico y el ancho del pulso, porque están relacionados con la capacidad y el tiempo de carga. Este método puede reducir la polarización para evitar que la batería aumente su temperatura. La principal desventaja de este método de carga es su complejidad de aplicación [10], [12].

1.4 Balance de celdas

Una característica para tomar en cuenta en las baterías Li-Po es que pueden presentar diferencias de voltaje entre sus celdas. Esto se debe a que no todas las celdas son iguales, ya que estas tienen características independientes como el estado de carga, las tasas de descarga, la capacidad, la impedancia y la temperatura. Es por eso que al estar conectadas en serie se pueden desbalancear

tanto en el proceso de carga y descarga. Por esta razón se tiene que implementar un sistema de balance, porque si no se aplicara al final de la carga de la batería se puede medir el voltaje total de la batería, pero los voltajes de las celdas pueden ser diferentes. Para solucionar este problema y extender la vida útil de la batería se tiene que implementar un balance de celdas adecuado con el proceso de carga [13].

1.5 Métodos de balance

El balance de celdas tiene una gran importancia en el proceso de carga de las baterías Li-Po, ya que el balance consigue mejorar el rendimiento y asegura que las celdas se carguen de manera segura hasta su valor de carga máxima y en la descarga entreguen la máxima energía posible. Utilizar un balance de celdas adecuado garantiza el aprovechamiento máximo de la energía posible de una batería, además de que evita situaciones peligrosas, como una sobrecarga de la batería y esto puede hacer que explote [14]-[15].

Dentro del balance de celdas hay dos maneras de realizarlo y estas se diferencian de acuerdo con su principio de funcionamiento. Por un lado, tenemos a los métodos pasivos que se basan en balancear los voltajes de las celdas a través de la disipación de energía de las celdas con mayor carga y por otro lado están los métodos activos que funcionan en transferir la energía de las celdas con más carga a las que tienen una menor carga. En [16]-[19] se hace una comparación entre los métodos de balance tanto activo y pasivo, también se explica en grandes rasgos algunas topologías generales para el balance de celdas, algunas de estas topologías se muestran en la Figura 1.3.

En la Figura 1.4 se muestra la diferencia de usar métodos pasivos y activos en el proceso de balance de celdas. Se puede ver la diferencia de voltajes que hay después del balance entre los dos métodos, ya que en los métodos pasivos se disipa la energía excesiva de las celdas mientras en los métodos activos se transfiere la energía de la celda con mayor carga a la de menor carga por lo cual no hay una pérdida de energía.

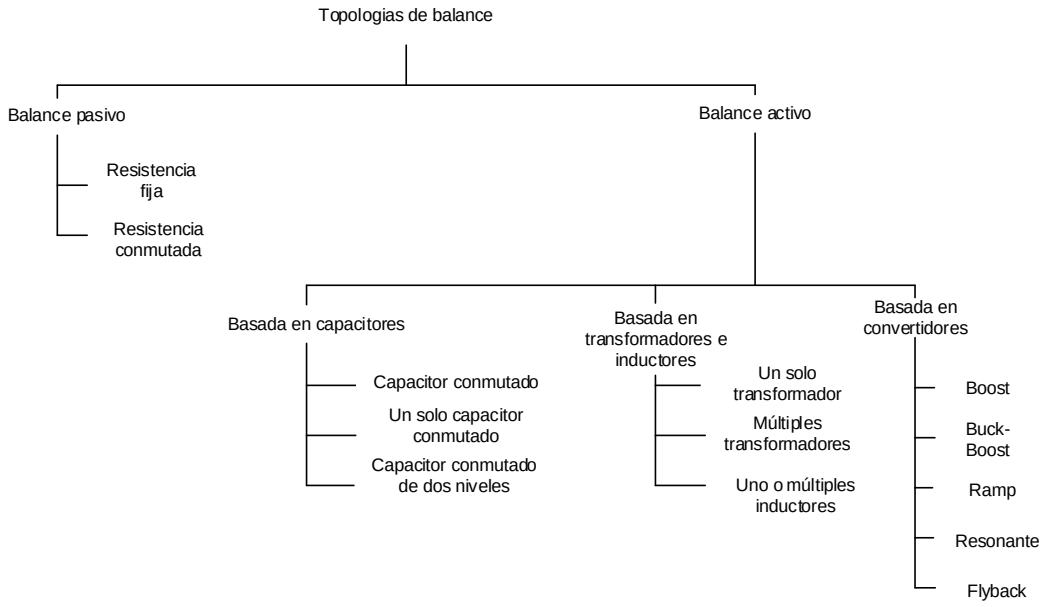


Figura 1. 3. Topologías de balance de celdas [17].

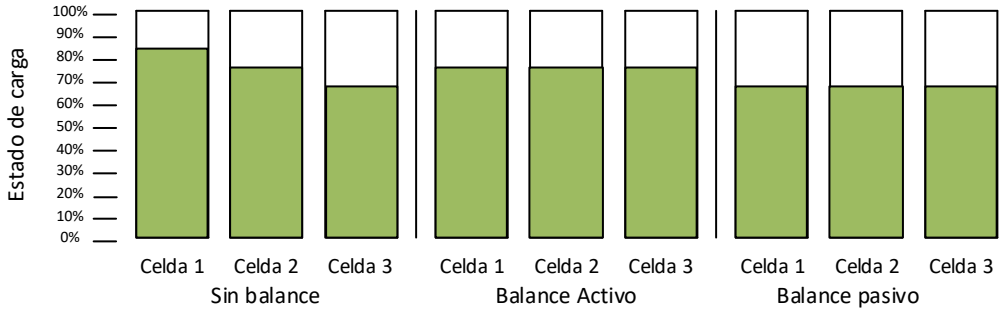


Figura 1. 4. Comparación entre balance activo y pasivo [17].

1.5.1 Balance Pasivo

Los balances pasivos se caracterizan por ser sencillos y fáciles de implementar. Su funcionamiento es disipar la energía de las celdas con mayor energía a través de una resistencia [16]. Los balances pasivos son principalmente utilizados en sistemas de baja potencia, ya que al disipar la energía excesiva en la celda se genera calor y con esto se pueden producir corrientes muy altas. Además, si se implementara en sistemas de alta potencia se pueden presentar una pérdida de energía muy alta y las corrientes serían muy difíciles de controlar [17].

La manera más común y sencilla de realizar el balance de celdas utilizando un método pasivo es utilizando una o varias resistencias como elemento de disipación

de energía. Esta manera de realizar el balance es muy simple y fiable, aunque muy poco eficiente por la gran pérdida de energía. Hay dos topologías principales de balance de celdas con este método, el primero utiliza una resistencia fija en la celda de la batería y la segunda es con una resistencia conmutada [16]. En la Figura 1.5(a) se muestra la topología más simple del método pasivo, ya que no necesita ningún control y como se ha mencionado se implementa con una simple resistencia por cada celda. La topología de resistencias conmutadas se muestra en la Figura 1.5(b) esta es más compleja por que se necesitan señales para el control y encendido de los interruptores, ya que se tiene que estar monitoreando los voltajes de las celdas para saber que interruptores se deben encender [16].

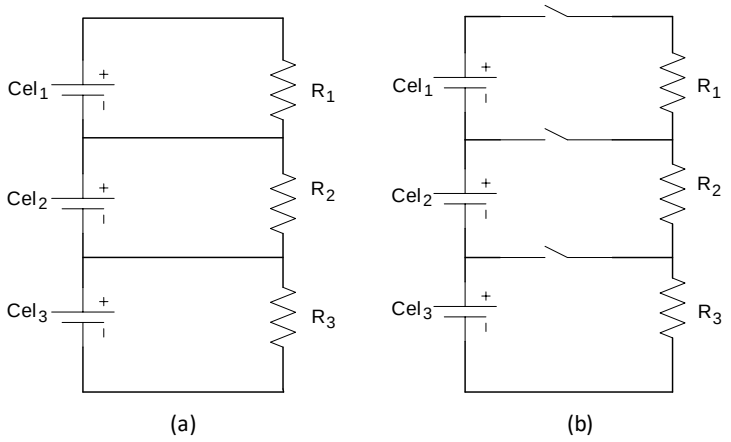


Figura 1. 5. Balances pasivos: (a) Balance con resistencia, (b) Balance con resistencia conmutada en [16].

Los métodos de balance pasivo son más sencillos y baratos para realizar el balance de celdas en comparación con los métodos activos, pero como se ha mencionado son recomendados solo para aplicaciones de baja potencia por su baja eficiencia y además de que el balance de celdas es lento [17]. Son considerados un buen método en cuestión de la protección de la batería ya que nunca permitirá una sobrecarga de las celdas, pero debido a sus desventajas en eficiencia y tiempo de balance, es recomendable buscar otras alternativas ya que uno de los objetivos que se busca siempre en un cargador de este tipo de baterías es que realice un balance rápido y tenga una alta eficiencia en la energía. Por esta razón los métodos pasivos no son considerados una buena opción [20].

1.5.2 Balance Activo

Los métodos activos buscan solucionar el problema de la alta perdida de energía y poca eficiencia de los métodos pasivos. El funcionamiento de estos es transferir la energía de las celdas que tienen un mayor voltaje a las que tienen un menor voltaje. Un balance más rápido y una alta eficiencia son las ventajas de utilizar estos métodos, sin embargo, en comparación con los métodos pasivos son más costosos y difíciles de implementar. En [21]-[22] se hace una comparación entre las principales topologías de balance activo, estas topologías se pueden clasificar dependiendo que componentes se utilicen. Para realizar el balance con un método activo se pueden utilizar capacitores, inductores, transformadores y convertidores de potencia.

1.5.2.1 Balance con capacitores

La forma en que el balance se realiza con capacitores es utilizando las diferencias de voltaje que hay entre las celdas para así poder cargarlas y descargarlas. Una de las ventajas de utilizar las topologías de balance con capacitores es que no se requiere un control complejo.

En la actualidad se ha desarrollado diferentes topologías que utilizan capacitores para realizar el balance de celdas. En la Figura 1.6 se muestra la topología básica de balance con capacitores, esta topología es la de un capacitor conmutado, esta topología es las más simple y lenta al realizar el balance [22]. Pero en [20] se presentan dos topologías para una bateria Li-Po de 6 celdas que modifican la topología básica del capacitor conmutado, en una topología se agrega un capacitor extra como se muestra en la Figura 1.7(a) y en otra se agregan más interruptores como se muestra en la Figura 1.7(b), estas modificaciones a la topología convencional mostro un balance más rápido sin embargo en la eficiencia no hubo una mejora respecto a la topología básica del capacitor conmutado.

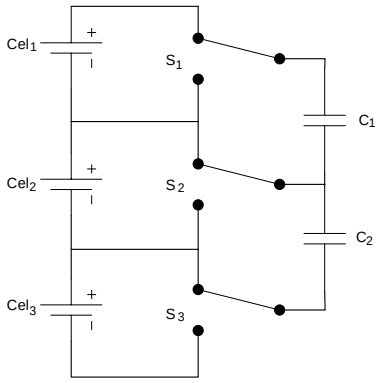


Figura 1. 6. Balance capacitor conmutado en [22].

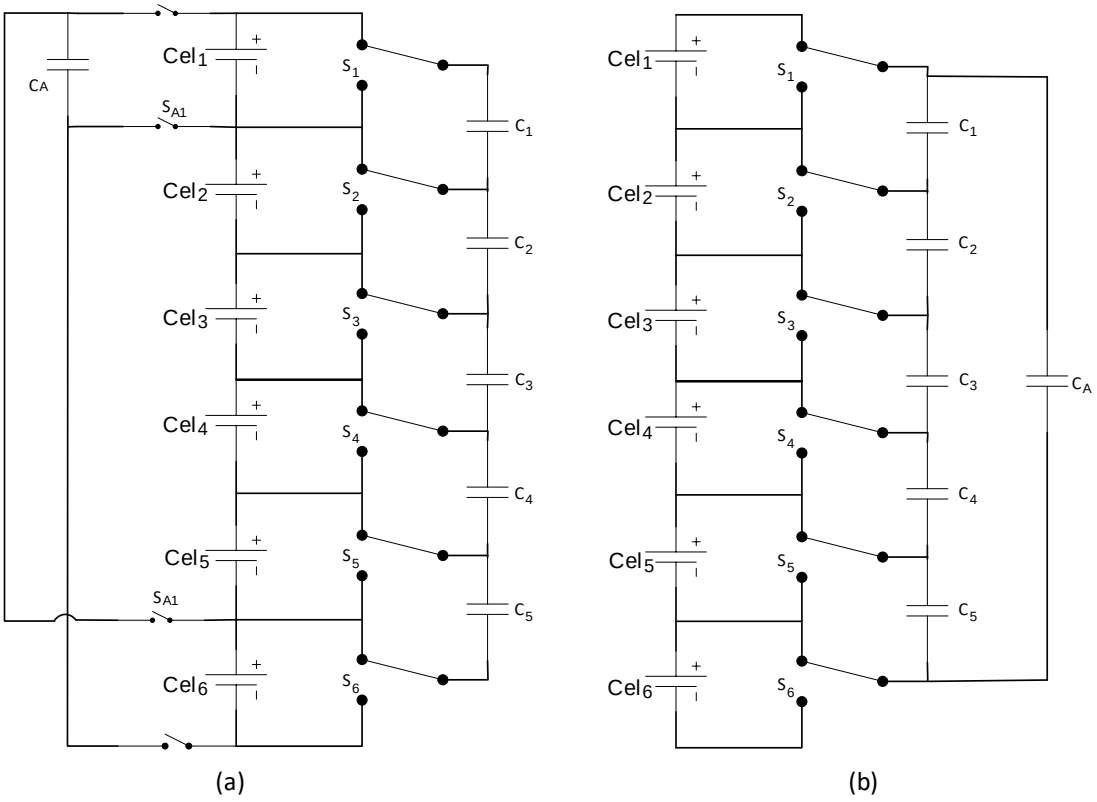


Figura 1. 7. (a) Balance con interruptores extra, (b) Balance con capacitor extra en [20].

1.5.2.2 Balance con inductores

El balance con inductores funciona en conectar la celda con mayor voltaje a un inductor para que se cargue, después se desconecta esa celda y se conecta a una que tenga un voltaje menor. De esta manera se realiza la transferencia de energía utilizando un inductor. El balance con inductores y capacitores es muy parecido, sin embargo, la ventaja que tiene utilizar inductores es que es más rápido realizando el

balance, aunque un punto a considerar es que el control de los interruptores es más complejo ya que por el inductor se pueden producir cambios en la corriente [14]. En [4] se presentan algunas de las topologías generales que utilizan inductores, la topología básica es la que utiliza un solo inductor cómo en [16], está se muestra en la Figura 1.8. El utilizar un solo inductor tiene como ventajas un balance más rápido, pero a cambio se utilizan muchos interruptores y el control puede ser complejo [4]. En la literatura también se presentan topologías que utilizan múltiples inductores cómo en [23], que lo que buscan es realizar el balance más rápido ya que buscan un balance simultáneo entre las celdas, una de las ventajas de utilizar varios inductores es que disminuye en gran medida el número de interruptores.

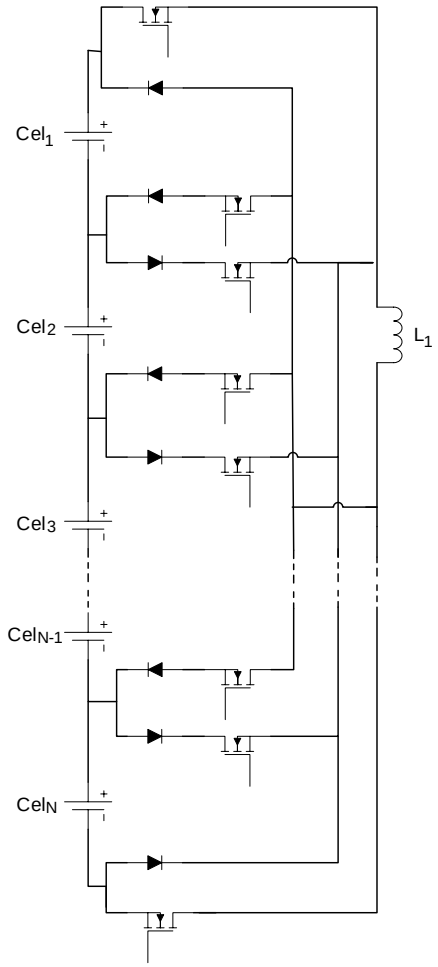


Figura 1. 8. Topología de balance con un solo inductor en [16].

1.5.2.3 Balance con transformadores

El balance de celdas con transformadores a diferencia de los métodos que utilizan capacitores o inductores no transmiten la energía entre las celdas, sino que lo hacen entre el paquete completo y una celda o viceversa.

En [16] se muestra la topología de balance con un solo transformador, o también llamada como transformador conmutado, esta topología se muestra en la Figura 1.9. Como se ha mencionado esta topología permite transferir la energía desde el paquete de celdas a la celda con menor voltaje o de la celda a el paquete completo a través del transformador y las señales de control.

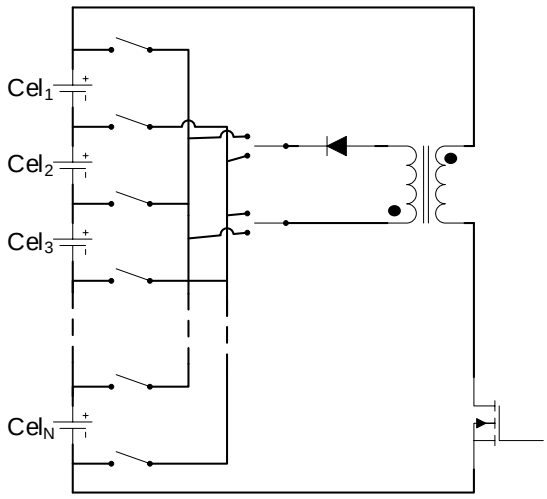


Figura 1. 9. Topología de balance con transformador conmutado en [16].

En la Figura 1.10 se muestra la topología de balance propuesto en [24] para tres celdas, aunque se puede implementar para n número de celdas. Esta topología de balance utiliza un transformador de devanado múltiple basado en un convertidor DC-DC forward. Una de las ventajas que tiene el utilizar esta topología es que disminuyen drásticamente el número de interruptores respecto a otras topologías. Esta topología opera para que todas las celdas sean balanceadas simultáneamente, de esta manera esta topología es más rápida respecto a un convertidor forward bidireccional del cual está basado.

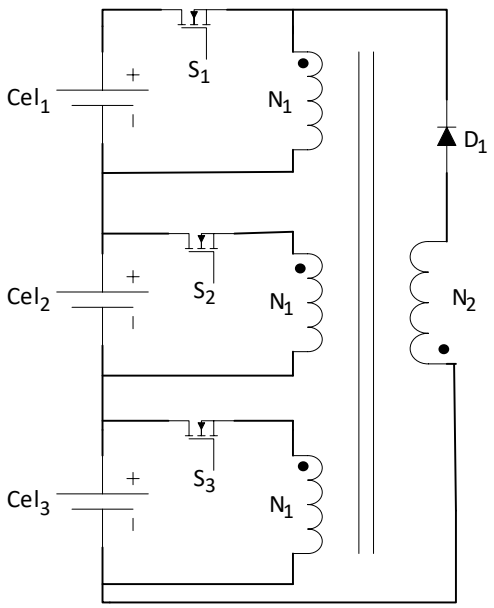


Figura 1. 10. Topología de balance con múltiples transformadores en [24].

1.5.2.4 *Balance con convertidores*

Las topologías de balance que utilizan convertidores de potencia son las más avanzadas actualmente, esto se debe a su alta eficiencia, velocidad y precisión de balance. Se utilizan distintos tipos de convertidores para el balance de celdas, siendo los más importantes el Boost, Buck-Boost, Cúk, Resonant y Flyback [16]. Sin embargo, factores que se tienen que tomar en cuenta es que su funcionamiento e implementación.

1.5.2.4.1 Convertidor Boost

En la Figura 1.11 se muestra la topología de balance que utiliza un convertidor Boost, este funciona cargando la energía excesiva en el inductor paralelo para después transferirla a las otras celdas con las señales de control correspondientes. Con esta topología se pueden realizar algunas modificaciones para hacer más rápido el balance [22].

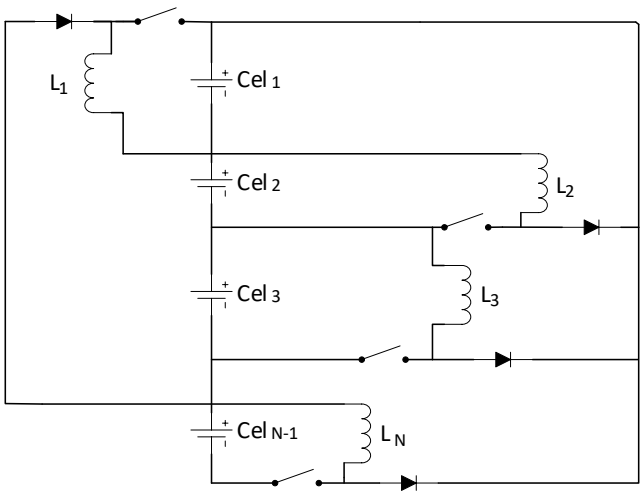


Figura 1. 11. Topología de balance con convertidor Boost.

1.5.2.4.2 Convertidor Buck-Boost

La topología del balance con el convertidor Buck-Boost se muestra en la Figura 1.12. A diferencia del convertidor Boost, el funcionamiento del balance con este convertidor se basa en descargar la celda con mayor voltaje a la celda adyacente, esto lo hace detectando la diferencia de voltaje entre dos celdas adyacentes y las señales de control correspondientes. Este método tiene ventaja por su balance bidireccional, sin embargo, necesita de un proceso de balance inteligente para seleccionar las celdas adecuadas [16].

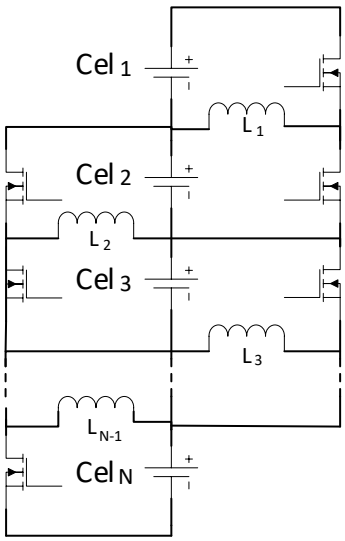


Figura 1. 12. Topología de balance con convertidor Buck-Boost.

1.5.2.4.3 Convertidor Cûk

El balance basado en el convertidor Cûk se utiliza para el flujo de energia bidireccional con control de balance individual que tiene dos interruptores, dos inductores y un capacitor que iguala cada par de celdas adyacentes. La Figura 1.13 muestra la configuración del balance basado en el convertidor Cûk, este funciona transfiriendo la energía de la celda con mayor voltaje a la celda adyacente con menor voltaje y, por lo tanto, la energía excesiva se transfiere a todo el paquete de baterías [16].

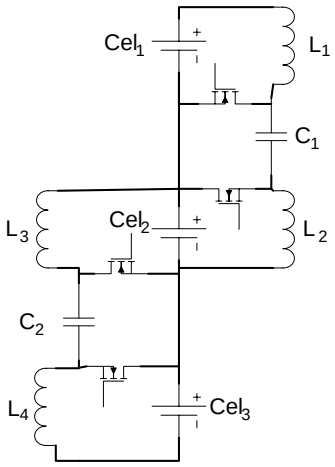


Figura 1. 13. Topología de balance con convertidor Cûk.

