



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIERÍA  
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

# **DISEÑO DE CELDAS Y BMS PARA UNA BATERÍA DE ION-LITIO INTEGRADA EN UN PROTOTIPO DE MOTO DE COMPETICIÓN TOTALMENTE ELÉCTRICA**

AUTOR: DIEGO QUINTANA BEA

TUTOR: RAÚL GONZÁLEZ MEDINA

COTUTOR: EMILIO FIGUERES AMORÓS

**Curso Académico: 2019-20**

# RESUMEN

Actualmente se está viviendo una revolución en la movilidad motivada principalmente por la crítica situación medioambiental, la cual está llevando al transporte a un terreno más sostenible como es el caso de la tecnología eléctrica.

Dicha tecnología, aún teniendo ya en este momento cierta presencia, se encuentra todavía en completo desarrollo, en especial las baterías, que son las encargadas del almacenamiento y la gestión de la energía. Estas pueden ser la pieza clave para que este cambio suponga un claro avance respecto al actual motor de combustión interna.

El presente TFG va a consistir en el estudio de las diferentes celdas y distintos tipos de sistemas de gestión de la batería (BMS) para diseñar la batería que se utilizará en un prototipo de moto eléctrica de competición y su posterior simulación.

Como resultado de este trabajo se espera plasmar el estado de desarrollo de las distintas celdas electroquímicas que hay disponibles, así como las diferentes tecnologías de BMS que podemos encontrar en el mercado. A parte de ello, y tras hacer una propuesta de batería integral, también se realizará un análisis y valoración de su comportamiento tras simular su funcionamiento.

**Palabras Clave:** Batería, celda, BMS, diseño, simulación.

# RESUM

Actualment s'està vivint una revolució en la mobilitat motivada principalment per la crítica situació mediambiental, que està conduint al transport a un terreny més sostenible com és el cas de la tecnologia elèctrica.

Aquesta tecnologia, tot i tenir ja en aquest moment certa presència, es troba en complet desenvolupament, especialment les bateries, que són les encarregades de l'emmagatzematge i la gestió de l'energia. Aquestes poden ser la clau perquè este canvi supose un clar avanç respecte a l'actual motor de combustió interna.

El present TFG consistirà en l'estudi de les diferents cel·les i distints tipus de sistemes de gestió de la bateria (BMS) per a dissenyar la bateria que s'utilitzarà en un prototip de moto elèctrica de competició i la seua posterior simulació.

Com a resultat d'aquest treball s'espera plasmar l'estat de desenvolupament de les diferents cel·les electroquímiques que hi ha disponibles, així com les diferents tecnologies de BMS que podem trobar al mercat. A banda, i després de fer una proposta de bateria integral, també es realitzarà una anàlisi i valoració del seu comportament i se'n simularà el seu comportament.

**Paraules clau:** Bateria, cel·la, BMS, disseny, simulació

# ABSTRACT

Nowadays the mobility is suffering a huge transformation mainly motivated by the critic environmental issue, which is leading transportation to a more sustainable field as in the case of electric technology.

This kind of technology already has a certain presence at present. However, it is still in full development, specially the batteries, which are in charge of energy storage and management. These probably are the key to the electrical mobility success.

This final degree project consists of the study of the different types of cells and battery management systems in order to design the battery which will use a prototype of a competition electric motorcycle.

As a result of this project it is expected to capture the state of the art of the different electrochemical cells and BMSs. Apart from this, and after making a proposal for an integral battery, an analysis and evaluation of its behaviour will also be carried out after its simulation.