1.5.2.4.4 Convertidor Ramp

La topología de balance que utiliza un convertidor Ramp es una versión mejorada del balance con transformador de devanados múltiples. Está compuesto por un transformador de devanados múltiples como se muestra en la Figura 1.14 donde dos celdas adyacentes están conectadas a un devanado secundario del transformador. El funcionamiento del convertidor Ramp es que las celdas impares suministran la corriente para cargar del condensador en el primer medio ciclo y en la segunda mitad del ciclo, las celdas pares pueden recargarse con un capacitor o viceversa dependiendo de la dirección de la corriente en el lado primario del transformador. Este balance es accesible en costo, sin embargo, en cuanto tenga menos embobinados, el diseño es más complejo [16].

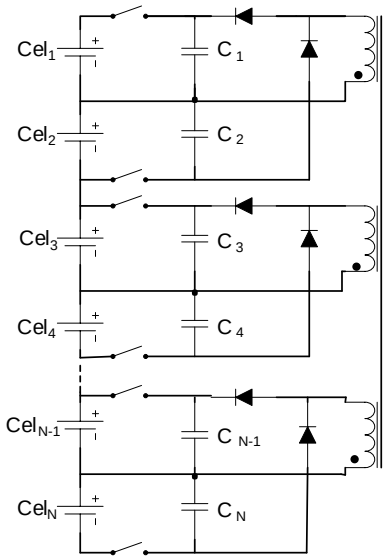


Figura 1. 14. Topología de balance con convertidor Ramp.

1.5.2.4.5 Convertidor Resonante

El balance que utiliza un convertidor resonante se muestra en la Figura 1.15 este utiliza un circuito resonante para encender los interruptores y transferir la energía desde la celda con mayor voltaje a la celda con menor voltaje en lugar de un control. Esto lo hace tomando la diferencia de voltaje entre dos celdas adyacentes. El balance con el convertidor resonante realiza el balance de una manera rápida debido a la disminución de pérdidas por conmutación, sin embargo, su costo de diseño y dificultad de implementación son altos [16].

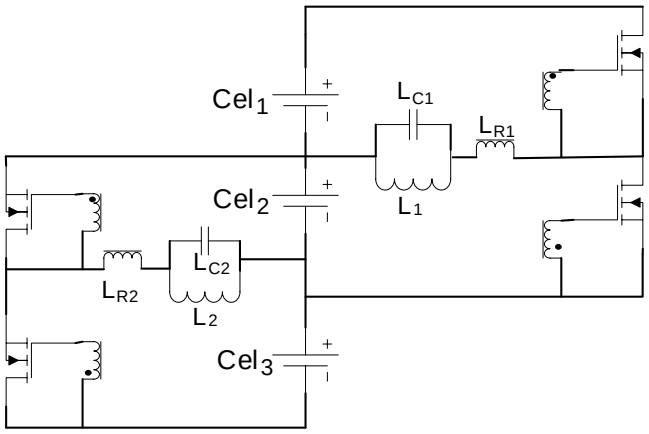


Figura 1. 15. Topología de balance con convertidor Resonante.

1.5.2.4.6 Convertidor Flyback

En [24] se propone una topología basada en un convertidor Flyback con balance bidireccional de entrada y salida de múltiples devanados como se muestra en la Figura 1.16.

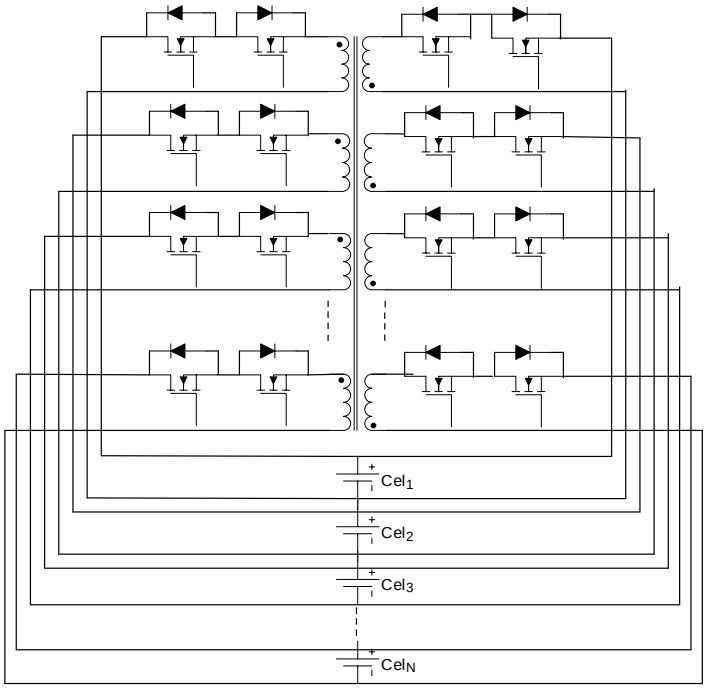


Figura 1. 16. Topología de balance con convertidor Flyback en [25].

Esta puede realizar el balance de cualquier celda del paquete de la batería a cualquier celda también, además tiene la ventaja de un flujo de energía de balance flexible. Esta topología utiliza una estrategia de control de la participación en tiempo compartido en el balance según el estado inicial de carga (SOC) de las celdas, con esto se puede resolver el problema de la transferencia de energía innecesaria y simplificar la lógica de control. Además, esta topología nos permite eliminar pérdidas de energía en los componentes del circuito.

1.6 Conclusión topologías de balance

Después de analizar las topologías de balance se observó que los métodos pasivos son muy poco eficientes, realizan un balance lento respecto a los métodos activos y sólo es efectivo en la carga. Sin embargo, son los más simples de implementar y

no requieren un control complejo, hablando de costos son los más baratos y respecto a tamaño no requieren mucho espacio.

Los métodos de balance activo son más eficientes ya que no existe una pérdida de la energía en el proceso de balance. Los métodos que utilizan capacitores son los más simples de implementar, en control, no son muy grandes y son los más baratos en comparación con los otros métodos activos. Además, aunque la velocidad de balance no es muy rápida en comparación con los otros métodos activos, son muy eficientes.

Los métodos de balance que utilizan inductores son muy eficientes y consiguen el balance de celdas en muy poco tiempo en comparación a otros métodos activos. A cambio se tiene que desarrollar un buen control, ya que es complejo por la corriente y debido a la alta frecuencia de conmutación requieren filtros para eliminar el ruido.

Los métodos de balance que utilizan transformadores son complejos en implementar y además requieren un control más robusto, tienen problemas de magnetización, por lo que son menos eficientes, tienen un tamaño muy grande y la velocidad de balance no es tan alta como con inductores, ya que utilizan equilibrado de batería a celda o de celda a batería [14].

Los métodos de balance que utilizan convertidores de potencia proponen mejoras respecto a los anteriores métodos activos en cuanto a velocidad de balance, eficiencia y precisión de balance, pero la complejidad de control e implementación es mucho mayor respecto a los otros métodos activos, además de la necesidad de conocimientos muy avanzados para entender correctamente el funcionamiento de cada método [14].

Capítulo 2

Balance de celdas propuesto

En el presente capítulo se presenta la topología de balance propuesta. Se mencionan sus características y sus modificaciones respecto a las topologías que hay en la literatura. Se explica la técnica de balance propuesta cómo también la metodología en que se realizará el balance y la carga, además se analizan sus modos de operación. Y se implementa un control para controlar la corriente durante el proceso de carga.

2.1 Topología de balance

Después de analizar los diferentes tipos de balances de celdas, se optó por un balance activo que utiliza un solo inductor. Esta topología está basada en topologías de balance que utilizan un solo inductor que se presentan en [25]-[27]. Esta topología tiene como ventaja que permite la carga y descarga de cada celda de la batería, ya sean adyacentes o no. Además de que el único elemento que transfiere la energía entre las celdas es un elemento inductivo, esto reduce el número de componentes que se encargan de transferir la energía entre las celdas, pero a cambio de esto aumenta en gran medida el número de interruptores, ya que el circuito requiere de dos diodos y dos MOSFET's por cada celda. Debido a esta situación se debe tener cuidado con las señales de control de los MOSFET's. Como modificación a esta topología de balance se le agrega un MOSFET y un diodo conectado a una fuente de voltaje, la cual estará suministrando energía a las celdas que lo necesiten como se muestra en la Figura 2.1. Con esta modificación a esta topología de balance se busca lograr que el balance de las celdas sea más rápido y que mientras se realiza el balance también se carguen las celdas.

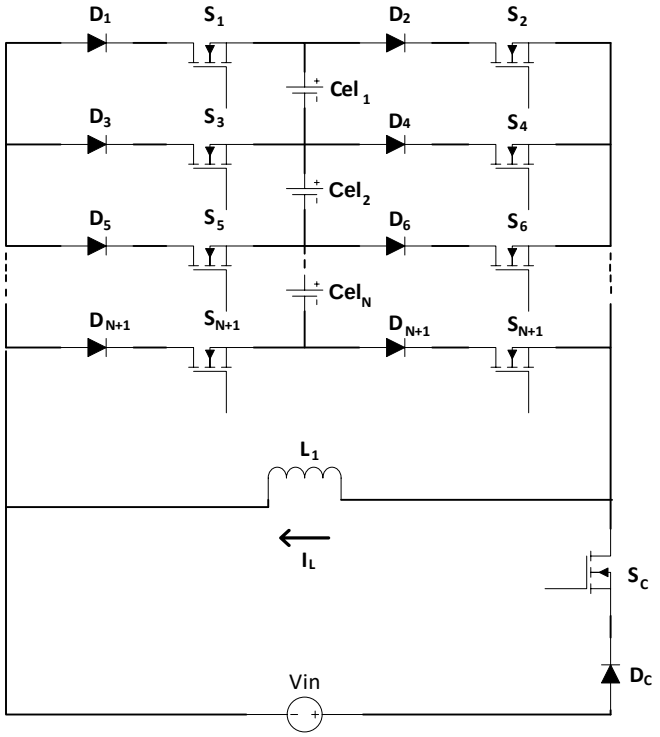


Figura 2. 1. Topología de balance con cargador propuesta.

Esta topología de balance de celdas con cargador está diseñada para una batería Li-Po de 7 celdas como se muestra en la Figura 2.2. Esta cuenta con 16 MOSFET's con sus respectivos diodos que se encargar en transferir la energía entre las celdas y uno más para activar la fuente de voltaje. Los MOSFET's que se encargaran de transferir la energía entre las celdas se etiquetan de S_1 como el MOSFET superior del lado izquierdo a S_{16} como el MOSFET inferior del lado derecho. Y el que se encarga de activar o desactivar la fuente de voltaje se etiqueta como S_C. De esta manera se estarán generando un total de 17 señales de control para poder realizar el balance y la carga de la batería.

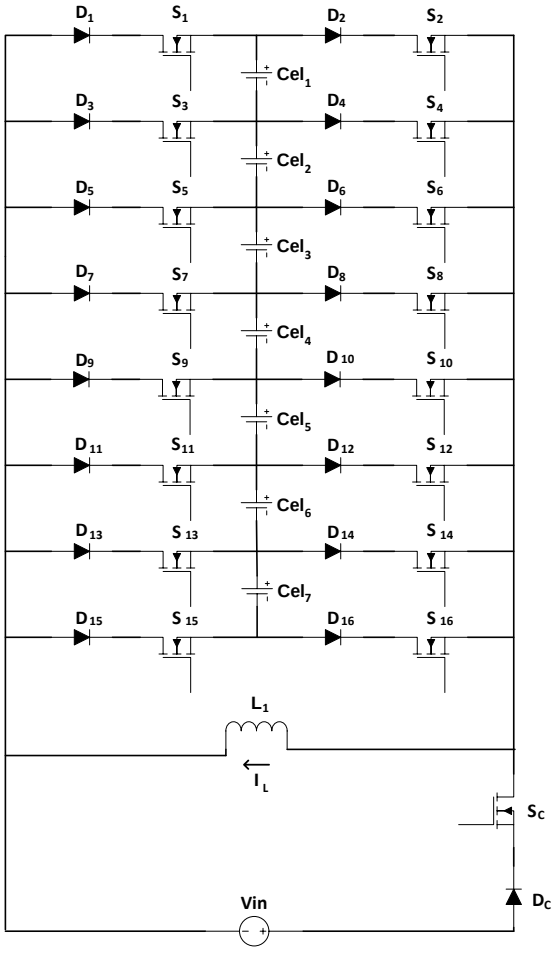


Figura 2. 2. Topología de balance con cargador para batería Li-Po de 7 celdas.

2.2 Proceso de balance

Para realizar el balance de celdas se propuso un balance diferente a los propuestos en [26]-[27] que utilizan también la topología de balance activo con un solo inductor.

Los procesos de balance que implementan consisten en descargar solo una celda y transferir la energía a otra celda por cada modo de operación. Con el algoritmo de balance que se propone se busca un balance más rápido respecto a los ya mencionados, ya que en cada modo de operación se pueden descargar y cargar más de una celda a la vez. Este algoritmo de balance consiste en hacer combinaciones de las celdas adyacentes de la batería. La batería Li-Po es de 7 celdas, así que se propuso hacer las combinaciones de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 celdas. Al hacer las combinaciones así se obtienen un total de 27 combinaciones, a cada uno se le asigna un caso del 1 al 27. En la tabla 2.1 se muestran todas las combinaciones obtenidas.

Tabla 2. 1. Combinaciones de celdas propuestos para balance.

Combinación de celdas	*Caso*
Cel_1	1
Cel_2	2
Cel_3	3
Cel_4	4
Cel_5	5
Cel_6	6
Cel_7	7
Cel_1Cel_2	8
Cel_2Cel_3	9
Cel_3Cel_4	10
Cel_4Cel_5	11
Cel_5Cel_6	12
Cel_6Cel_7	13
$Cel_1Cel_2Cel_3$	14
$Cel_2Cel_3Cel_4$	15
$Cel_3Cel_4Cel_5$	16
$Cel_4Cel_5Cel_6$	17
$Cel_5Cel_6Cel_7$	18
$Cel_1Cel_2Cel_3Cel_4$	19
$Cel_2Cel_3Cel_4Cel_5$	20
$Cel_3Cel_4Cel_5Cel_6$	21
$Cel_4Cel_5Cel_6Cel_7$	22
$Cel_1Cel_2Cel_3Cel_4Cel_5$	23
$Cel_2Cel_3Cel_4Cel_5Cel_6$	24
$Cel_3Cel_4Cel_5Cel_6Cel_7$	25
$Cel_1Cel_2Cel_3Cel_4Cel_5Cel_6$	26
$Cel_2Cel_3Cel_4Cel_5Cel_6Cel_7$	27

A estas combinaciones se les calcula el error, tomando como referencia al voltaje al cual las baterías deben balancearse. Este voltaje se establece cómo voltaje de referencia. Al tener todos los errores se obtiene el error máximo y el error mínimo ya que la combinación de celdas que tenga el error máximo será la que se descargara y la que tenga el error mínimo se cargara. De esta manera se tienen 27 casos para descarga y 27 casos para carga. En la tabla 2.2 se muestran las combinaciones de las celdas con los casos de descarga y carga, así como los MOSFET´s que deben activarse.

Tabla 2. 2. Combinaciones de celdas para carga y descarga.

Combinación de celdas	*Caso descarga*	*MOSFET´s activos*	*Caso carga*	*MOSFET's activos*
Cel_1	1	S_2, S_3	1	S_1, S_4
Cel_2	2	S_4, S_5	2	S_3, S_6
Cel_3	3	S_6, S_7	3	S_5, S_8
Cel_4	4	S_8, S_9	4	S_7, S_{10}
Cel_5	5	S_{10}, S_{11}	5	S_9, S_{12}
Cel_6	6	S_{12}, S_{13}	6	S_{11}, S_{14}
Cel_7	7	S_{14}, S_{15}	7	S_{13}, S_{16}
Cel_1Cel_2	8	S_2, S_5	8	S_1, S_6
Cel_2Cel_3	9	S_4, S_7	9	S_3, S_8
Cel_3Cel_4	10	S_6, S_9	10	S_5, S_{10}
Cel_4Cel_5	11	S_8, S_{11}	11	S_7, S_{12}
Cel_5Cel_6	12	S_{10}, S_{13}	12	S_9, S_{14}
Cel_6Cel_7	13	S_{12}, S_{15}	13	S_{11}, S_{16}
$Cel_1Cel_2Cel_3$	14	S_2, S_7	14	S_1, S_8
$Cel_2Cel_3Cel_4$	15	S_4, S_9	15	S_3, S_{10}
$Cel_3Cel_4Cel_5$	16	S_6, S_{11}	16	S_5, S_{12}
$Cel_4Cel_5Cel_6$	17	S_8, S_{13}	17	S_7, S_{14}
$Cel_5Cel_6Cel_7$	18	S_{10}, S_{15}	18	S_9, S_{16}
$Cel_1Cel_2Cel_3Cel_4$	19	S_2, S_9	19	S_1, S_{10}
$Cel_2Cel_3Cel_4Cel_5$	20	S_4, S_{11}	20	S_3, S_{12}
$Cel_3Cel_4Cel_5Cel_6$	21	S_6, S_{13}	21	S_5, S_{14}
$Cel_4Cel_5Cel_6Cel_7$	22	S_8, S_{15}	22	S_7, S_{16}
$Cel_1Cel_2Cel_3Cel_4Cel_5$	23	S_2, S_{11}	23	S_1, S_{12}
$Cel_2Cel_3Cel_4Cel_5Cel_6$	24	S_4, S_{13}	24	S_3, S_{14}
$Cel_3Cel_4Cel_5Cel_6Cel_7$	25	S_6, S_{15}	25	S_5, S_{16}
$Cel_1Cel_2Cel_3Cel_4Cel_5Cel_6$	26	S_2, S_{13}	26	S_1, S_{14}
$Cel_2Cel_3Cel_4Cel_5Cel_6Cel_7$	27	S_4, S_{15}	27	S_3, S_{16}

2.3 Estados de operación

La topología propuesta tendrá 4 estados de operación durante el proceso de balance y carga de las celdas. En la tabla 2.3 se muestran estos modos de operación y la acción que realiza cada uno.

Tabla 2. 3. Estados de operación topología propuesta.

Estado de operación	*Acción*
Estado 1	Descarga de las celdas
Estado 2	Carga de las celdas
Estado 3	Carga desde fuente de voltaje
Estado 4	Fin de proceso de carga y balance

Como se muestra en la tabla 2.3 en el estado de operación 1 se descargan la combinación de celdas que el algoritmo de balance haya detectado con el error máximo como se muestra en la Figura 2.3 (a). El estado de operación 2 como lo muestra la tabla 2.3 es el modo donde se cargará la combinación de celdas que el algoritmo de balance haya escogido como el error mínimo como se muestra en la Figura 2.3 (b). Cómo se ha mencionado esta topología permite la carga y descarga de las combinaciones ya sean adyacentes o no.

El estado de operación 3 como lo muestra la tabla 2.3 será cuando el MOSFET que activa la fuente de voltaje cargue el inductor para que esté transfiera energía a las celdas que lo necesiten como se muestra en la Figura 2.4 (a). El estado de operación 4 como se muestra en la tabla 2.3 es cuando el proceso de carga y balance ha concluido, en este modo de operación se activan los MOSFET's inferiores de la topología asignados como MOSFET's de libre circulación para que de esta manera se pueda descargar el inductor como se muestra en la Figura 2.4 (b).

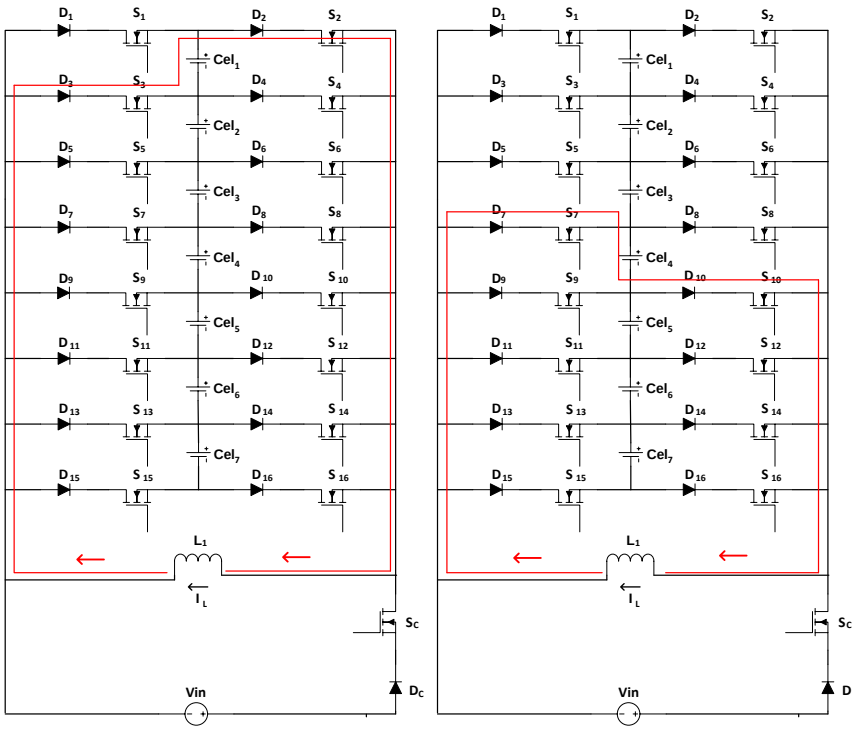


Figura 2. 3. (a) Estado de operación 1, (b) Estado de operación 2.

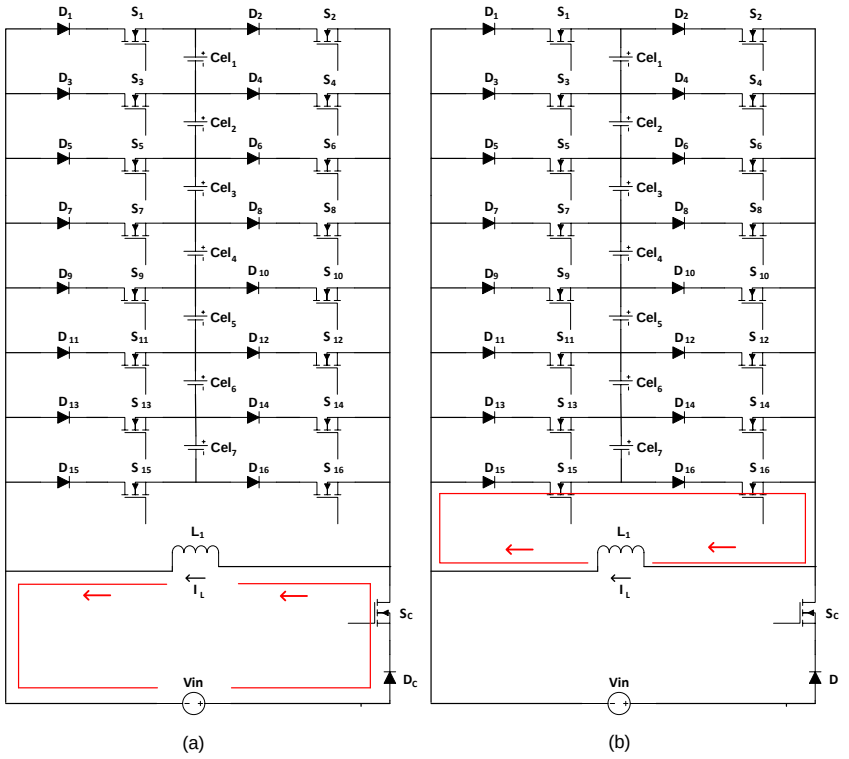


Figura 2. 4. (a) Estado de operación 3, (b) Estado de operación 4.

2.4 Etapas del cargador

Se propone que la topología propuesta realice el proceso de balance y carga en 3 etapas. En estas etapas se estará realizando la descarga y carga de las celdas, cómo también la etapa donde se activa la fuente de voltaje estará suministrando energía a las celdas a través del inductor. Las etapas se generan con un contador y una señal PWM. Durante el proceso de balance y carga este contador ira de 0 a 2 como se puede ver en la Figura 2.5. En la tabla 2.4 se muestra qué modo de operación se activará de acuerdo con el valor de la señal generada.

Tabla 2. 4. Etapas de cargador y modo de operación correspondiente.

Valor de señal	*Estado de operación*
0	Estado 1
1	Estado 2
2	Estado 3
3	Estado 4

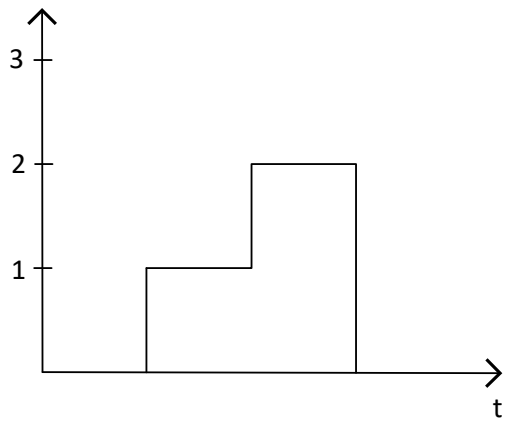


Figura 2. 5. Etapas del cargador durante el proceso de carga y balance.

Se ha establecido una condición en el proceso de balance y carga de la batería Li-Po, esta condición se llevará a cabo si se presenta la situación en que, si el voltaje de las celdas es superior al voltaje de referencia por el número de celdas de la bateria, solo se llevaran a cabo los modos de operación de carga y descarga de las celdas. De esta manera la señal que selecciona qué estado de operación se activa solo podrá tomar valores de 0 a 1 como se muestra en la Figura 2.6.

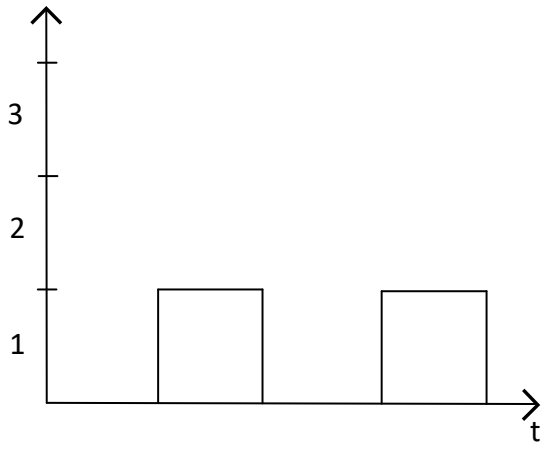


Figura 2. 6. Etapas de carga y descarga de celdas.

Todo esto se realizará durante el proceso de balance y carga, pero cuando las celdas estén completamente balanceadas se implementa una condición de paro. Está condición de paro depende de los errores máximos y mínimos. Cuando estos errores estén en un rango establecido la señal que genera las etapas tomara el valor de 3 cómo se puede ver en la Figura 2.7. Cuando está señal tenga este valor se detendrá todo el proceso de balance y carga. En esta etapa se dejarán activos los MOSFET's inferiores de la topología o de libre circulación para que el inductor se descargue.

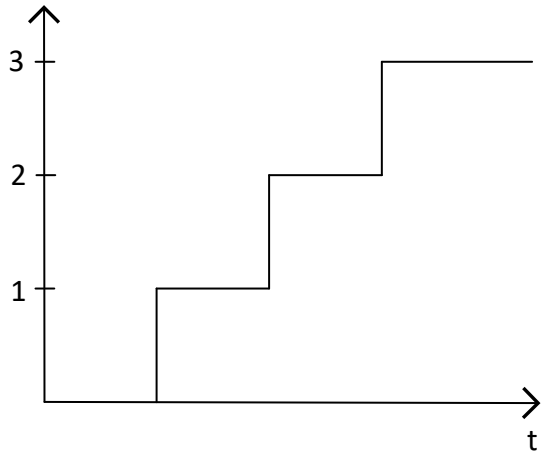


Figura 2. 7. Señal de etapa de carga completa.

2.5 Diseño del inductor

Para realizar el cálculo de la inductancia se analiza la carga y descarga del inductor en dos estados de operación tomando en cuenta las situaciones críticas que se pueden presentar. Ya que la carga y descarga del inductor nunca será con la misma magnitud, porque depende del modo de operación en que se encuentre y el algoritmo de balance propuesto. Como se muestra en la Figura 2.8 (a) en el momento de la carga del inductor se puede presentar que el inductor se puede cargar con el voltaje de la fuente como la situación más crítica o que se cargue con el voltaje de una sola celda. Y en la Figura 2.8 (b) se muestra la descarga del inductor y ocurre lo mismo, ya que se puede descargar con todas las celdas o con una sola.

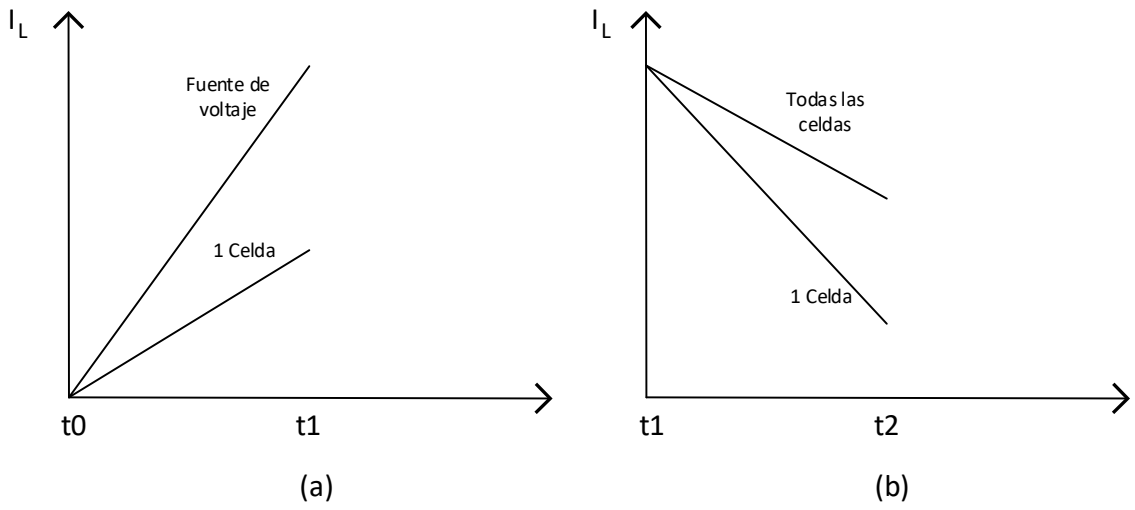


Figura 2. 8. (a)Situaciones de carga del inductor, (b)Situaciones de descarga del inductor.

Para el análisis se toma en cuenta el estado de operación cuando se carga el inductor con la fuente de voltaje y el estado en que se cargan las celdas, para asimilar el análisis con un convertidor CD-CD las celdas se tomaran en cuenta como si fuera un capacitor. El circuito resultante funciona como un convertidor Buck-Boost como se muestra en la Figura 2.9. Este se caracteriza por tener a la salida un voltaje más alto o bajo que la entrada, por esta razón es conocido como un convertidor reductor elevador, la transferencia de energía se realiza cargando el inductor en el tiempo DT y descargándola en el tiempo D'T.

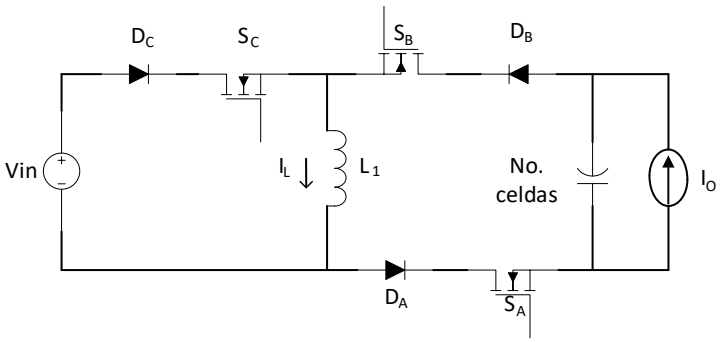


Figura 2. 9. Circuito resultante de topología propuesta.

Durante el tiempo DT resulta el circuito de la Figura 2.10 donde se carga el inductor desde la fuente voltaje y se obtiene la ecuación (1) correspondiente al voltaje en el inductor.

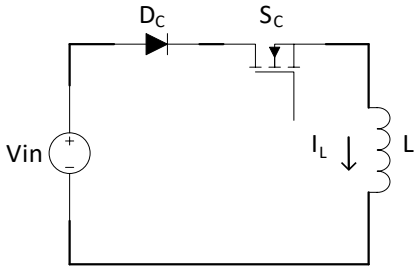


Figura 2. 10. Tiempo DT.

$$V_L = Vin \tag{1}$$

Donde la corriente en el inductor es:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{Vin}{L} \tag{2}$$

Durante el tiempo D'T donde se descarga el inductor para entregarle esa energía al capacitor que simula las celdas como se muestra en la Figura 2.11, en este estado el voltaje en el inductor es igual a la ecuación (3).

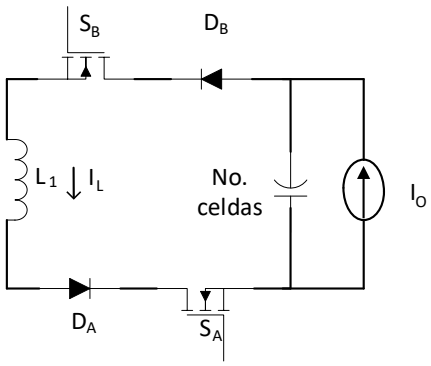


Figura 2. 11. Tiempo D'T

$$V_L = -Vcel \tag{3}$$

Y la corriente en el inductor es:

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{Vcel}{L} \tag{4}$$

En base a la ecuación (2) y (4) se hace el balance de flujo para obtener la función de transferencia:

$$\frac{VinDT}{L} + \frac{(-Vcel)D'T}{L} = 0 \tag{5}$$

La función de transferencia es:

$$\frac{Vcel}{Vin} = \frac{D}{D'} \tag{6}$$

Se obtiene el voltaje en las celdas:

$$Vcel = \frac{DVin}{D'} \tag{7}$$

Se iguala a un término M:

$$M = \frac{Vcel}{Vin} \tag{8}$$

Entonces:

$$M = \frac{D}{D'} \tag{9}$$

Se despeja D y se obtiene:

$$D = \frac{M}{1 + M} \tag{10}$$

Las potencias de entrada y salida deben ser iguales por lo que:

$$Po = Pi \tag{11}$$

La potencia de entrada y salida es:

$$P_I = Vin * I_I \tag{12}$$

$$P_O = Vcel * I_O \tag{13}$$

Donde:

$$I_I = I_L * D \tag{14}$$

Se despeja I_L:

$$I_L = \frac{Vcel * I_O}{Vin * D} \tag{15}$$

Se busca obtener la corriente mínima para conocer la inductancia mínima, así que:

$$I_L min = I_L - \frac{\Delta I_L}{2} \tag{16}$$

Se sustituye I_L y ΔI_L para obtener:

$$I_L min = \frac{Vcel * I_O}{Vin * D} - \frac{VinDT}{2L} \tag{17}$$

Se iguala $I_L$min a 0 y se despeja para obtener la inductancia que es igual a

$$I_L = \frac{Vin^2 D^2}{2 * Vcel * I_O * F} \tag{18}$$

2.6 Control de corriente

En las baterías Li-Po se debe tener mucho cuidado con la corriente en el proceso de carga, ya que si la corriente no se controla adecuadamente se puede dañar la batería y disminuir su vida útil. Por esta razón se propone implementar un control de corriente en la etapa donde se activa el estado de operación 3, donde el inductor se carga con la fuente de voltaje.

El control que se implementará será por histéresis, esta estrategia de control se caracteriza por que su salida solo toma dos valores, generalmente uno alto y otro bajo, parecido al comportamiento de un interruptor es por su simplicidad 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 como se muestra en la Figura 2.12 [28]. Se tendrá un rango donde si la corriente supera este límite en esta etapa no sé activara el MOSFET de la fuente, en cambio se activarán los MOSFET's de libre circulación. Y cuando esta corriente decrezca y pase el límite inferior, el MOSFET de la fuente de voltaje se activará para cargar el inductor para que esté suministre energía a las celdas que lo necesiten.

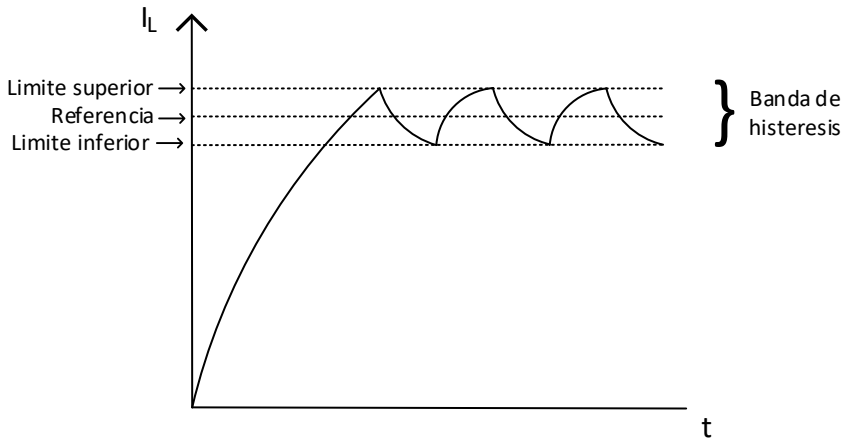


Figura 2. 12. Control por histéresis.

2.7 Implementación de algoritmo de balance y topología propuesta

2.7.1 Controlador y software

Para el desarrollo del algoritmo de balance y la generación de las señales de control para activar los MOSFET´s, se utiliza la Single-Board RIO-9606 (SB RIO) de la marca National Instruments. Esta cuenta con las siguientes características:

- Un procesador industrial de 400 MHz.
- 512 MB de almacenamiento no volátil.
- 256 MB DRAM para control y análisis determinístico.

- FPGA Xilinx Spartan-6 LX45 reconfigurable para temporización.
- Procesamiento en línea y control personalizado.

La sbRIO cuenta con su propia fuente de alimentación de 24VDC, 0.8 A y cuenta con distintos puertos de comunicación, como el puerto Ethernet de 10/100 Mbits/s, CAN, serial RS232 y USB. Para realizar la comunicación con la tarjeta en este proyecto se utiliza el puerto Ethernet.

La sbRIO se acopla a través de un conector de alta velocidad y amplio ancho de banda con la tarjeta RIO Mezzanine de Controlador de Inversores de Propósito General (GPIC por sus siglas en inglés) modelo 9683. El conjunto GPIC-sbRIO está especialmente diseñado para aplicaciones embebidas de alto volumen de control de electrónica de potencia, adquisición de datos y análisis que requieren alto rendimiento y fiabilidad [29].

La GPIC 9683 cuenta con 16 canales análogos simultáneos de entrada que pueden ser conectados de forma común o diferencial, 8 canales escaneados análogos de entrada, 8 canales análogos de salida, 28 canales de entrada digital de tipo sourcing, 24 canales de salida digital de tipo sinking, 14 canales de salidas digitales de media pierna, 4 canales de salida digital para el control de relevadores y 32 canales de entrada/salida digital TTL de bajo voltaje. El software utilizado para implementar el algoritmo de balance es el sistema de desarrollo LabVIEW 2019, así como los módulos de LabVIEW Real-Time y LabVIEW FPGA.

2.7.1.1 Algoritmo de balance

El algoritmo de balance se implementa en el software LabVIEW 2019, este software es muy amigable con el usuario ya que su código G ayuda mucho en la organización y el entendimiento del código, además que nos permite trabajar con la GPIC.

En la figura 2.13 se muestra el while loop donde se adquieren los voltajes de las celdas y la corriente en el inductor. Los voltajes entran al subVI asignado para hacer las combinaciones de las celdas y hacer el cálculo de los errores de cada una.

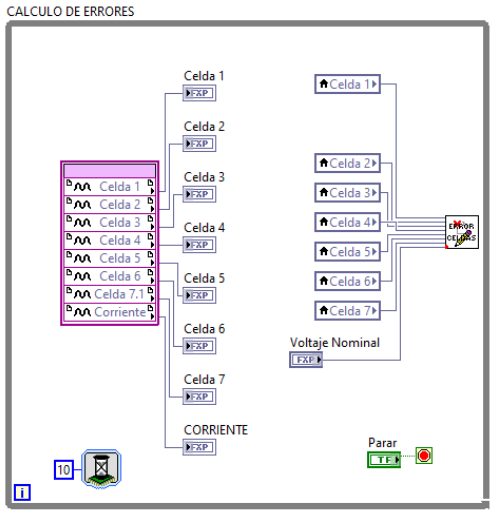


Figura 2. 13. Adquisición de voltajes de las celdas.

En la figura 2.14 se muestra el panel frontal del subVI donde en su diagrama de bloques se realizan los cálculos de los errores de las 27 combinaciones en base a los voltajes de las celdas y el voltaje de referencia.

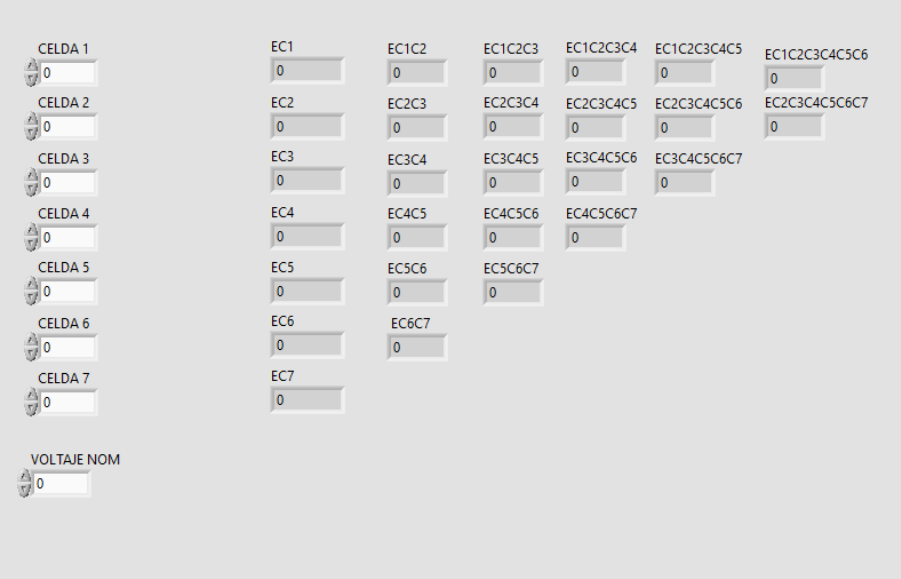


Figura 2. 14. Calculo de errores de los arreglos de celdas.

En el panel frontal se muestran los 27 errores calculados y el control para establecer el voltaje de referencia. Ya que se han calculado los errores se obtienen los errores máximo y mínimo dependiendo del número de celdas que se han hecho las

combinaciones, para obtener estos se realizó un subVi para cada uno. En la Figura 2.15 se muestra el diagrama de bloques del subVi donde se obtiene el error máximo y mínimo general tomando en cuenta ya los errores máximos y mínimos que se han obtenido.

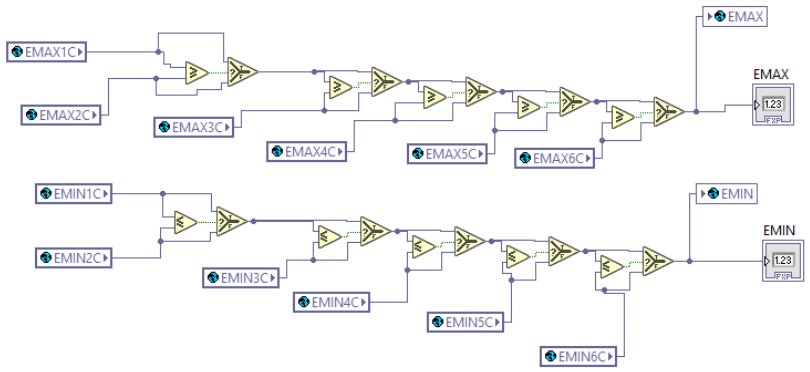


Figura 2. 15. Obtención de errores máximo y mínimo.

Al tener el error máximo y mínimo de los arreglos de celdas se tiene que asignar el caso de descarga o carga correspondiente. Se crea un subVi y se implementa en el diagrama de bloques una sucesión de estructuras “case” anidadas para determinar estos casos, esto se hace para el error mínimo como para el error máximo con la combinación que corresponda a estas.

En estos diagramas de bloques se compara primero el error de la combinación del caso 27 con el error máximo o mínimo, si es igual la estructura case estará en modo verdadero y se le asignara el número del caso correspondiente ya sea para descarga o carga. Si no son iguales, la estructura estará en modo falso y procederá a hacer los siguientes casos de comprobación hasta que detecte la igualdad del error y la combinación. En la Figura 2.16 se muestra una parte de este procedimiento para asignar los casos de descarga, aunque también se realizó el subVi para los casos de descarga, por su tamaño en condigo de bloques solo se muestra una parte de él.

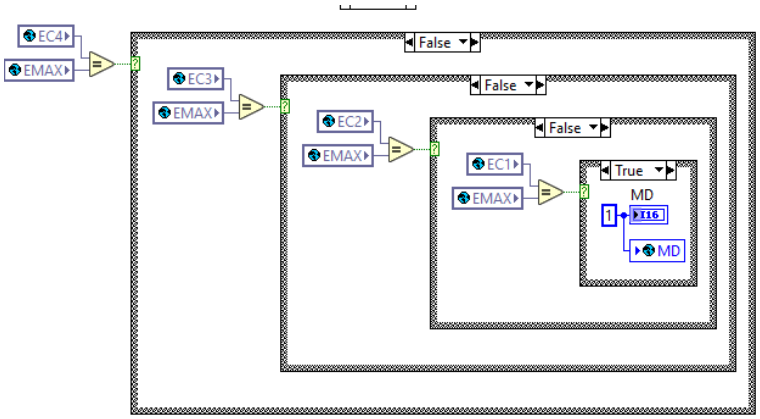


Figura 2. 16. Asignación de caso de descarga.

Al tener los casos asignados para la carga y descarga de los arreglos de las celdas, ahora se implementa un código de bloques que nos permita forzar un caso en específico. Esto solo por si se necesita que se cargue o descargue algún caso durante el proceso de carga y balance. En la Figura 2.17 se muestra el código en el diagrama de bloques del subVI.

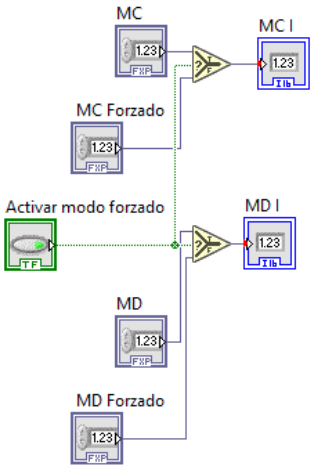


Figura 2. 17. Diagrama de bloques para forzar caso de descarga y carga.

En la Figura 2.18 se muestra el diagrama de bloques del subVi que se implementó para la generación de la señal que selecciona la etapa que activará el modo de operación correspondiente a su valor. En este también se implementa la condición de paro, que como se puede esta variable se ha establecido como “paro” y es una

variable del tipo booleano. Esta variable entra a un selector que si es cierto como se ha establecido nuestro selector tomara el valor de 3 y si es falso, seguirá el conteo normal de o a 2. La variable que establece la condición donde si el voltaje de las celdas es superior al voltaje de todo el paquete es la variable booleana SC, que si es cierta entra en modo verdadero y solo realiza el conteo de 0 a 1 con la misma condición de paro como se muestra en la Figura 2.19.

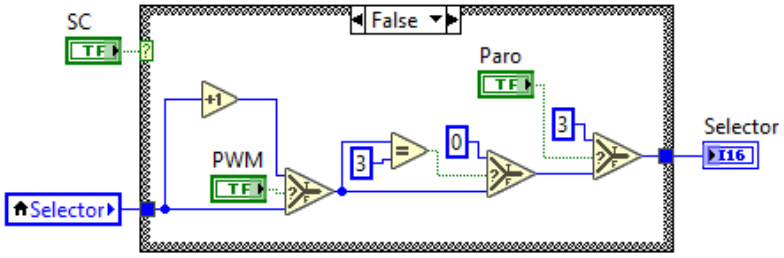


Figura 2. 18. Generador de señal de etapas de cargador.

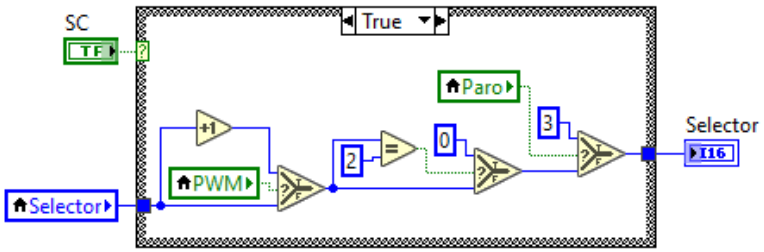


Figura 2. 19. Generador de señal de etapas con condición.

En la Figura 2.20 se muestra la señal que se genera con el diagrama de bloques de la Figura 2.18, cómo se puede ver va de 0 a 2.

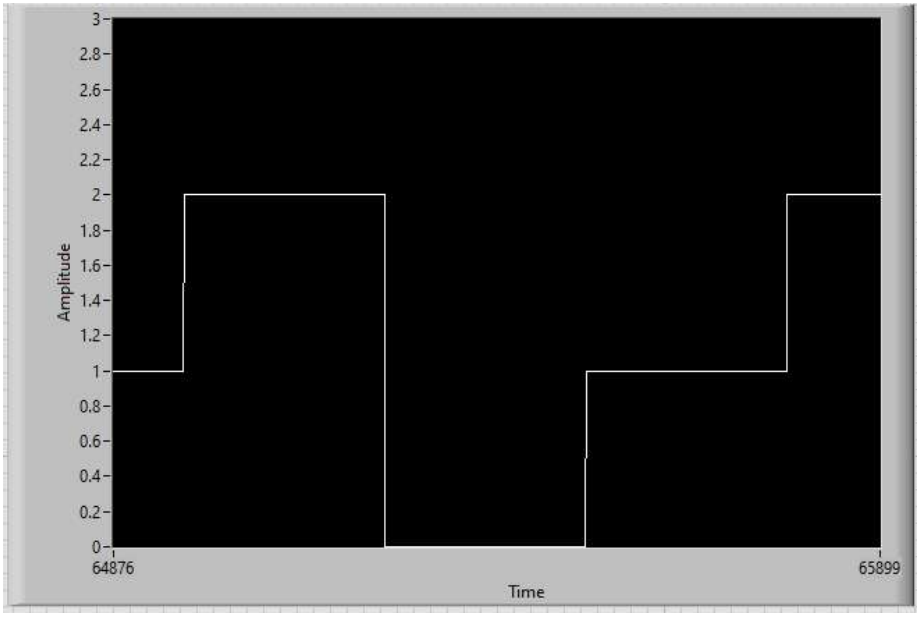


Figura 2. 20. Señal de etapas.

Para el subVi que genera las señales de los MOSFET's se implementa en su diagrama de bloques una estructura case, dónde la variable de nuestra señal selectora nos dirá en qué etapa se encontrará nuestro cargador y que modo de operación se activara. Si la señal es igual a 0, la estructura case entrara en este caso. En este caso se procederá a implementar varias estructuras case dónde se compara el caso de descarga con su caso correspondiente como se muestra en la Figura 2.21, si estos son iguales la estructura case estará en modo verdadero y en este modo se activarán las señales correspondientes con ese caso. Si es falso, procederá a hacer todas las comparaciones correspondientes hasta encontrar la igualdad y activar las señales como se muestra en la figura. Esto se hará cuando la señal tome el valor que activa los modos de operación de descarga y carga de los arreglos. También en la Figura 2.21 se muestra el nodo de las salidas de la tarjeta GPIC.

Si la señal toma el valor de 2 que es el modo de operación donde se activa el MOSFET de la fuente de voltaje, se implementa una estructura case dónde una variable booleana que es el ON/OFF que viene del control de corriente por histéresis decidirá si es verdadero se activará la señal de este MOSFET, si es falso activará

los MOSFETS de libre circulación, el diagrama de bloques se muestra en la Figura 2.22.

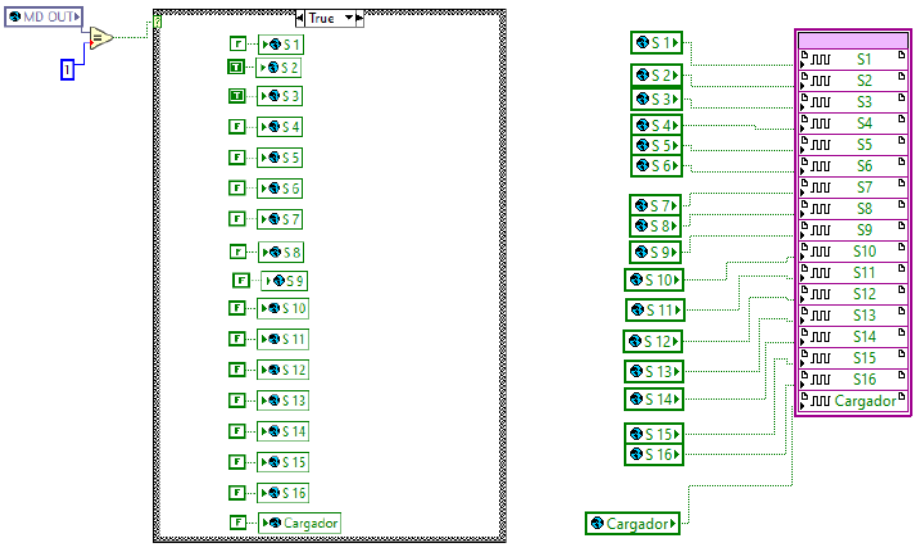


Figura 2. 21. Salidas de las señales de control.

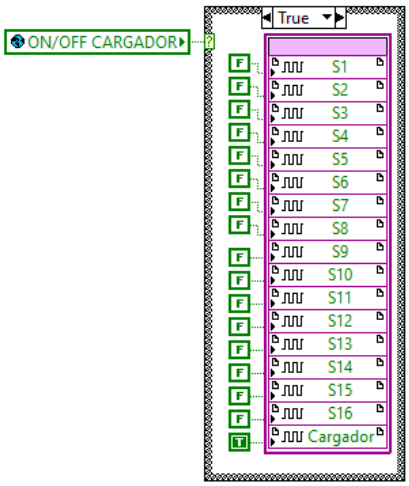


Figura 2. 22. Diagrama de bloques modo de operación 3.

En la Figura 2.23 se muestra el diagrama de bloques del control por histéresis propuesto para la corriente.

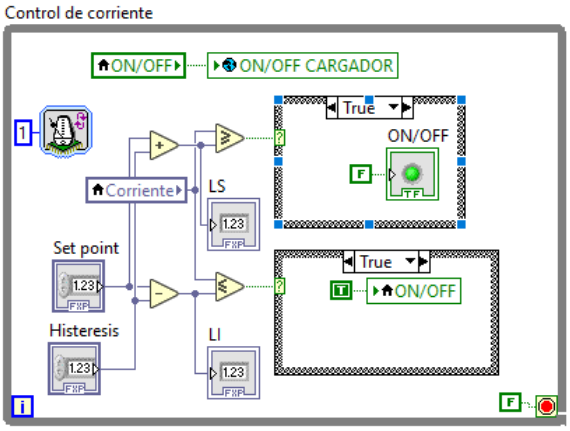


Figura 2. 23. Diagrama de bloques de control de corriente por histéresis.

En la Figura 2.24 se muestra el panel frontal del programa principal, aquí el usuario puede controlar todo lo respecto al balance y carga de la batería. Aquí es donde se establece el voltaje de referencia al que tienen que balancearse las celdas. En este panel frontal se monitorean los voltajes de las celdas como también el valor del error mínimo y máximo. Aquí se establecen los parámetros para el control de corriente. Y además se puede modificar el ciclo de trabajo del PWM que genera la señal de las etapas del cargador, además también muestra que caso de carga y descarga se está llevando a cabo.

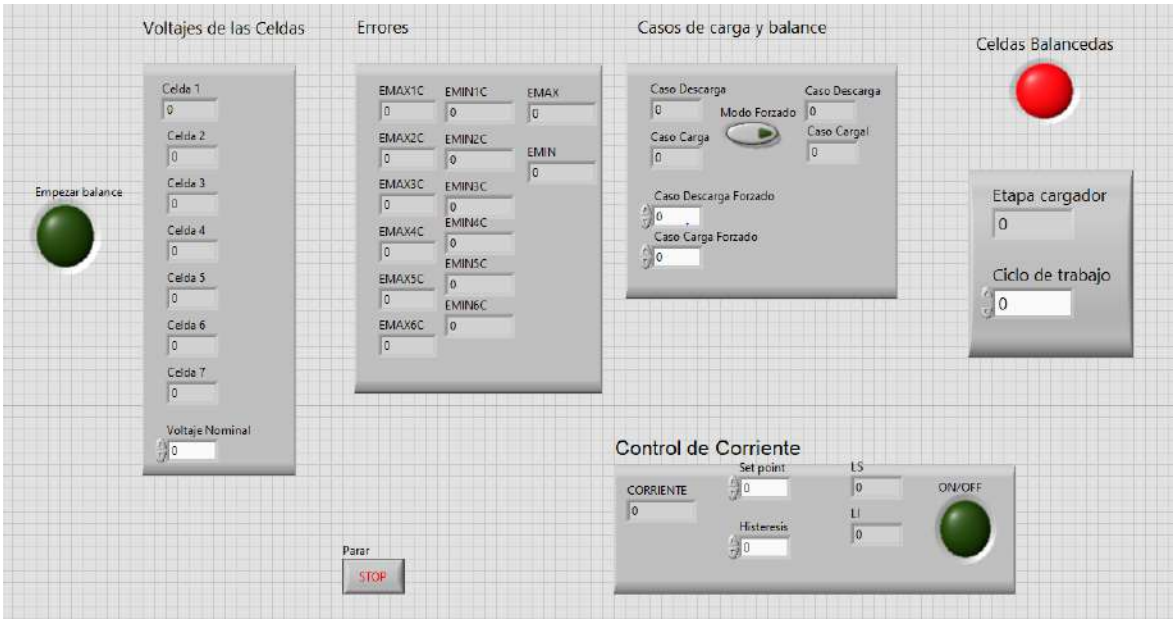


Figura 2. 24. Panel frontal del programa.

2.7.2 Diseño de circuitos impresos de topología propuesta

Para la implementación de los circuitos impresos de la topología de balance, se optó por hacerlo por partes y basándose en el diseño de un circuito medio puente con las modificaciones correspondientes para la conexión de la celda y los otros circuitos.

En la Figura 2.25 se muestran los MOSFET's superiores de la topología propuesta que será el circuito impreso que se diseñará e implementará. El diagrama del circuito impreso se muestra en la Figura 2.26, cómo son los MOSFET´s superiores solo tiene su conexión con la celda, también en este se tienen conectores para conectar el circuito de las señales con sus impulsores. Además, también en la parte inferior tiene un conector que permite la conexión con las otras partes de la topología propuesta.

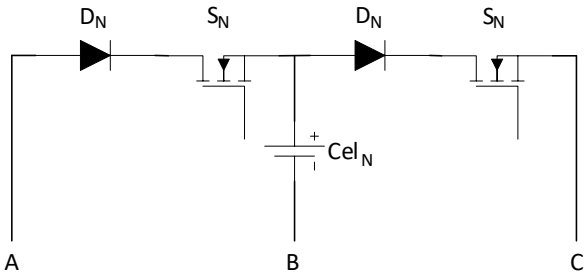


Figura 2. 25. MOSFET's superiores.

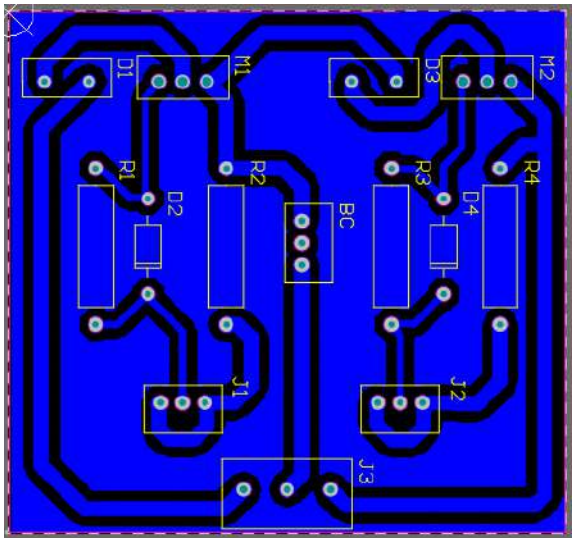


Figura 2. 26. Diagrama de circuito impreso de MOSFET´s superiores.

En la Figura 2.27 se muestran los MOSFET's intermedios de la topología propuesta, ya que son los MOSFET's intermedios tienen en la parte superior conexiones que permite la conexión con el circuito de los MOSFET´s superiores o intermedios y en la parte inferior también tiene estas conexiones que permite la conexión con los MOSFET's inferiores o intermedios. En la Figura 2.28 se muestra el diagrama del circuito impreso, como se ve tiene sus conexiones superiores e inferiores para la conexión de otros circuitos, tiene su conector con la celda y su conector para el circuito de las señales con sus impulsores.

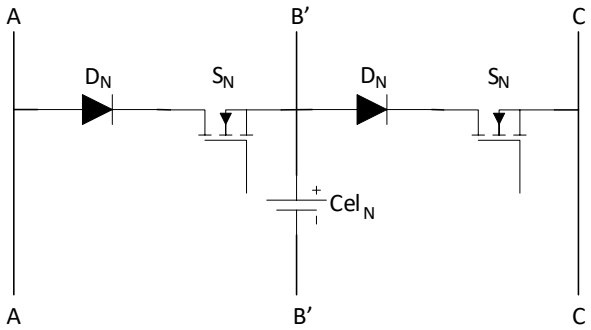


Figura 2. 27. MOSFET's intermedios.

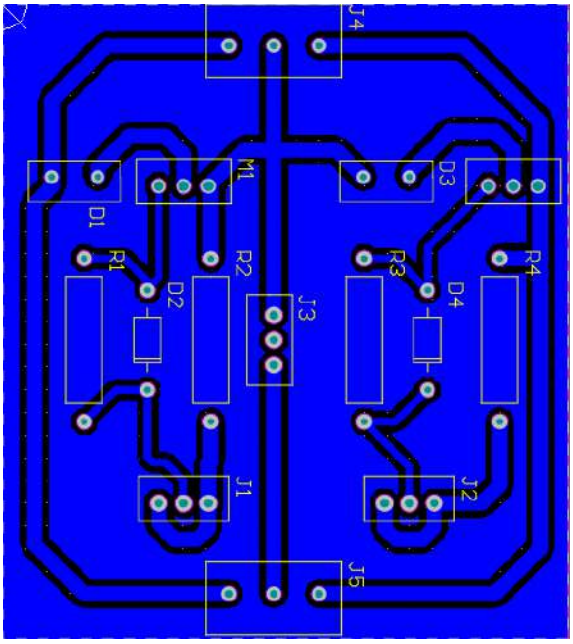


Figura 2. 28. Circuito impreso de MOSFET's intermedios.

En la Figura 2.29 se muestran los MOSFET's inferiores o los MOSFET's de libre circulación de la topología propuesta, estos tienen sus conexiones superiores para poder hacer la conexión con los MOSFET's intermedios y en sus conexiones inferiores se conecta el circuito con el inductor y el MOSFET que activa la fuente de voltaje. En la Figura 2.30 se muestra el diagrama del circuito impreso, como se ve en este diseño de circuito ya no es necesario un conector para las celdas, pero si cuenta con sus conectores para que se conecten los impulsores con sus señales correspondientes, además tiene también sus conectores para conectar los MOSFETS intermedios y su conector inferior que permite la conexión con el circuito de la parte del MOSFET que activa la fuente de voltaje.

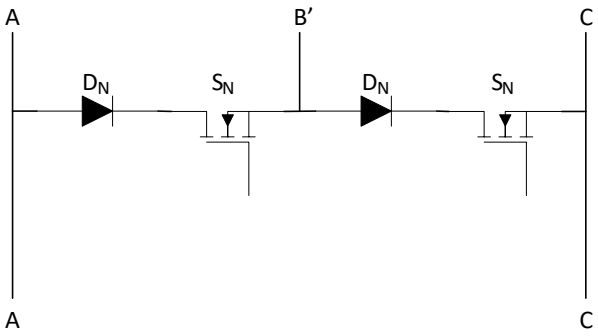


Figura 2. 29. MOSFET's inferiores.

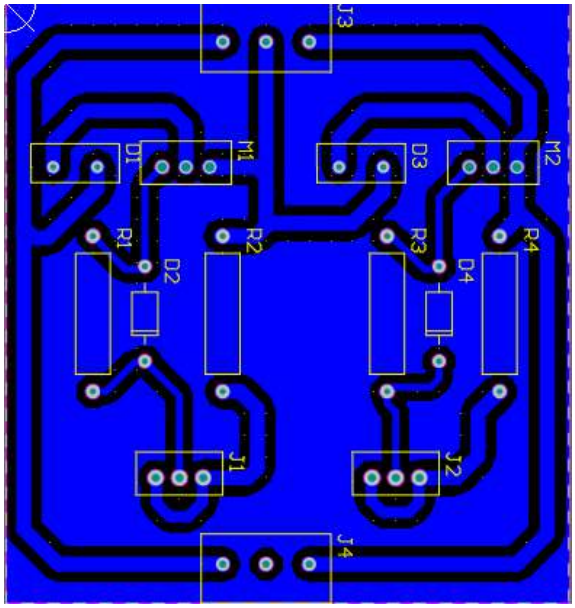


Figura 2. 30. Circuito impreso MOSFET's inferiores.

En la Figura 2.31 se muestra el circuito donde se encuentra el inductor y el MOSFET que activa la fuente de voltaje, este en su parte superior tiene sus conexiones para poder hacer la conexión con los MOSFET's inferiores. En la Figura 2.32 se muestra el diagrama del circuito impreso de esta parte de la topología, como se puede ver tiene su conector que permite la conexión con los MOSFETS inferiores de la topología de balance, su conector para la fuente de voltaje, su conector para la señal con su impulsor y otro conector donde se conecta el inductor.

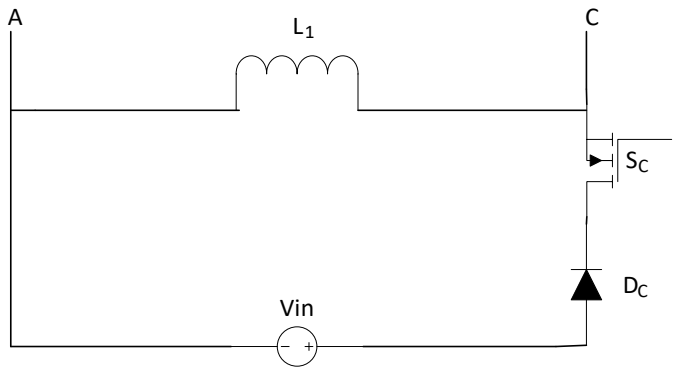


Figura 2. 31. Diagrama de circuito inductor conectado con fuente de voltaje.

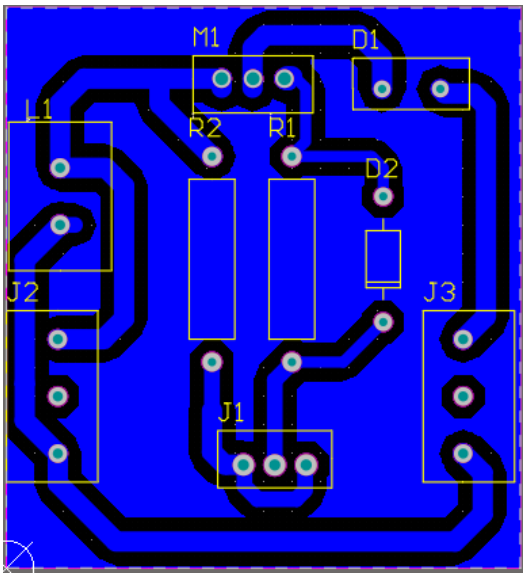


Figura 2. 32. Circuito impreso Inductor y fuente de voltaje.

2.7.3 Diseño de impulsores

El diseño de los impulsores es esencial para la interfaz de potencia, ya que estos se encargan de recibir y acondicionar las señales provenientes de la tarjeta en la

que se lleva a cabo el control para poder activar o desactivar los MOSFET´s y de esta manera se pueda realizar el balance y la carga de la batería. Las señales provenientes de la GPIC llegan a los optoacopladores y aíslan galvánicamente la etapa de control de la etapa de potencia. Ya que la topología propuesta se dividió en partes tomando de referencia el diseño de un medio puente, se diseñaron circuitos con dos señales y sus respectivos impulsores como se muestra en la Figura 2.33, estos irán conectados a los circuitos de los MOSFET's ya sean los superiores, intermedios o inferiores. En el circuito de la parte donde está el inductor y el MOSFET que conecta la fuente de voltaje se diseñó con un solo impulsor como se muestra en la Figura 2.34.

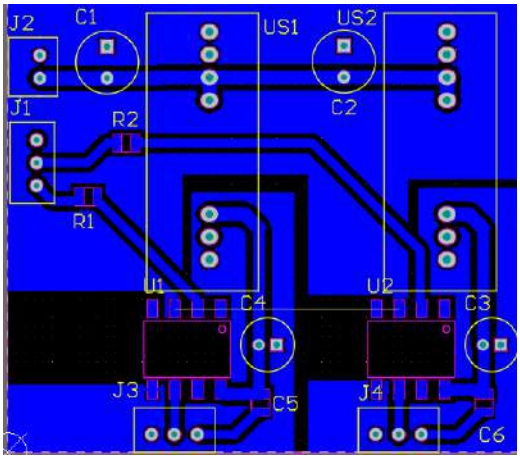


Figura 2. 33. Impulsores para dos MOSFET's.

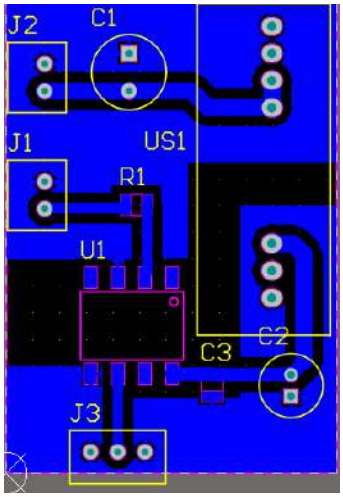


Figura 2. 34. Impulsor MOSFET conectado a fuente de voltaje.

2.7.4 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 descarga y carga que se llevará a cabo. Para aislar la parte de potencia se optó por utilizar un amplificador aislado ISO 124. Después se implementa un rectificador de onda completa para acondicionar el voltaje que ira a las entradas de la GPIC 9683. En la Figura 2.35 se muestra el circuito del sensor de voltaje para una celda.

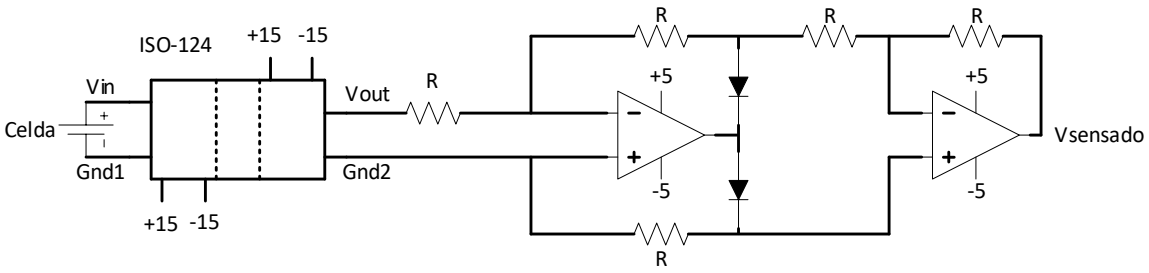


Figura 2. 35. Circuito de sensado de voltaje.

2.7.5 Sensor de corriente

Este sensor realizará la medida de la corriente que suministra el cargador, con el fin de generar una alerta en el caso en que esta supere el valor máximo establecido por el control de corriente. Para realizar el sensado de corriente se utiliza el transductor de corriente de lazo cerrado LA 25-NP de la marca LEM. Este sensor de corriente mide la corriente a través del efecto Hall. Las ventajas que tiene el utilizar este sensor es que tiene una excelente precisión y un buen ancho de banda.

Para conectar sensores de corriente a la GPIC 9683 se debe usar una resistencia para convertir la medición de corriente a una medición de voltaje. Las entradas analógicas simultáneas de la GPIC 9683 tiene rangos de entrada de ±10 V y ±5 V que pueden adaptarse a los valores de la resistencia en un cierto rango, en función de la corriente máxima del sensor. La siguiente ecuación determina el valor máximo de la resistencia en función de la corriente pico del sensor.

$$R_{Max} = \frac{5V}{I_{PMax}} \tag{19}$$

Se recomienda tomar como referencia el rango de entrada de ±5 V ya que puede reducir la disipación de potencia en la resistencia en un 50 % en comparación con la disipación de potencia en el rango de ±10 V. En la Figura 2.36 se muestra el circuito del sensor de corriente con su resistencia y como debe conectarse a la GPIC. En la Figura 2.37 se muestra el diagrama del circuito impreso.

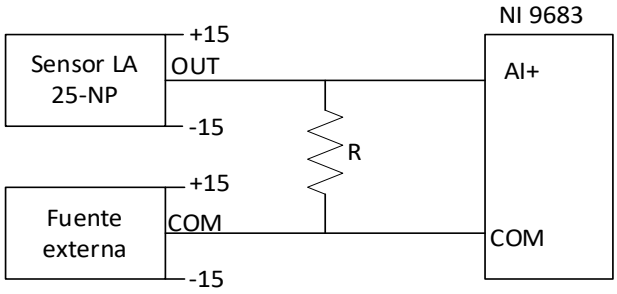


Figura 2. 36. Conexión del sensor de corriente a la GPIC.

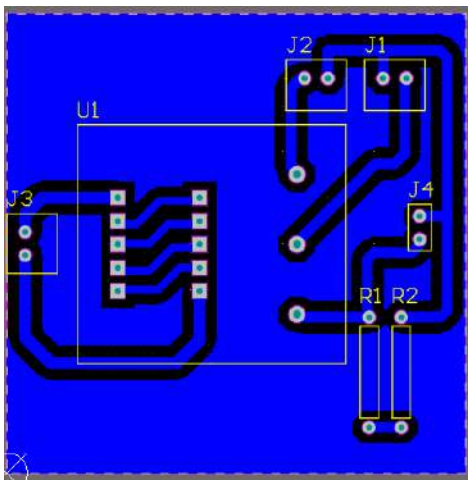


Figura 2. 37. Diagrama de circuito impreso de sensor de corriente.

Capítulo 3

Resultados de simulación y experimentales

En el presente capítulo se presentan las simulaciones realizadas en el software PSIM para la validación de la topología de balance propuesta y el proceso de balance. Se realizaron simulaciones en diferentes situaciones de desbalance de celdas para comparar la técnica de balance de la topología con un inductor y la propuesta para determinar si el balance se realiza más rápido con lo propuesto en este proyecto. Además, se realizaron simulaciones donde las 7 celdas presentan diferentes voltajes y en diferentes situaciones que se pueden presentar en el balance y la carga. Se realizaron pruebas experimentales de la topología propuesta y el algoritmo de balance que se implementó en el software LabVIEW con la tarjeta SB RIO 9606 con la GPIC 9683.

3.1 Comparación entre técnicas de balance

Se compara el tiempo en el cual se realiza el balance entre la técnica de balance propuesta para este proyecto y la propuesta en [27] que utiliza una topología con un solo inductor. Este balance consiste en descargar la celda con mayor voltaje para transferir energía a la de menor voltaje. Se simularán en el software PSIM ambas técnicas de balance en diferentes condiciones que se pueden presentar en una bateria Li-Po con sus celdas desbalanceadas, en las simulaciones se remplazaran las celdas por capacitores. En la tabla 3.1 se muestran los parámetros que tendrán ambos balances.

Tabla 3. 1. Parámetros de simulación.

Parámetro	*Valor*
Inductancia	250μH
Frecuencia	100 kHz
Capacitores	10000μF

En la tabla 3.2 se muestran los voltajes iniciales de los capacitores que simulan las celdas para el caso 1 de desbalance. Estos voltajes están por debajo del voltaje nominal de una bateria Li-Po.

Tabla 3. 2. Voltajes iniciales caso 1.

Capacitor	*Voltajes iniciales*
1	3
2	3.1
3	3
4	3.2
5	3.3
6	3.1
7	3

En la Figura 3.1 (a) se muestra el balance que utiliza la topología de balance activo con un solo inductor y la Figura 3.1 (b) muestra el balance propuesto. Se puede ver que la técnica de balance propuesta es más rápida respecto a la de la topología con un solo inductor. En este caso se puede ver la diferencia en cómo se igualan los voltajes de los capacitores, esto debido a como se realiza el balance cada uno. En

la técnica de un solo inductor se ve que los voltajes de los capacitores se van compactando hasta llegar al mismo voltaje, mientras que en el balance propuesto se ve que debido a las combinaciones de las celas que se propusieron, estas se balancean de una forma diferente pero que al final todos los capacitores tienen el mismo voltaje.

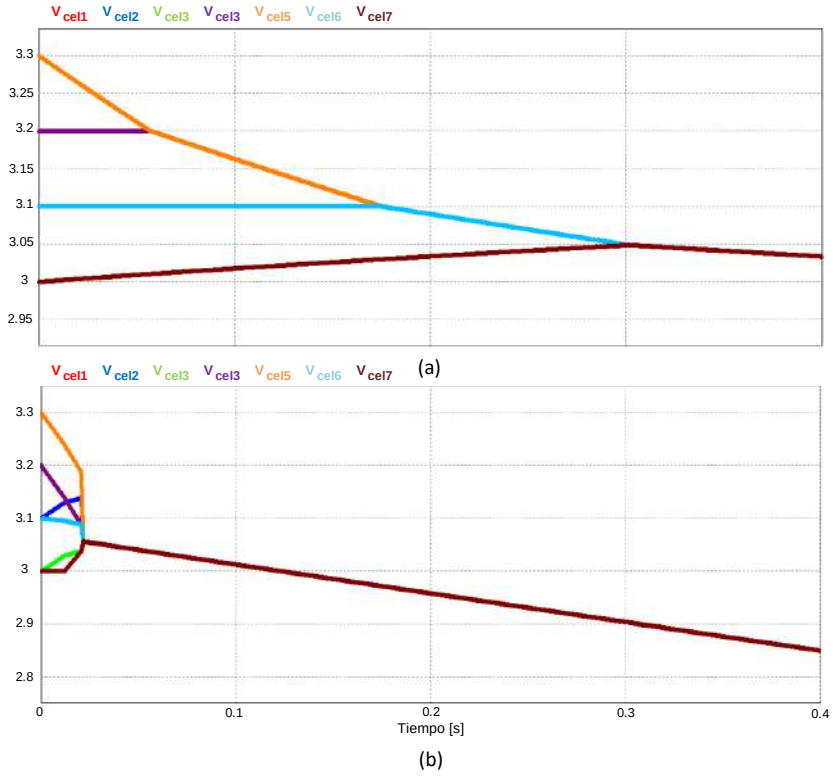


Figura 3. 1. Voltajes capacitores caso 1 (a) Balance topología con un inductor, (b) Balance propuesto.

En la Figura 3.2 (a) se muestra la corriente I_L en el balance de la topología con un inductor y la Figura 3.2 (b) se muestra la corriente I_L en el balance propuesto, se puede ver qué la corriente es mayor, ya que hay una mayor transferencia de energía dependiendo de las combinaciones de carga y descarga que se seleccionen para realizar el balance. En la Figura 3.3 (a) se muestra que celdas se cargan y descargan en el balance con un inductor, en este balance solo se pueden descargar y cargar por estado de operación una de las 7 celdas de la bateria, en cambio en la Figura 3.3 (b) se muestran las combinaciones de descarga y carga que se propusieron en el balance, cómo se muestra se pueden presentar cualquiera de los 27 casos de descarga y carga.

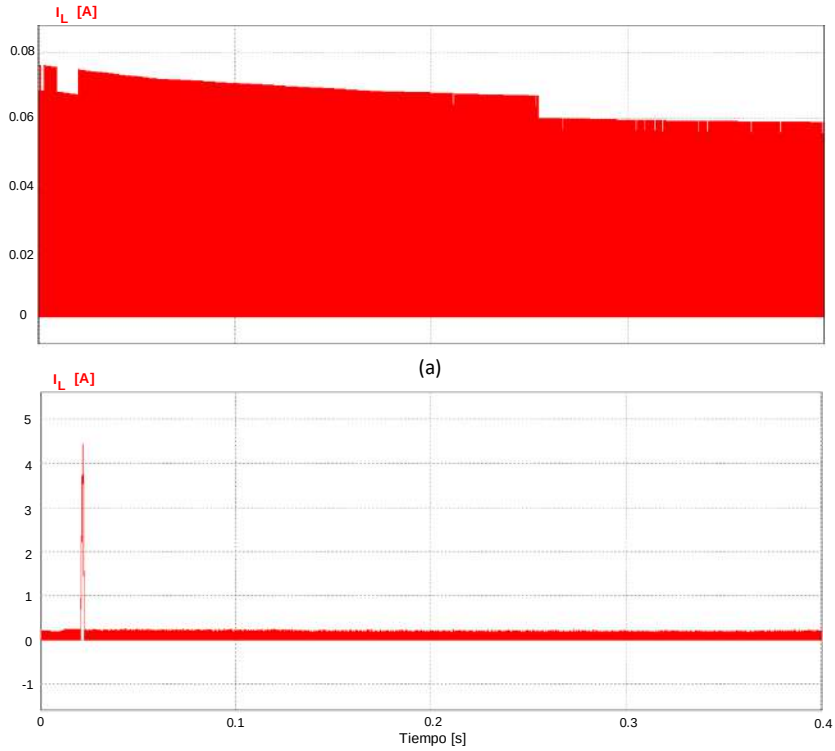


Figura 3. 2. Corriente en el inductor I_L caso 1 (a) Topologia un solo inductor, (b) Balance propuesto.

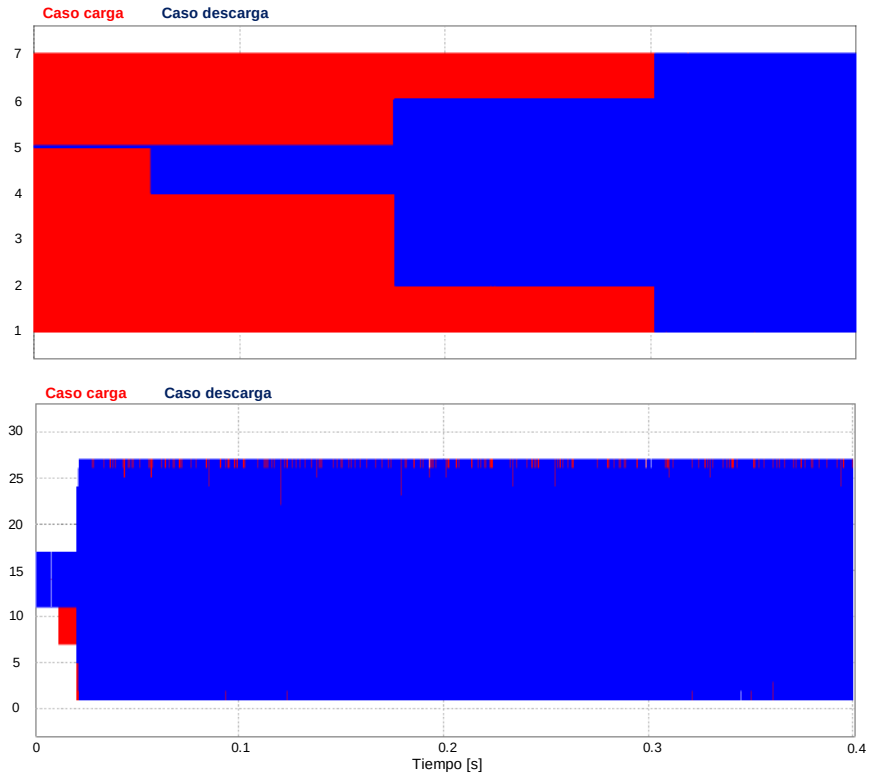


Figura 3. 3. Descarga y carga de celdas caso 1 (a) Topologia con un solo inductor, (b) Balance propuesto.

El segundo caso de desbalance se presenta con los voltajes de las celdas por encima del voltaje nominal de una batería Li-Po. En la tabla 3.3 se muestran los voltajes iniciales de los capacitores.

Tabla 3. 3. Voltajes iniciales caso 2.

Capacitor	*Voltajes iniciales*
1	4
2	4.1
3	3.9
4	4
5	3.8
6	4.2
7	4

En la Figura 3.4 (a) se muestra el balance de la topología de balance con un inductor y la Figura 3.4 (b) muestra el balance propuesto. Se puede ver que la técnica de balance propuesta es más rápida respecto a la de un inductor, en la propuesta se puede ver cómo los voltajes de los capacitores se igualan y se comportan diferente en comparación a la técnica de un solo inductor, esto se debe a las combinaciones de celdas que se propusieron.

En la Figura 3.5 (a) se muestra la corriente I_L en el balance normal y la Figura 3.5 (b) se muestra la corriente I_L en el balance propuesto, se puede ver qué la corriente es mayor, ya que hay una mayor transferencia de energía, además de que esta varia más, esto es debido dependiendo a que se pueden seleccionar combinaciones que tienen más celdas en la carga y descarga de estas para realizar el balance.

En la Figura 3.6 (a) se muestra que celdas se cargan y se cargan en el balance de un solo inductor, en este balance solo se pueden descargar y cargar por estado de operación una de las 7 celdas de la bateria, en cambio en la Figura 3.6 (b) se muestran las combinaciones de descarga y carga que se propusieron en el balance, cómo se muestra se pueden presentar cualquiera de los 27 casos de descarga y carga.

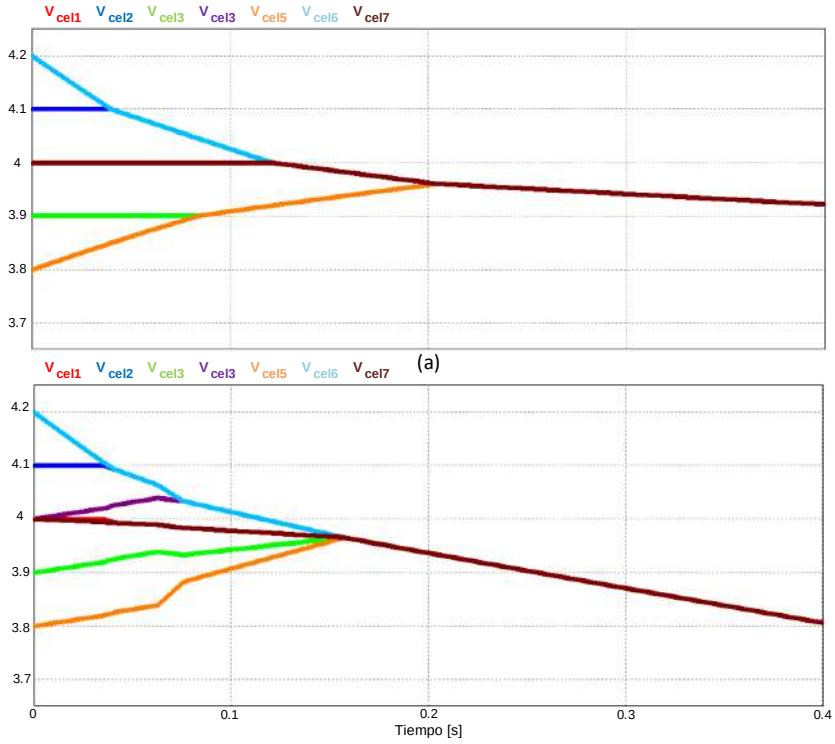


Figura 3. 4. Voltajes capacitores caso 2 (a) Balance topología un solo inductor, (b) Balance propuesto.

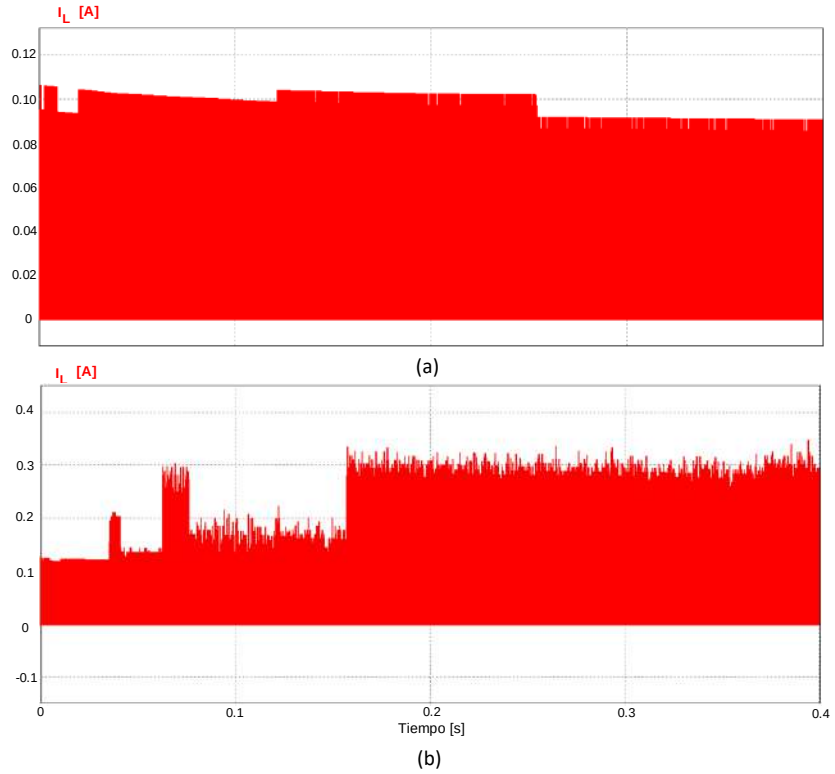


Figura 3. 5. Corriente en el inductor I_L caso 2 (a) Topologia un solo inductor, (b) Balance propuesto.

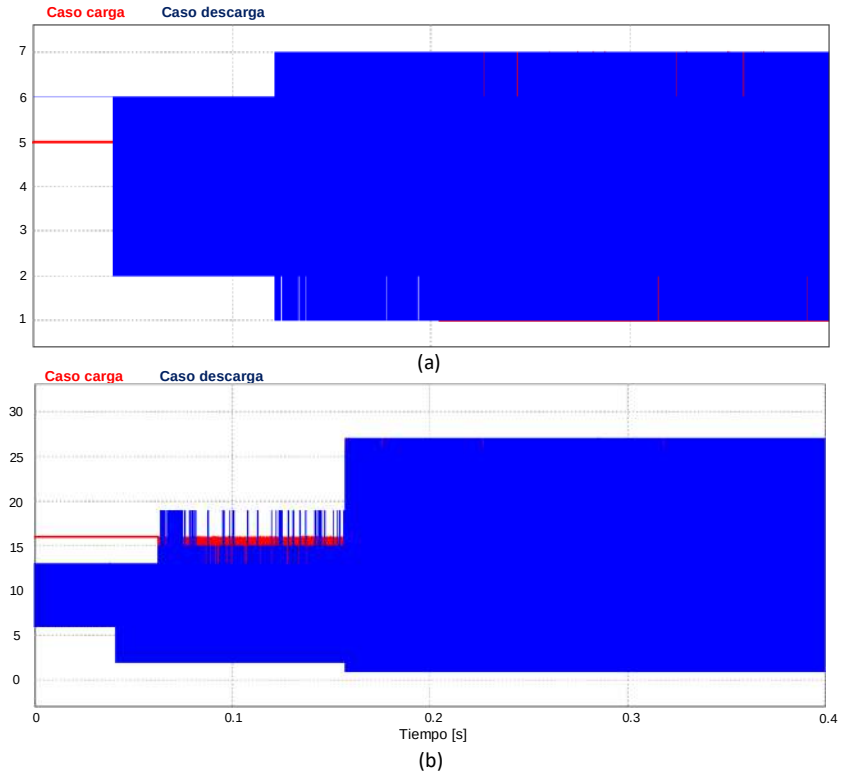


Figura 3. 6. Descarga y carga de celdas caso 1(a) Topologia con un solo inductor, (b) Balance propuesto.

El tercer caso de desbalance que se presenta los voltajes de las celdas por encima y por debajo del voltaje nominal de una batería Li-Po. En la tabla 3.4 se muestran los voltajes iniciales en los capacitores que simulan las celdas de la batería.

Tabla 3. 4. Voltajes iniciales caso 3.

Capacitor	*Voltajes iniciales*
1	4
2	3.8
3	3.6
4	3.4
5	3.2
6	3
7	3.2

En la Figura 3.7 (a) se muestra el balance que utiliza la topología de un inductor y la Figura 3.7 (b) muestra el balance propuesto. Se puede ver que la técnica de balance propuesta es más rápida respecto a la de un inductor, en la propuesta se

puede ver cómo los voltajes de los capacitores se igualan y se comportan diferente, esto se debe a las combinaciones de celdas que se seleccionan durante el proceso de balance.

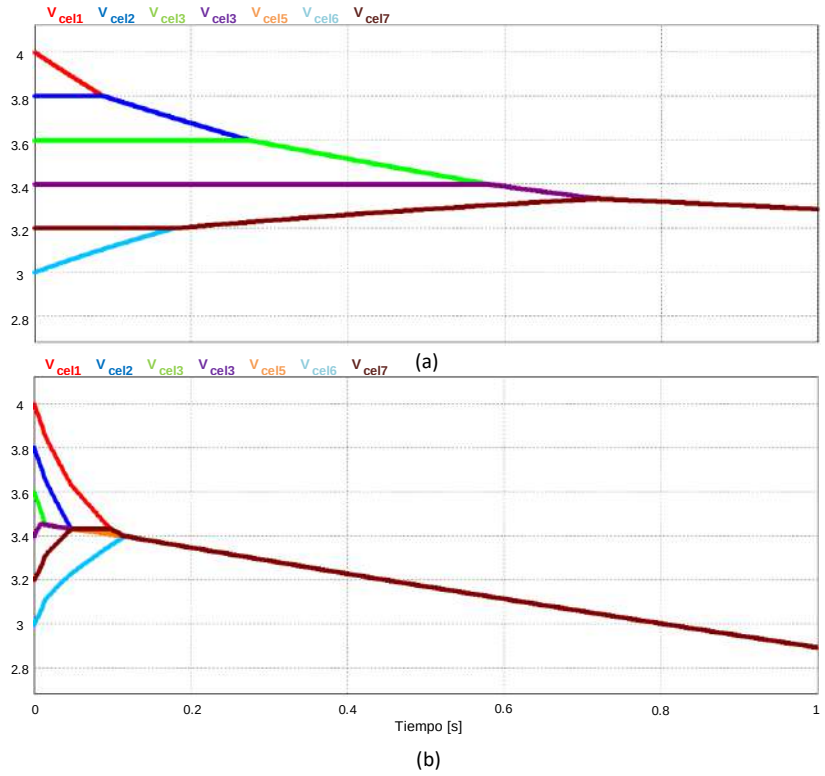


Figura 3. 7. Voltajes capacitores caso 3 (a) Balance topología un solo inductor, (b) Balance propuesto.

En la Figura 3.8 (a) se muestra la corriente I_L en el balance con un inductor y la Figura 3.8 (b) se muestra la corriente I_L en el balance propuesto, se puede ver qué la corriente es mayor, ya que hay una mayor transferencia de energía dependiendo de las combinaciones que se seleccionen para realizar el balance.

En la Figura 3.9 (a) se muestra que celdas se cargan y se cargan en el balance estándar, en este balance solo se pueden descargar y cargar por estado de operación una de las 7 celdas de la bateria, en cambio en la Figura 3.9 (b) se muestran las combinaciones de descarga y carga que se propusieron en el balance, cómo se muestra se pueden presentar cualquiera de los 27 casos de descarga y carga.

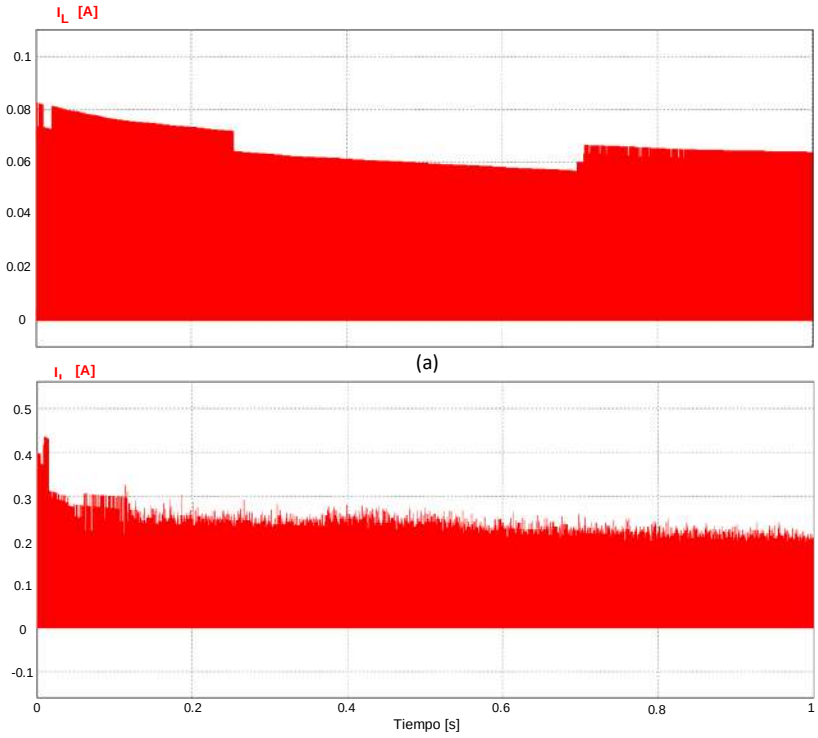


Figura 3. 8. Corriente en el inductor I_L caso 3 (a) Topologia un solo inductor, (b) Balance propuesto.

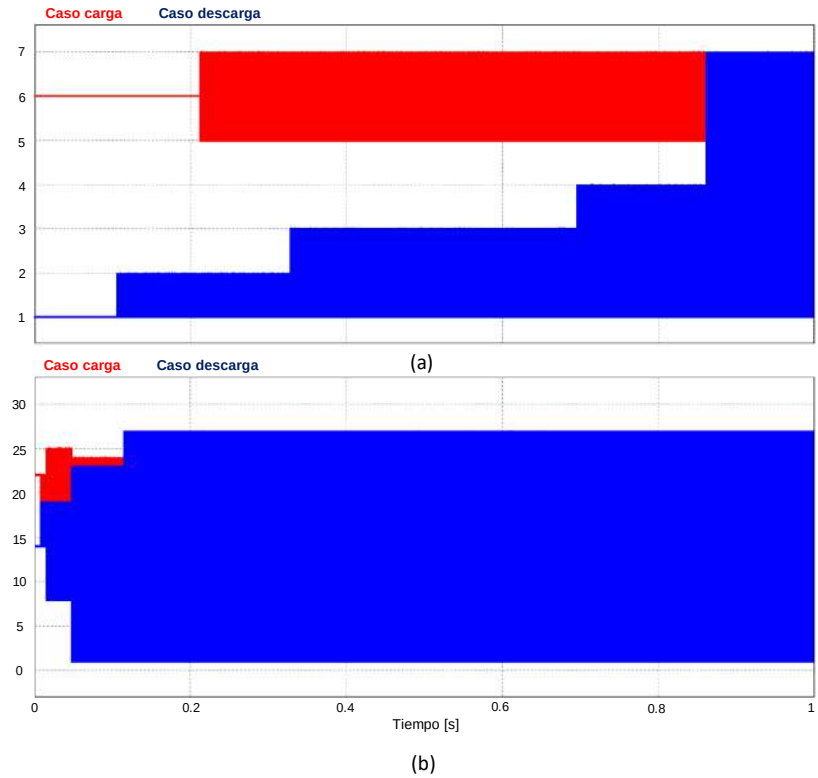


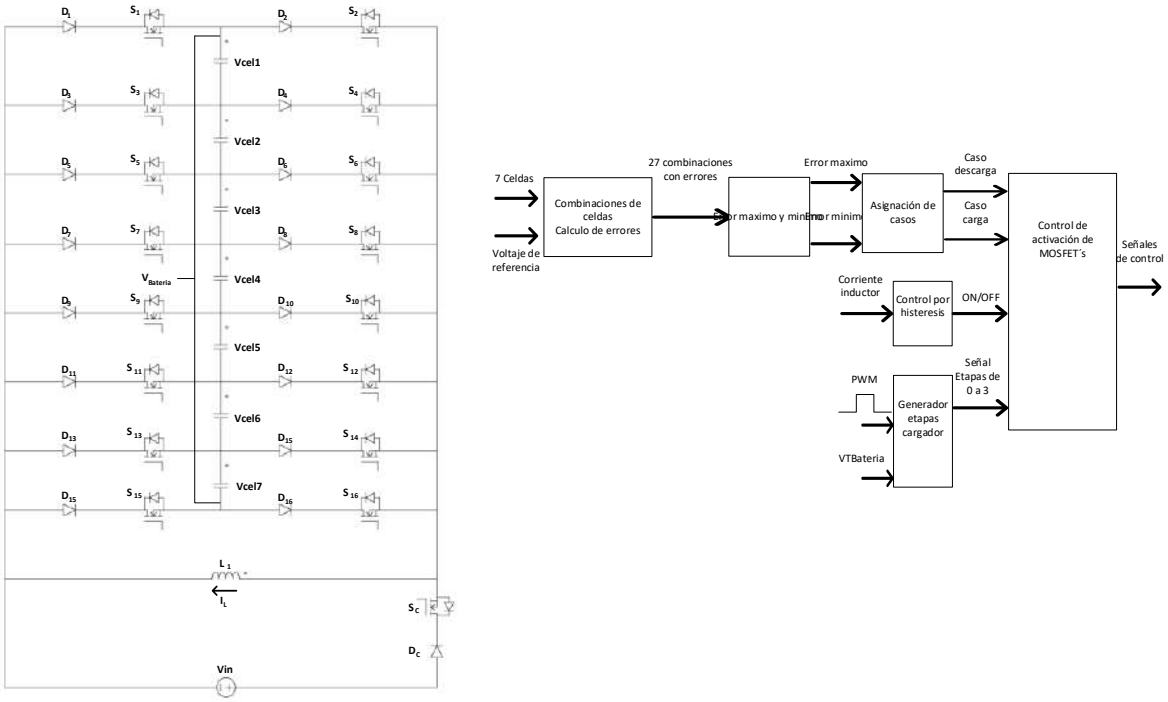
Figura 3. 9. Descarga y carga de celdas caso 3 (a) Topologia con un inductor, (b) Balance propuesto.

3.2 Simulaciones de balance y carga de celdas

Para comprobar el funcionamiento de la topología de balance con cargador y el algoritmo de balance propuesto se presentan tres simulaciones donde se presentan diferentes casos en el proceso de balance y carga. En la Figura 3.10 se muestra la topología y control que se simulo en el software PSIM. En la tabla 3.5 se muestran los parámetros establecidos para todos los casos de simulación, la inductancia se calculó en base a la ecuación (18).

Tabla 3. 5. Parámetros de simulación.

Parámetro	*Valor*
Inductancia	250µH
Frecuencia generadora de etapas	100khz
Referencia de control de corriente	0.85 A
Banda de histéresis	0.1 A
Voltaje de referencia	3.7V
Capacitores	10000µF



(a) (b)

Figura 3. 10. Simulación en PSIM (a) Topología propuesta, (b) Control de balance propuesto.

3.2.1 Caso 1 de simulación.

El primer caso de simulación se presenta cuando los capacitores están descargados y desbalanceados por debajo del voltaje de referencia establecido. En esta ocasión el voltaje de referencia es el voltaje nominal de una celda de batería Li-Po. En la tabla 3.6 se muestran los voltajes iniciales de los capacitores.

Tabla 3. 6. Voltajes iniciales caso 1.

Capacitor	*Voltajes iniciales*
1	3
2	3.1
3	3
4	3.2
5	3.3
6	3.1
7	3

En la Figura 3.11 se muestran los voltajes de los capacitores al inicio de la simulación y al final de la simulación donde ya se realizó el proceso de balance y carga.

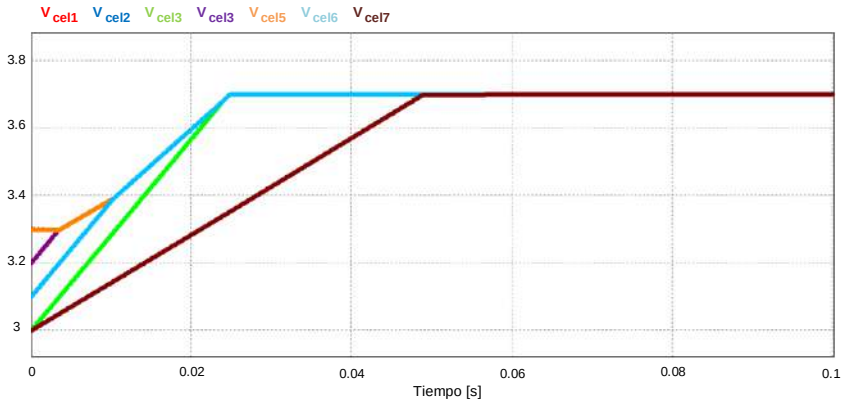


Figura 3. 11. Simulación de balance de capacitores caso 1.

Como se puede ver los voltajes se balancean de manera correcta hasta llegar al voltaje de referencia establecido, se puede ver que, durante el proceso, unos capacitores se balancean primero pero mientras se van cargando se van igualando los voltajes con los otros. Esto se debe al proceso de balance propuesto, ya que

toma como referencia los errores, pero al final todos los capacitores se balancean correctamente.

En la Figura 3.12 se muestra el voltaje total de todos los capacitores que simulan todas las celdas del paquete de la batería, se puede ver que se van cargando hasta llegar a su valor máximo que es 25.9V, esto significa que los capacitores están balanceados y cargados.

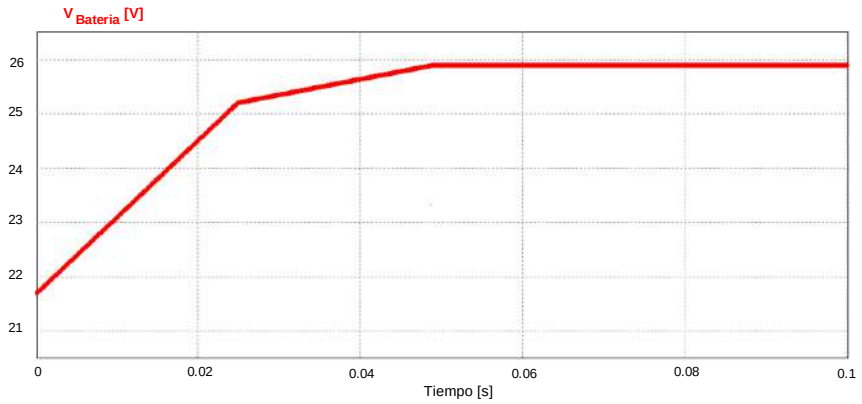


Figura 3. 12. Voltaje total de los capacitores caso 1.

En la Figura 3.13 se muestra la corriente I_L , se ve que el control de corriente responde de manera adecuada a la referencia y la banda de histéresis que se estableció para los casos de simulación. Al finalizar el proceso de balance y carga se activan los MOSFET's de libre circulación para que se descarga completamente el inductor.

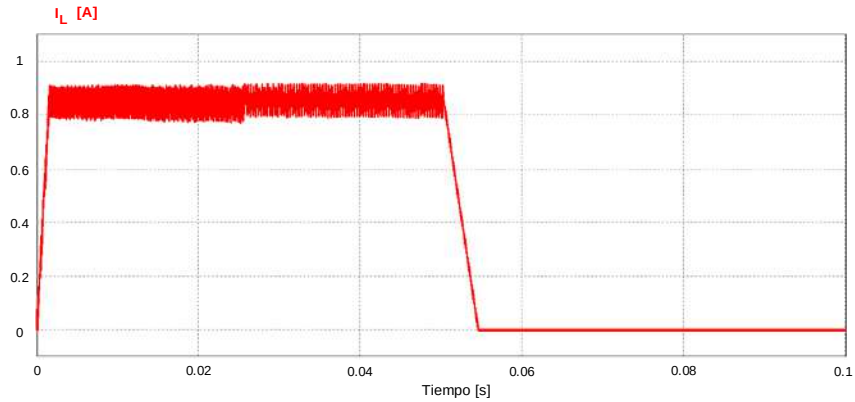


Figura 3. 13. Corriente en el inductor I_L caso 1.

En la Figura 3.14 se muestran los errores máximos y mínimos que parten de valores negativos al inicio de la simulación, ya que en esta situación los capacitores tienen un voltaje inferior al voltaje de referencia establecido. Durante el proceso de balance y carga se puede ver como estos van tendiendo a 0 debido a que los capacitores se están balanceando y cargando respecto al voltaje de referencia.

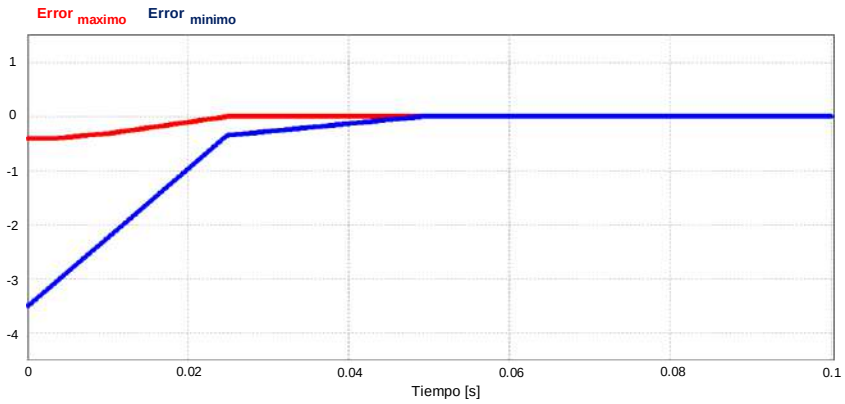


Figura 3. 14. Errores máximo y mínimo caso 1.

En la Figura 3.15 se muestran la señal que genera las etapas del cargador, se puede ver que durante el proceso de balance y carga la señal toma valores de 0 a 2, pero hay un momento donde solo va de 0 a 1, esto se debe a la condición establecida en el proceso de balance. Los capacitores al estar balanceados entran al rango establecido de paro, la señal toma el valor de 3 por lo cual se detiene el proceso de balance y carga activando los MOSFET´s de libre circulación.

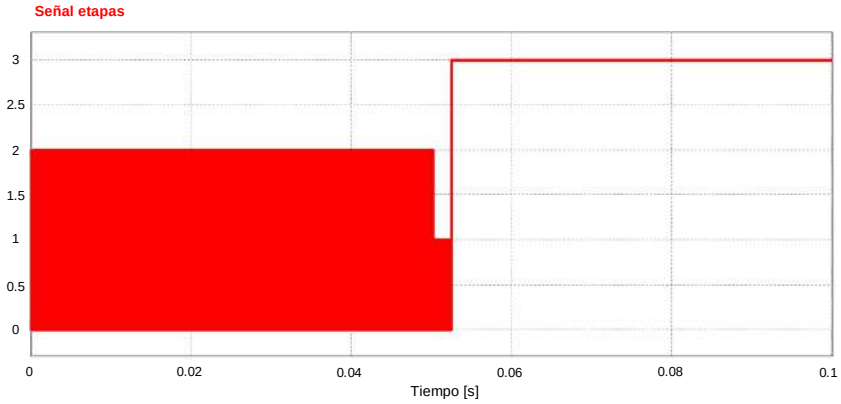


Figura 3. 15. Señal de etapas caso 1.

En la Figura 3.16 se muestran los casos de carga y descarga se presentaron en durante el proceso de balance y carga.

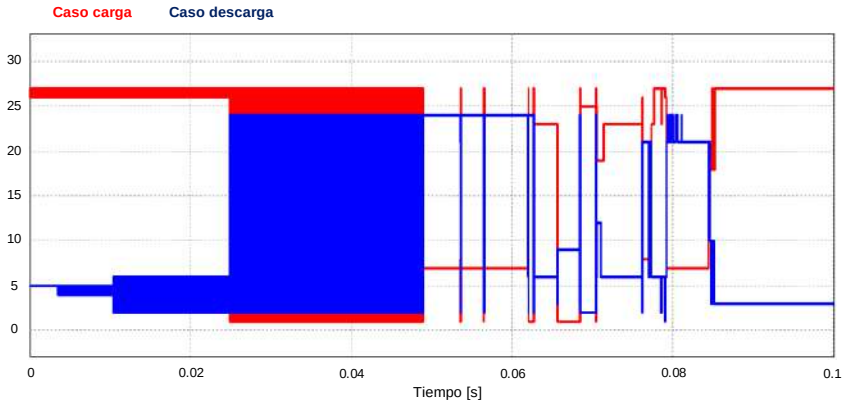


Figura 3. 16. Casos de descarga y carga caso 1.

3.2.2 Caso 2 de simulación.

En el segundo caso de simulación se presentan la situación cuando los voltajes de los capacitores están por encima del voltaje de referencia. El voltaje de referencia se establece en 3.7V de acuerdo con la tabla 3.5. En la tabla 3.7 se muestran los voltajes iniciales de los capacitores.

Tabla 3. 7. Voltajes iniciales caso 2.

Capacitor	*Voltajes iniciales*
1	4
2	4.1
3	3.9
4	4
5	3.8
6	4.2
7	4

En la Figura 3.17 se muestra que todos los capacitores tienen al inicio de la simulación un voltaje superior al voltaje de referencia establecido. Al finalizar la simulación del proceso de balance se muestra como los voltajes se fueron descargando hasta llegar al voltaje de referencia por lo que el balance funciona correctamente.

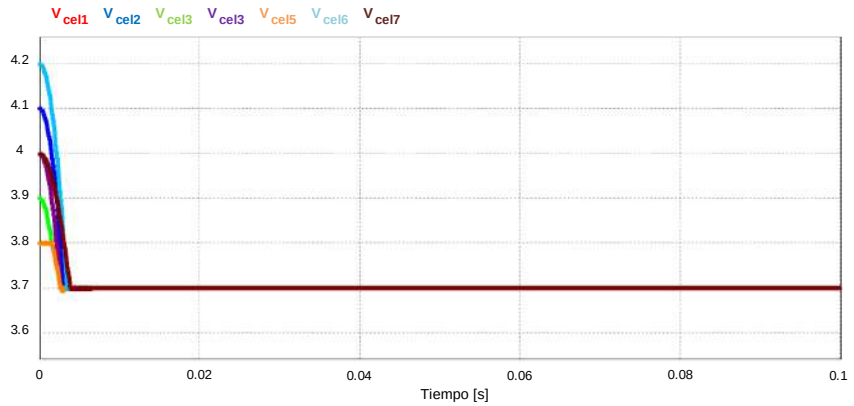


Figura 3. 17. Simulación de balance de capacitores caso 2.

En la Figura 3.18 se muestra el voltaje total de todos los capacitores que inicialmente tiene un valor de 28V y en cuanto se van balanceando los capacitores disminuye hasta llegar al voltaje de 25.9V, esto significa que los capacitores están balanceados respecto al voltaje de referencia establecido. Esta situación comúnmente no se presenta en los balanceadores de celdas, ya que esto provoca que exista una pérdida de energía, pero en algunas ocasiones si es necesario cuando se quiere llevar la batería a modo reposo, pero esto es otro proceso que se tiene que llevar a cabo.

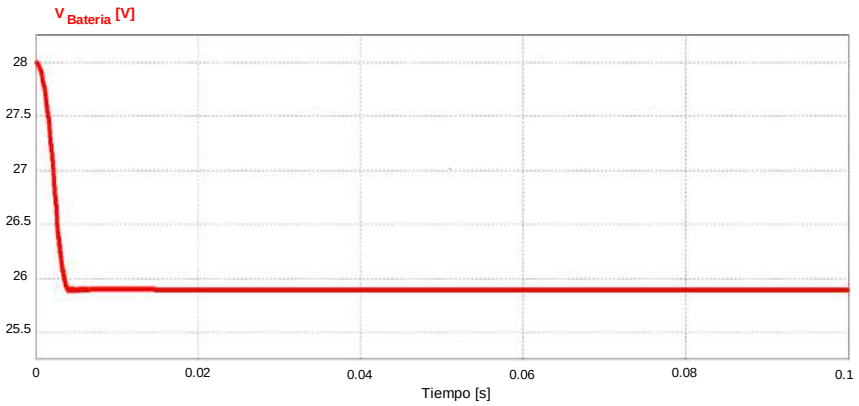


Figura 3. 18. Voltaje total de los capacitores caso 2.

En la Figura 3.19 se muestra la corriente I_L en este caso, se puede ver que la corriente se eleva mucho e ignora el control de histéresis establecido, ya que en esta situación el inductor siempre se está cargando, pero al finalizar el balance se ve como se descarga a través de los MOSFET's de libre circulación. Se debe tomar

en cuenta que la corriente en el inductor es solo de los voltajes de los capacitores, ya que en este caso de balance la fuente de voltaje no se activa, porque al desarrollarse el algoritmo de balance y carga se implementó una condición que cuando el voltaje de las celdas sea mayor al voltaje de referencia establecido por su número de celdas se desactiva el modo de operación 3 que es cuando el MOSFET SC se activa para cargar el inductor y transferir la energía a las celdas que la requieran, por esta razón en este caso solo se activan los modos de operación 1 y 2.

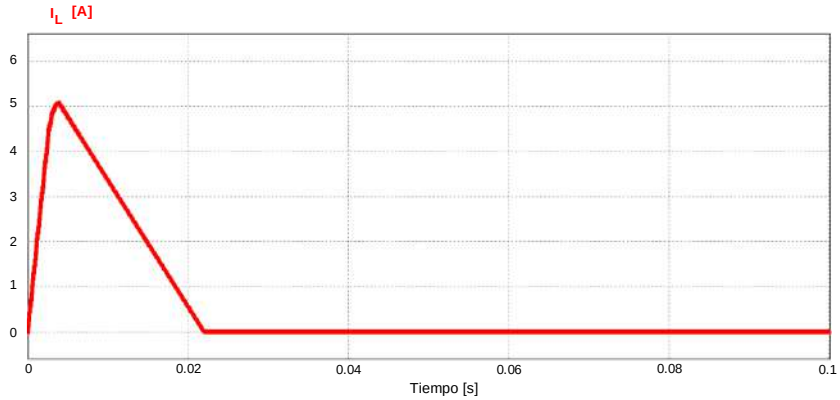


Figura 3. 19. Corriente en el inductor I_L caso 2.

En la Figura 3.20 se muestra que los errores máximos y mínimos tienen un valor positivo al inicio de la simulación, ya que en este caso los voltajes están por encima del voltaje de referencia, pero durante el proceso de balance estos van disminuyendo hasta llegar a 0 que es cuando los capacitores están balanceados de acuerdo con el voltaje de referencia establecido.

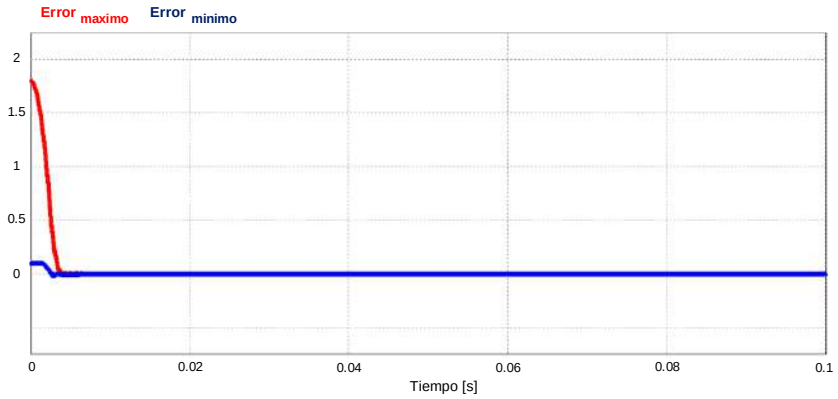


Figura 3. 20. Errores máximo y mínimo caso 2.

En la Figura 3.21 se muestra la señal que activa los modos de operación, y debido a que en este caso se presenta la condición de cuando los voltajes están por encima del voltaje de referencia, solo se activan el modo de operación 1 y 2, o sea que la señal solo tomara valores de 0 a 1 a lo largo del proceso de balance. Al finalizar el proceso de balance y las celdas entran al rango de balance la señal toma el valor de 3 y se activan los MOSFET's de libre circulación para descargar el inductor. La condición establecida para este caso es óptima ya que de esta manera en el inductor no se presentan corrientes innecesarias, ya que a los capacitores no necesitan más energía, si no solo balancearse. En la Figura 3.22 se muestran los casos de carga y descarga que se presentaron a lo largo del proceso de balance.

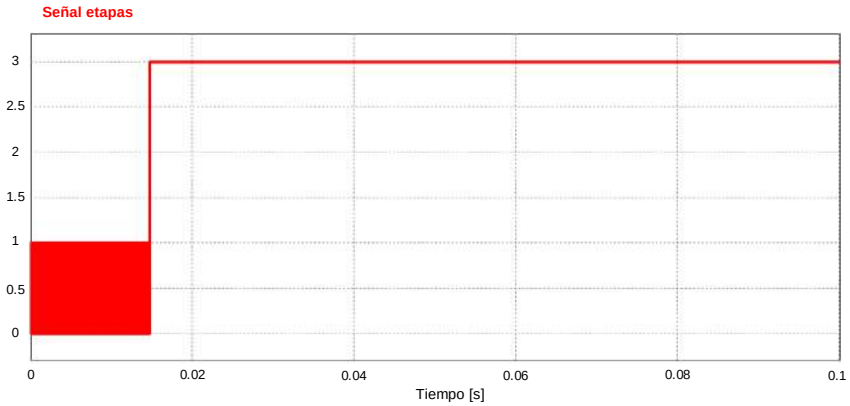


Figura 3. 21. Señal de etapas caso 2.

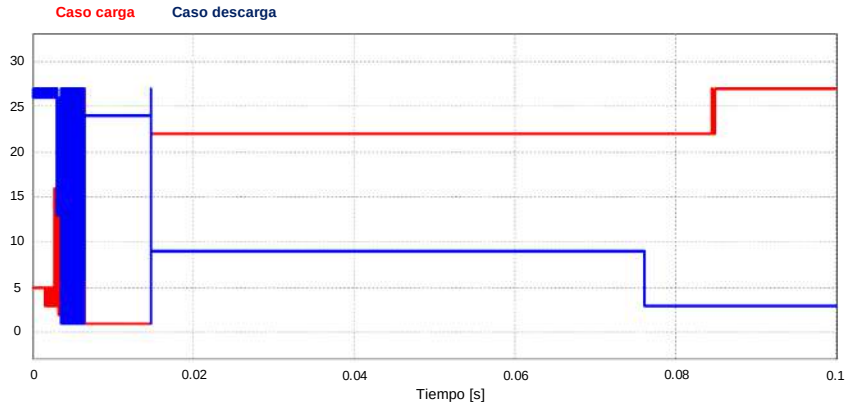


Figura 3. 22. Casos de descarga y carga caso 2.

3.2.3 Caso 3 de simulación.

En el tercer caso de simulación se presenta la situación donde los voltajes de los capacitores inician tanto por encima y por debajo del voltaje de referencia. El voltaje

de referencia se establece en 3.7V de acuerdo con la tabla 3.5. En la tabla 3.8 se establecen los voltajes iniciales en los capacitores.

Tabla 3. 8. Voltajes iniciales caso 3.

Capacitor	*Voltajes iniciales*
1	4
2	3.8
3	3.6
4	3.4
5	3.2
6	3
7	3.2

En la Figura 3.23 se muestra como los capacitores al inicio de la simulación tienen diferentes voltajes que están por encima y por debajo del voltaje de referencia establecido, pero al final de la simulación del proceso de balance y carga todos se igualan al valor del voltaje de referencia. Se puede ver que los voltajes que están más cerca al voltaje de referencia son los que primero se balancean y los que están más alejados son los últimos.

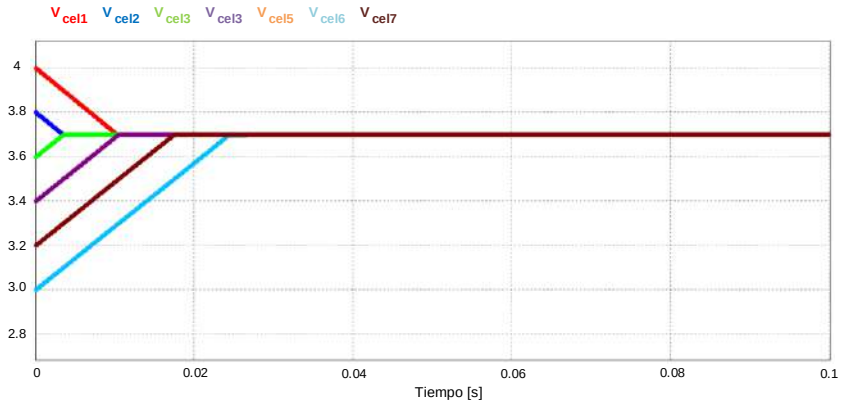


Figura 3. 23. Simulación de balance de capacitores caso 3.

En la Figura 3.24 se muestra como el voltaje total de los capacitores se va cargando de manera correcta hasta su valor máximo que es 25.9V, esto significa que los capacitores están completamente cargados y balanceados.

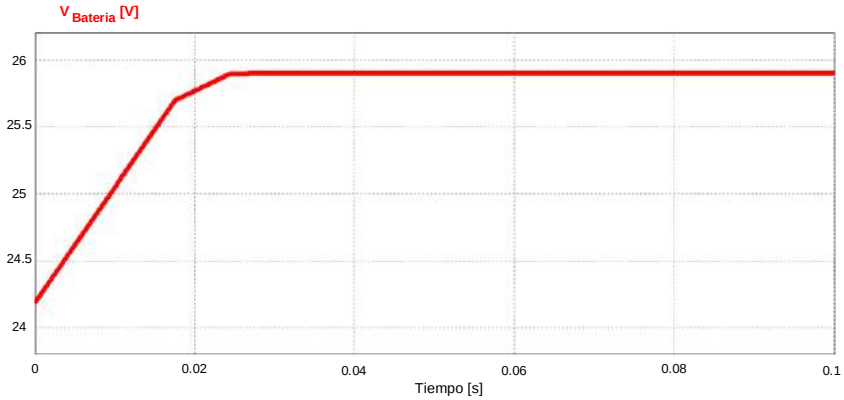


Figura 3. 24. Voltaje total de los capacitores caso 3.

En la Figura 3.25 se muestra la corriente I_L , se puede ver que el control de corriente responde de manera adecuada a la referencia y la banda de histéresis establecidas. Al finalizar el proceso de balance y carga de los capacitores se descarga el inductor ya que se activan los MOSFET's de libre circulación.

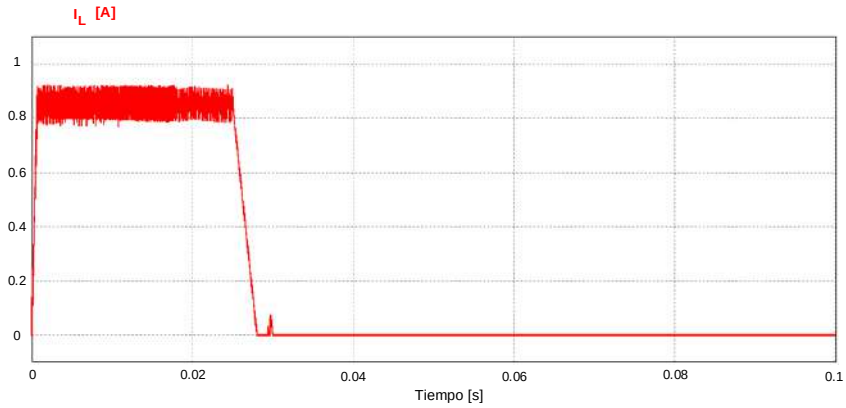


Figura 3. 25. Corriente en el inductor I_L caso 3.

En la figura 3.26 se muestran los errores máximos y mínimos, cómo se puede ver en este caso al inicio de la simulación el error maximo tiene valor positivo y el error mínimo valor negativo, pero durante la simulación estos se aproximan a 0, significando que los capacitores están balanceados correctamente. En la Figura 3.27 se muestra la señal que activa los modos de operación, cómo se puede ver en este caso de simulación la señal va de 0 a 2 durante el proceso de balance y carga, pero cuando los voltajes de los capacitores están dentro del rango de balance la señal toma el valor de 3 para activar los MOSFET's de libre circulación y dar cómo

finalizado el balance. En la Figura 3.28 se muestran los casos de descarga y carga que se presentaron durante el proceso de balance y carga de los capacitores.

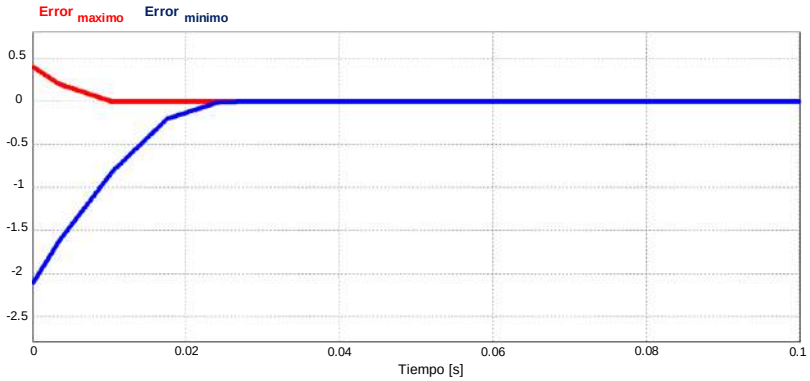


Figura 3. 26. Errores máximo y mínimo caso 3.

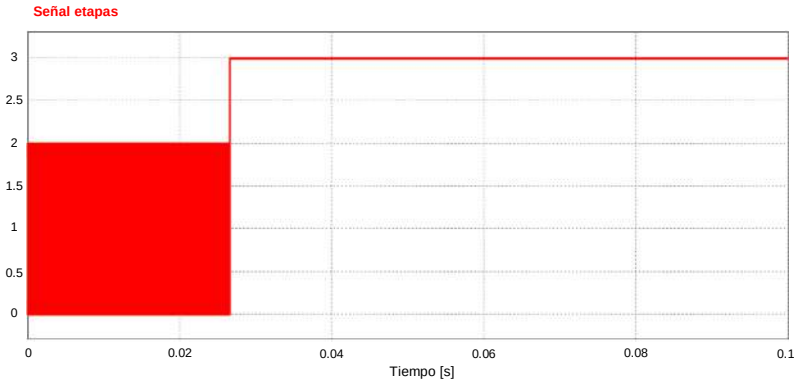


Figura 3. 27. Señal de etapas caso 3.

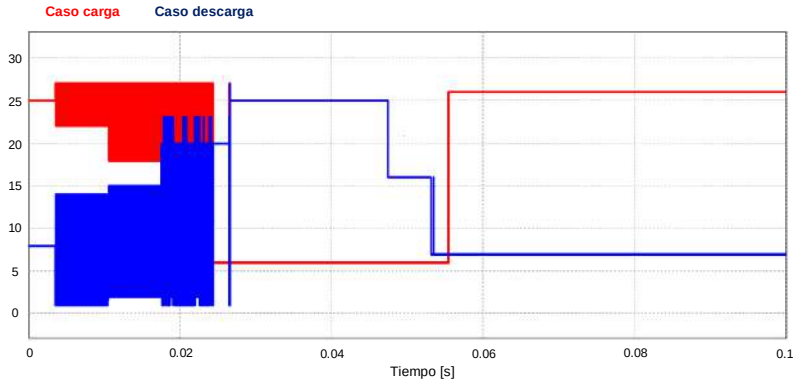


Figura 3. 28. Casos de descarga y carga caso 3.

3.3 Resultados experimentales

Para comprobar la topología de balance con el cargador y el algoritmo de balance propuestos se implementó la topología para dos celdas, en este caso en vez de balancear una batería de dos celdas se hicieron las pruebas con dos capacitores. Para esto se adaptó el algoritmo de balance para dos capacitores que simularan dos celdas. En la tabla 3.9 se muestran los arreglos de los capacitores cómo también los casos de carga y descarga, además también el código en el software LabVIEW se modificó para solo dos capacitores.

Tabla 3. 9. Casos de carga y descarga para dos capacitores.

Combinación de capacitores	*Caso Descarga*	*Interruptores encendidos*	*Caso Carga*	*Interruptores encendidos*
C_1	1	S_2, S_3	1	S_1, S_4
C_2	2	S_4, S_5	2	S_3, S_6
C_1C_2	3	S_2, S_5	3	S_1, S_6

Para comprobar que el balance y la carga funcionan correctamente se realizaron pruebas en 4 casos diferentes. Los parámetros establecidos para las pruebas se muestran en la tabla 3.10. Cómo se ve en la tabla 3.10 el inductor que se utilizará será el mismo que se utilizó para realizar las simulaciones.

Tabla 3. 10. Parámetros para pruebas experimentales.

Parámetro	*Valor*
Inductancia	250µh
Frecuencia generadora de etapas	100khz
Referencia de control de corriente	0.35 A
Banda de histéresis	0.1 A
Voltaje de referencia	3V
Capacitores	4700µF

3.3.1 Caso 1 de pruebas experimentales.

El primer caso es cuando los dos capacitores se tienen que cargar y balancear. Esto significa que están por debajo del voltaje de referencia. En este caso se realizó la prueba cargando los capacitores casi completamente descargados, algo que no se debe hacer en una batería Li-Po, pero debido a que son capacitores no hay problema. En la tabla 3.11 se muestran los voltajes iniciales de los capacitores.

Tabla 3. 11. Voltajes iniciales de capacitores caso 1.

Capacitor	*Voltajes iniciales*
1	250mV
2	200mV

En la Figura 3.29 se muestra la carga y el balance de los capacitores, además también se muestra la corriente en el inductor I_L durante el proceso de balance y carga.

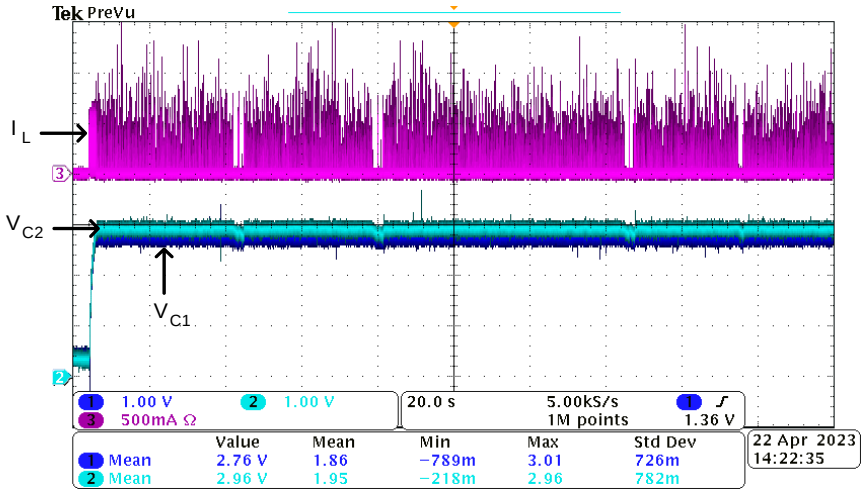


Figura 3. 29. Balance y carga de capacitores caso 1.

Cómo se puede ver los capacitores se cargan y se van balanceándose correctamente hasta aproximarse al voltaje de referencia. Los voltajes de los capacitores tienden al voltaje de referencia, pero estos no entran al rango de balance para que la señal tome el valor de 3 que significa que están balanceados y detener el proceso de balance y carga. Esto no sucede ya que los voltajes de los capacitores al aproximarse al voltaje de referencia siempre tienen una diferencia de 30mV a 70mV entre ellos, por esta razón se siguen balanceando por lo que se sigue transfiriendo energía entre ellos. Esto hace que la corriente en el inductor siga teniendo picos y no se descargue por completo. Esto se puede deber a qué los capacitores no tienen la misma dinámica que una batería Li-Po, por los dispositivos usados en los PCB's o por el programa en LabVIEW. En la Figura 3.30 se muestra

un acercamiento a la corriente durante el proceso de balance y la carga de los capacitores, como se puede ver la corriente no se controla adecuadamente, ya que presentaba mucho rizo durante el proceso de carga, esto en una bateria Li-Po puede causar daños y disminuir su vida útil.

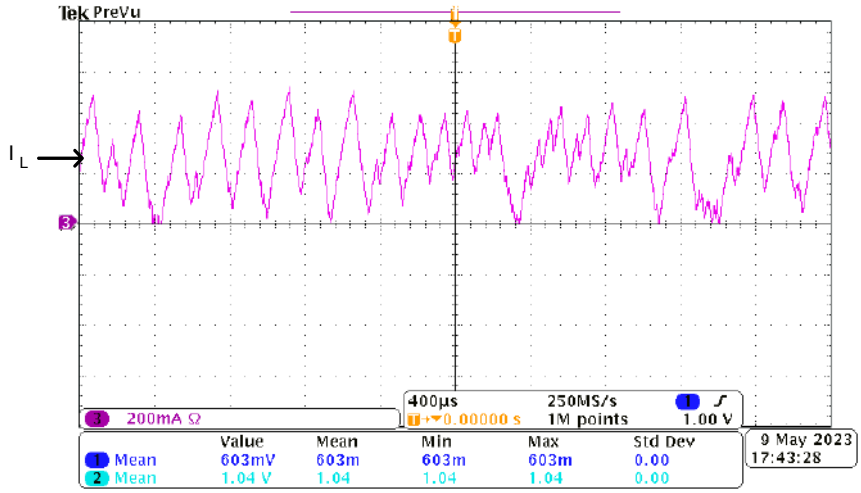


Figura 3. 30. Corriente en el inductor caso 1.

3.3.2 Caso 2 de pruebas experimentales.

El segundo caso de pruebas es cuando el capacitor 1 tiene mayor voltaje que el capacitor 2: Para que esta situación se presente se activa el modo forzado dónde el capacitor 1 se carga y el capacitor 2 se descarga. Después se desactiva el modo forzado para observar el balance. En la tabla 3.12 se muestran los voltajes iniciales de los capacitores antes del balance.

Tabla 3. 12. Voltajes iniciales de capacitores caso 2.

Capacitor	*Voltajes iniciales*
1	3.8V
2	1.8V

En la Figura 3.31 se muestran las señales que se deben activar para realizar el balance y la carga en este caso de acuerdo con la tabla 3.5.

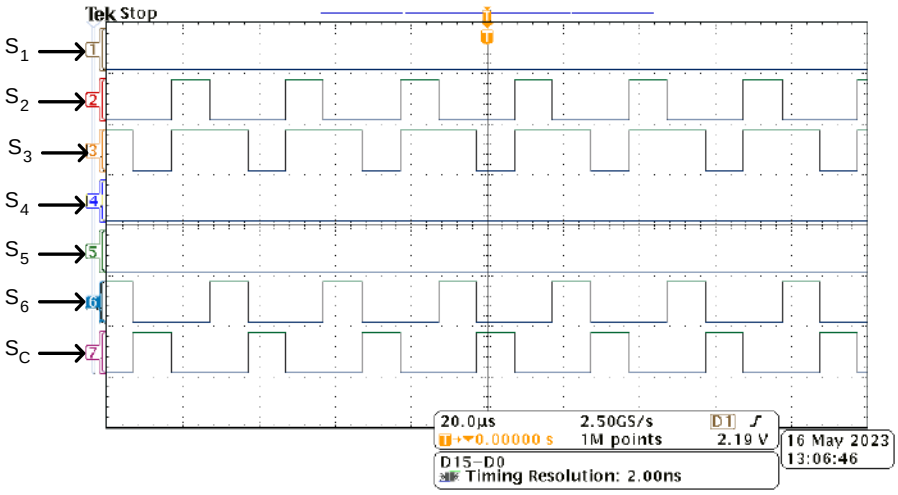


Figura 3. 31. Señales de control caso 2.

Como se puede ver las señales 2 y 3 que corresponden a los MOSFET's 2 y 3, se activan para descargar el capacitor 1. Posteriormente la señal 3 se queda activa y a la vez también se activa la señal 6 que corresponde al MOSFET 6 para cargar el capacito 2. Después se activa la señal 7 que corresponde al MOSFET SC que activa la fuente de voltaje. En la Figura 3.32 se muestra como el balance se realiza correctamente hasta aproximarse al voltaje de referencia.

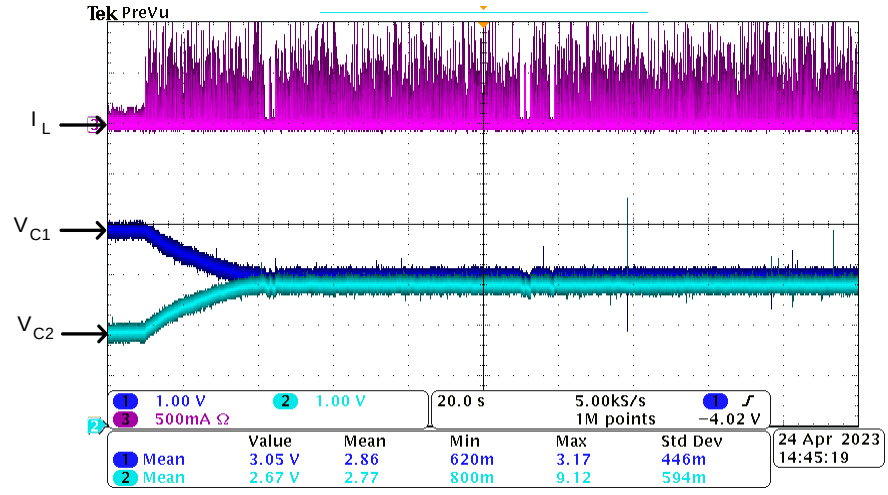


Figura 3. 32. Balance y carga de capacitores caso 2.

En este caso se presentó lo mismo que el caso anterior dónde los voltajes de los capacitores tienden al voltaje de referencia, pero estos no entran al rango de balance. Ya que también los voltajes de los capacitores también presentaron una

diferencia entre ellos de 30mV y 70mV. Por esta razón, aunque ya tienden al voltaje de referencia estos aún siguen transfiriendo energía entre ellos y por eso en la corriente del inductor se presentan picos de corriente. Esto se puede deber a qué los capacitores no tienen la misma dinámica que una batería Li-Po, por los dispositivos usados en los PCB's o por el programa en LabVIEW.

3.3.3 Caso 3 de pruebas experimentales.

El tercer caso de prueba es cuando el capacitor 2 tiene mayor voltaje que el capacitor 1. Para que esta situación se presente se activa el modo forzado dónde el capacitor 2 se carga y el capacitor 1 se descarga. Después se desactiva el modo forzado para observar el balance. En la tabla 3.13 se muestran los voltajes iniciales de los capacitores antes del balance.

Tabla 3. 13. Voltajes iniciales de capacitores caso 3.

Capacitor	*Voltajes iniciales*
1	3.8V
2	1.8V

En la Figura 3.33 se muestran las señales que se deben activar para realizar el balance y la carga en este caso.

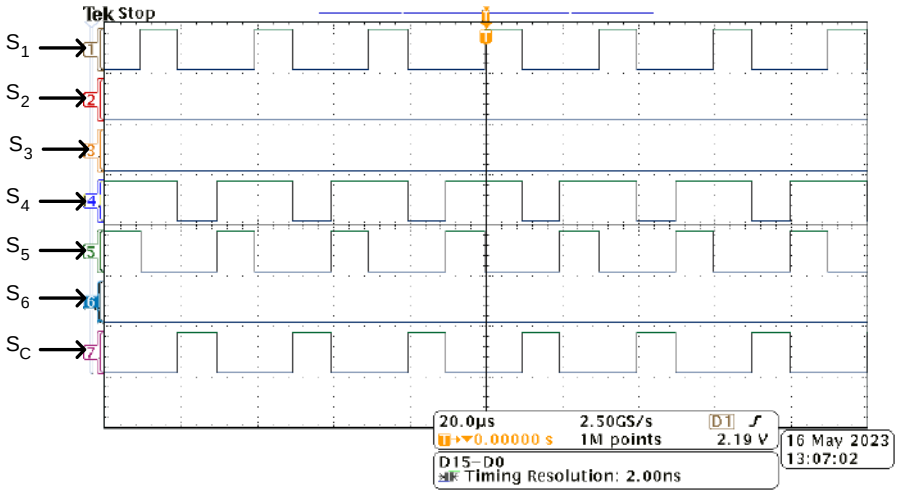


Figura 3. 33. Señales de control caso 3.

Como se puede ver las señales 4 y 5 que corresponden a los MOSFET's 4 y 5, se activan para descargar el capacitor 2. Posteriormente la señal 4 se queda activa y

a la vez también se activa la señal 1 que corresponde al MOSFET 1 para cargar el capacito 1. Después se activa la señal 7 que corresponde al MOSFET SC que activa la fuente de voltaje.

En la Figura 3.34 se muestra como el balance se realiza correctamente hasta aproximarse al voltaje de referencia. Al igual que en el primer y segundo caso, en este caso también al momento en que los voltajes de los capacitores tienden al voltaje de referencia, pero estos entran al rango de balance. Ya que también los voltajes de los capacitores también presentaron una diferencia entre ellos de 30mV y 70mV aproximadamente. Es por eso por lo que, aunque ya tienden al voltaje de referencia estos aún siguen transfiriendo energía entre ellos y por eso en la corriente del inductor se presentan picos de corriente. Esto se puede deber a qué los capacitores no tienen la misma dinámica que una batería Li-Po, por los dispositivos usados en los pcbs o por el programa en LabVIEW.

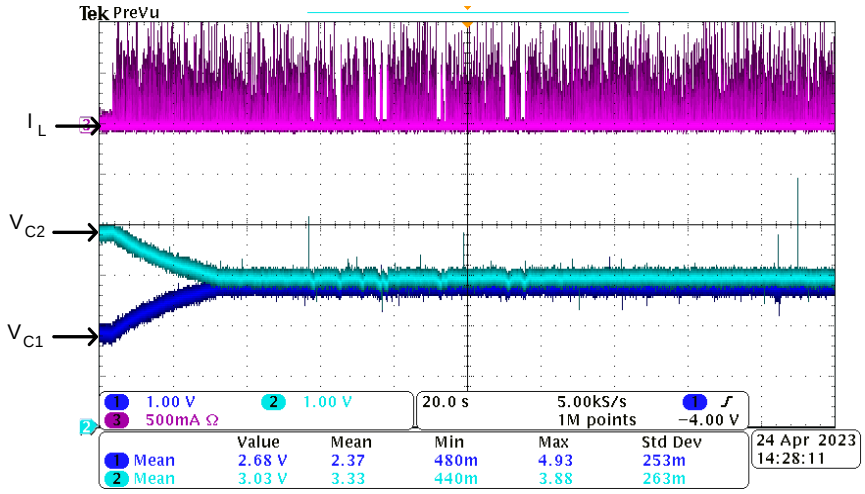


Figura 3. 34. Balance y carga de capacitores caso 3.

3.3.4 Caso 4 de pruebas experimentales.

El cuarto caso de prueba es cuando los voltajes de los capacitores están por encima del voltaje de referencia. Para que esté caso se presentara se implementó un proceso donde primero los dos capacitores se cargan y después se activa el balance. En este caso se utilizaron los parámetros de la tabla 3.6 para realizar las pruebas, pero se cambió el voltaje de referencia a 2.5 V para poder ver si podían

balancearse en un caso crítico. En la tabla 3.14 se muestra los voltajes iniciales de los capacitores.

Tabla 3. 14. Voltajes iniciales de capacitores caso 4.

Capacitor	*Voltajes iniciales*
1	7.5V
2	7.5V

En la Figura 3.35 se muestra las señales que deben activarse en este caso, como se poder ver en este caso no se activa la señal 7 que corresponde al MOSFET que activa la fuente de voltaje, ya que en este caso entra la condición donde solo se tienen que balancear los capacitores por lo que solo se activan los modos de operación 1 y 2.

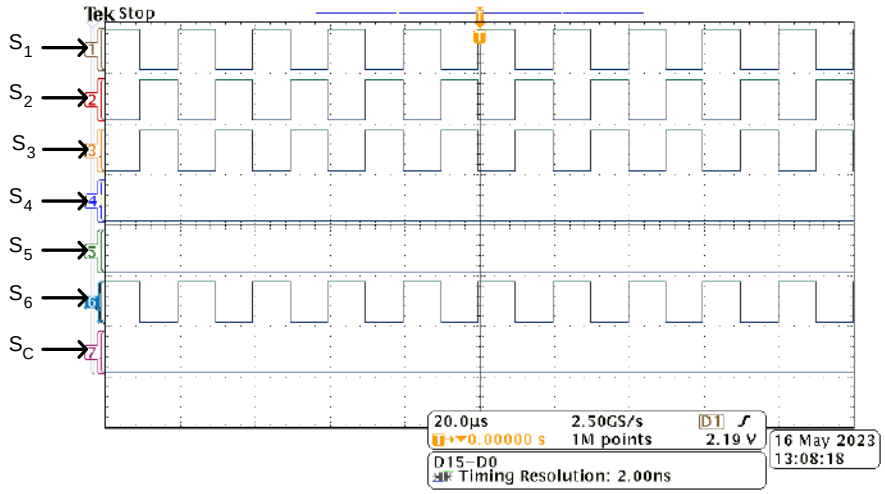


Figura 3. 35. Señales de control caso 4.

En la Figura 3.36 se muestra como los capacitores se descargan y balancean hasta aproximarse al voltaje de referencia. Al igual que los otros casos al momento en que los voltajes de los capacitores tienden al voltaje de referencia, pero estos no entran al rango de balance. Ya que estos siempre mantienen una diferencia que va desde los 30mV hasta los 70mV aproximadamente. Es por eso por lo que, aunque los voltajes de los capacitores tienden al voltaje de referencia estos aún siguen transfiriendo energía entre ellos y por esta razón en la corriente del inductor se siguen presentando picos de corriente. Esto se puede deber a qué los capacitores

no tienen la misma dinámica que una batería Li-Po, por los dispositivos usados en los PCB's o por el programa en LabVIEW.

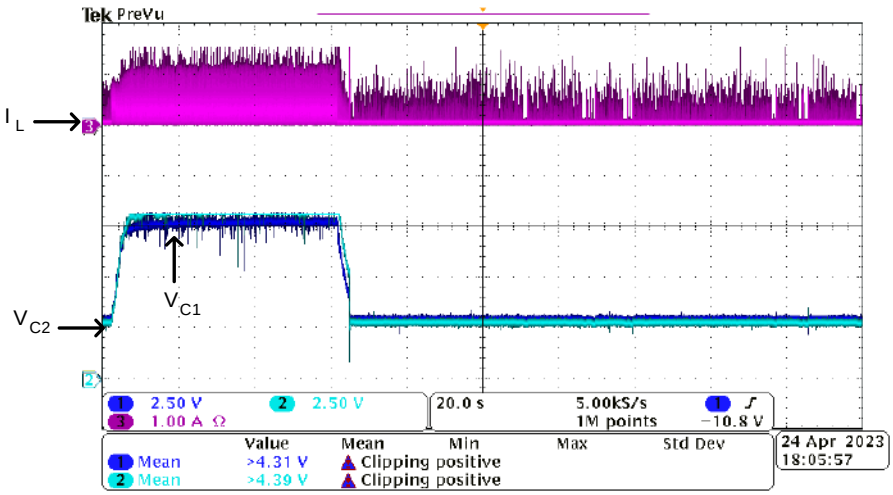


Figura 3. 36. Balance capacitores caso 4.

Conclusiones

El proceso de balance y carga de celdas de una batería Li-Po es muy importante para prolongar la vida útil de esta. En el proceso de carga se tienen que tomar en cuenta factores como la capacidad, tasa de carga, corriente máxima durante la carga y el proceso de balance de celdas es importante ya que sin este las celdas se cargarían a diferente tiempo con diferentes voltajes lo cual puede dañar la bateria ya que se pueden presentar sobrecargas que disminuyen la vida útil de la bateria. Por estas razones se han desarrollado y optimizado métodos de carga para que la carga sea segura, más rápida y además también se han desarrollado topologías de balance que realizan el balance en menos tiempo utilizando diferentes métodos de balance.

En este trabajo se presentó una topología de balance con carga para una bateria Li-Po de 7 celdas, cómo también un proceso de balance y carga. Está topología y proceso de balance busca realizar el balance en menos tiempo y a la vez cargar las celdas hasta llegar a un voltaje determinado que puede ser la carga máxima o el voltaje de nominal. Asimismo, se presentó un análisis de los diferentes modos de operación de esta topología, cómo también el desarrollo del proceso de balance y un control para la corriente en el inductor. El algoritmo de balance se implementó en el software LabVIEW utilizando los módulos LabVIEW Real-Time y LabVIEW FPGA, ya que se utilizó la SB RIO 9606 con la GPIC 9683 para la generación de señales de control.

En las simulaciones se comparó el balance propuesto el balance de la topología con un inductor en diferentes casos de desbalances que se pueden presentar en una bateria Li-Po, se confirmó que el balance propuesto realiza el balance más rápido manteniendo una eficiencia parecida entre los dos balances. Para verificar la carga y el balance se simularon diferentes casos que se pueden presentar en una bateria Li-Po, en todos los casos se balancearon y cargaron correctamente los capacitores que simularon las celdas de la bateria, de esta manera se validó la topología propuesta como el proceso de balance. Está topología puede ser aplicada a baterías Li-Po con diferentes números de celdas, aunque se debe tomar en cuenta que entre

más celdas tenga la batería se ocupará un número mayor de interruptores en la topología.

En las pruebas experimentales se implementó para balancear dos capacitores que simularon dos celdas de una bateria Li-Po. Al igual que en las simulaciones estas se realizaron en diferentes casos de balance y carga. En los resultados se comprobó que el balance se realiza de manera correcta, pero en estos casos se presentó que los voltajes de los capacitores nunca entraban en el rango de balance ya que siempre presentaban una diferencia de voltaje entre ellos. Esto se puede deber a qué la dinámica de los capacitores no es igual a la de una batería Li-Po, a la implementación del código en LabVIEW o a los dispositivos utilizados en el desarrollo de las PCBS. También se observó que la corriente presentaba mucho rizo, lo cual puede ser dañino para las celdas de la bateria, esto se debe a que el control que se propuso no es muy eficiente para controlar la corriente en el inductor. Esto también se debe por la topología propuesta ya que el utilizar inductores se presentan estos detalles en la corriente.

Trabajos a futuro

Al desarrollar el presente trabajo se observó que se pueden mejorar e implementar trabajos a futuro, estos son:

El desarrollo del circuito completo de la topología propuesta en PCB para la bateria Li-Po de 7 celdas. Además, la implementación del algoritmo y control propuesto en un microcontrolador para que el cargador sea practico.

La implementación de un control para el corriente más robusto, además de utilizar un sensor de corriente más eficiente para altas frecuencias para que de esta manera no se presenten problemas en la corriente para la bateria Li-Po.

Desarrollo de un mejor diseño del inductor tomando en cuenta todos los modos de operación y las situaciones que se pueden presentar en su carga y descarga, ya que en el trabajo propuesto solo se tomaron dos modos de operación y las situaciones más críticas para su diseño.

Referencias bibliográficas

[1] PR Newswire Association LLC, Lithium-Ion Battery Market is Expected to Reach $46.21 Billion, Worldwide, by 2022. Available online: https://www.prnewswire.com/news-releases/lithium-ion-battery-market-isexpected-to-reach-4621-billion-worldwide-by-2022-575386231.html (accessed on 12 March 2018).

[2] Hoang Thi Quynh Chi, Do-Hyun Park and Dong-Choon Lee, "An advanced fast charging strategy for lithium polymer batteries," 2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), Taipei, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/IFEEC.2015.7361538.

[3] H. Suryoatmojo, "Design Li-Po Battery Charger with Buck Converter under Partially CC-CV Method," 2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Surabaya, Indonesia, 2020, pp. 101-106, doi: 10.1109/ISITIA49792.2020.9163754.

[4] X. Liu, Z. Wan, Y. He, X. Zheng, G. Zeng, and J. Zhang, “A Unified Control Strategy for Inductor-Based Active Battery Equalisation Schemes,” Energies, vol. 11, no. 2, p. 405, Feb. 2018, doi: 10.3390/en11020405.

[5] J. Amanor-Boadu, A. Guiseppi-Elie, and E. Sánchez-Sinencio, “The Impact of Pulse Charging Parameters on the Life Cycle of Lithium-Ion Polymer Batteries,” Energies, vol. 11, no. 8, p. 2162, Aug. 2018, doi: 10.3390/en11082162.

[6] N. E. Ghossein, J. P. Salameh, N. Karami, M. E. Hassan and M. B. Najjar, "Survey on electrical modeling methods applied on different battery types," 2015 Third International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAEECE), Beirut, Lebanon, 2015, pp. 39-44, doi: 10.1109/TAEECE.2015.7113597.

[7] D. Rimpas, A. Kiatipis, “Charging strategy effect on lithium polymer battery capacity: A case study” International Journal of Energy and Enviroment, vol. 11, no. 2, pp. 107-118, 2020.

[8] I. Silvas, A. Osbel, "Algoritmo inteligente para la optimización del proceso de carga en una batería LiPo.", Tesis, Universidad Autónoma de Baja California, 2019.

[9] Blog de CochecitosRC “Entendiendo las baterias lipo”, July, 2021. Available: https://cochecitosrc.com/blog/blog-de-cochecitosrc/entendiendo-las-baterias-lipo

[10] E. Banguero, A. Correcher, Á. Pérez-Navarro, F. Morant, and A. Aristizabal, “A Review on Battery Charging and Discharging Control Strategies: Application to Renewable Energy Systems,” Energies, vol. 11, no. 4, p. 1021, Apr. 2018, doi: 10.3390/en11041021.

[11] O. Islas, M.A. Sanchez, L. Aguilar, L.E. Palafox, “Optimización del proceso de carga de una batería LiPo utilizando el dispositivo integrado TP4056.”, Número especial de la revista Aristas: Investigación básica y aplicada, vol.6, num. 12, pp. 112-117, 2018.

[12] J. M. Amanor-Boadu and A. Guiseppi-Elie, “Improved Performance of Li-ion Polymer Batteries Through Improved Pulse Charging Algorithm,” Applied Sciences, vol. 10, no. 3, p. 895, Jan. 2020, doi: 10.3390/app10030895.

[13] M. Guachamín, E. Pico, “Diseño y construcción de un cargador universal portátil de baterías con alimentación de la red eléctrica o fuente DC de 12 voltios de un automóvil.”, Tesis, Quito, 2016.

[14] D. Quintana Bea, “Diseño de celdas y BMS para una batería de Ion-Litio integrada en un prototipo de moto de competición totalmente eléctrica”, Tesis, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2021.

[15] S. Castano-Solis, D. Serrano-Jimenez, L. Gauchia, and J. Sanz, “The Influence of BMSs on the Characterization and Modeling of Series and Parallel Li-Ion Packs,” Energies, vol. 10, no. 3, p. 273, Feb. 2017, doi: 10.3390/en10030273.

[16] M. M. Hoque, M.A. Hannan, A. Mohamed, A. Ayob, “Battery charge equalization controller in electric vehicle applications: A review.” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75, 1363-1385, 2017.

[17] A.B. Ahmad, C.A Ooi, D. Ishak, J. Teh, (2019). “Cell balancing topologies in battery energy storage systems: A review” In 10th International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications: Enabling Research and Innovation Towards Sustainability, Springer Singapore, pp. 159-165, 2019.

[18] M. Daowd, N. Omar, P. Van Den Bossche and J. Van Mierlo, "Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation," 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago, IL, USA, 2011, pp. 1-7, doi: 10.1109/VPPC.2011.6043010.

[19] A. Alvarez-Diazcomas, A. A. Estévez-Bén, J. Rodríguez-Reséndiz, M.-A. Martínez-Prado, R. V. Carrillo-Serrano, and S. Thenozhi, “A Review of Battery Equalizer Circuits for Electric Vehicle Applications,” *Energies*, vol. 13, no. 21, p. 5688, Oct. 2020, doi: 10.3390/en13215688.

[20] M. -Y. Kim, C. -H. Kim, J. -H. Kim and G. -W. Moon, "A Chain Structure of Switched Capacitor for Improved Cell Balancing Speed of Lithium-Ion Batteries," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 8, pp. 3989-3999, Aug. 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2288195.

[21] M. Caspar, T. Eiler and S. Hohmann, "Comparison of Active Battery Balancing Systems," 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Coimbra, Portugal, 2014, pp. 1-8, doi: 10.1109/VPPC.2014.7007027.

[22] J. Gallardo-Lozano, E. Romero-Cadaval, M. I. Milanes-Montero, and M. A. Guerrero-Martinez, “Battery equalization active methods,” Journal of Power Sources, vol. 246, no. Complete, pp. 934–949, Jan. 2014.

[23] G. N, G. Yadav and G. CK, "Analysis and Implementation of Inductor Based Active Battery Cell Balancing Topology," 2020 IEEE International Conference on

Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDES49360.2020.9379358.

[24] S. Jeon, M. Kim, S. Bae, “Analysis of a symmetric active cell balancer with a multi-winding transformer.”, Journal of Electrical Engineering and Technology, vol.12, no.5, pp. 1812-1820, 2017.

[25] S. Yarlagadda, T. T. Hartley and I. Husain, "A Battery Management System Using an Active Charge Equalization Technique Based on a DC/DC Converter Topology," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, no. 6, pp. 2720-2729, Nov.-Dec. 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2264794.

[26] Y. Cao, K. Li and M. Lu, "Balancing Method Based on Flyback Converter for Series-Connected Cells," in IEEE Access, vol. 9, pp. 52393-52403, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3070047.

[27] H. Liu and C. Xia, "An efficient battery balancing scheme in electric vehicle," 2013 International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment, Chengdu, China, 2013, pp. 541-544, doi: 10.1109/ICMREE.2013.6893730.

[28] J. I. Pérez, Y.M. Walteros, “Sistema de gestión de carga para baterías de ion-litio”, Tesis, Pontifivia Universidad Javeriana, Bogota, 2016.

[29] O. Romero,” Control predictivo de estados finitos basado en modelos aplicado en un inversor cuasi-fuente impedancia.”, Tesis, Tecnológico de Monterrey, Monterrey, 2017.