**Keywords:** Battery, cell, BMS, design, simulation

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONTEXTO, MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO .....	1
1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO .....	2
1.3. METODOLOGÍA .....	2
<b>2. STATE OF THE ART DE LAS BATERÍAS .....</b>	<b>3</b>
2.1. INTRODUCCIÓN A LAS CELDAS ELECTROQUÍMICAS .....	3
2.2. TIPOS DE BATERÍAS ELÉCTRICAS .....	4
2.3. DIFERENTES BATERÍAS DE ION-LITIO .....	5
2.3.1. <i>Principales electrodos positivos</i> .....	6
2.3.2. <i>Principales electrodos negativos</i> .....	7
2.3.3. <i>Principales electrolitos</i> .....	9
2.3.3.1. Electrolitos en estado líquido .....	9
2.3.3.2. Electrolitos en estado sólido .....	12
<b>3. STATE OF THE ART DE LOS BMS .....</b>	<b>14</b>
3.1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE GESTIÓN DE BATERÍA .....	14
3.2. FUNCIONES PRINCIPALES DE UN BMS .....	14
3.3. TIPOS DE EQUILIBRADO DE CELDAS .....	19
3.3.1. <i>Métodos de equilibrado pasivo</i> .....	20
3.3.2. <i>Métodos de equilibrado activo</i> .....	21
3.3.2.1. Equilibrado con condensadores .....	22
3.3.2.2. Equilibrado con inductores .....	22
3.3.2.3. Equilibrado con transformadores .....	24
3.3.2.4. Equilibrado con convertidores .....	25
3.3.3. <i>Comparación entre métodos</i> .....	28
<b>4. DISEÑO DE BATERÍA Y BMS .....</b>	<b>30</b>
4.1. DISEÑO DE LA BATERÍA .....	31
4.2. DISEÑO DEL BMS .....	35
4.2.1. <i>Comparativa de los métodos</i> .....	39
4.2.2. <i>Selección y diseño de circuito</i> .....	47
<b>5. SIMULACIONES DE CARRERA .....</b>	<b>52</b>
<b>6. PRESUPUESTO .....</b>	<b>58</b>
6.1. SOFTWARE .....	58
6.2. MATERIALES .....	58
6.3. MANO DE OBRA .....	58
6.4. COSTE TOTAL .....	59
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>60</b>
<b>8. TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>62</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO DE CÁLCULOS .....</b>	<b>I</b>
A.1. ELECCIÓN DE CELDAS .....	I
A.1.1. <i>Diseño de batería para la celda Panasonic/Sanyo NCR2070C</i> .....	II
A.1.2. <i>Diseño de batería para la celda LG INR18650 HG2</i> .....	II
A.1.3. <i>Diseño de batería para la celda Samsung INR18650-25S</i> .....	III
A.1.4. <i>Diseño de batería para la celda PL-9759156-10C</i> .....	III
A.2. COMPROBACIONES ESPECÍFICAS DE LA BATERÍA SELECCIONADA .....	IV
A.2.1. <i>Comprobación de limitación de tensión</i> .....	IV
A.2.1. <i>Capacidad de implementación de frenado regenerativo</i> .....	V
A.3. DISEÑO DEL CIRCUITO DE EQUILIBRADO .....	V

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de carga y descarga de una celda electroquímica (Valdivia Miranda, 2018).....	4
Figura 2. Comparación de densidad energética (W h l-1) y energía específica (W h kg-1) de las diferentes baterías (Tarascon y Armand, 2001) .....	5
Figura 3. Resumen de actuales y futuras composiciones químicas de los electrodos de las baterías de Ion-Litio (Miao y otros, 2019) .....	8
Figura 4. Tamaño, peso y precio de una batería de Ion-Litio con electrolito líquido de 52Ah (Ulvestad, 2018) .....	10
Figura 5. Esquema de la composición de una batería de Ion-Litio con electrolito sólido de azufre (Ulvestad, 2018) .....	13
Figura 6. Comparación de las baterías de Ion-Litio más importantes («Is Li-ion the Solution for the Electric Vehicle? – Battery University», s. f.).....	14
Figura 6. Proceso de carga CC-CV de una batería (Lin y otros, 2019).....	15
Figura 7. Diferencia entre SoC y SoH (Achsan, 2020).....	17
Figura 8. Valores del SoF con respecto al ratio de carga/descarga y a la temperatura (Rezvanianiani y otros, 2014).....	17
Figura 9. Celdas desequilibradas vs celdas equilibradas (Hannan y otros, 2018).....	18
Figura 10. Esquema de las funciones principales de un BMS .....	19
Figura 11. Comparación entre balanceo activo y pasivo (Ahmad y otros, 2019) .....	20
Figura 12. Esquemas de equilibrado pasivo: (a) resistencia fija, (b) diodo zener, (c) resistencia conmutada (Plett y otros, 2013).....	21
Figura 13. Esquemas de equilibrado con condensadores: (a) condensador conmutado, (b) condensadores conmutados, (c) doble nivel de condensadores conmutados (Daowd, 2013) .....	22
Figura 14. Esquema (a) y funcionamiento de balanceo por un inductor (b), (c) (Daowd, 2011) .....	23
Figura 15. Esquema (a) y funcionamiento de un sistema de balanceo por múltiples inductores (b), (c) (Daowd, 2011) .....	23
Figura 16. Esquemas de equilibrado con transformadores: (a) devanado único, (b) devanados múltiples (Song y otros, 2018).....	24
Figura 17. Equilibrado con convertidor Cûk (Hoque, 2017) .....	25
Figura 18. Equilibrado con convertidor Buck-Boost (Daowd, 2011) .....	26
Figura 19. Equilibrado con convertidor Ramp (Hoque, 2017).....	26
Figura 20. Equilibrado con convertidor Full-bridge (Hoque, 2017) .....	27
Figura 21. Equilibrado con convertidor Resonant (Hoque, 2017) .....	27
Figura 22. Equilibrado con convertidor Flyback (Hoque, 2017) .....	28
Figura 23. Comparación de las baterías de Ion-Litio más importantes («Is Li-ion the Solution for the Electric Vehicle? – Battery University», s. f.).....	31
Figura 24. Esquema de conexión de las celdas de la batería.....	34
Figura 25. Comportamiento típico de equilibrado de celdas con diodos Zener.....	36
Figura 26. Esquema de condensadores conmutados optimizado (Wang y otros, 2017) ....	37
Figura 27. Esquemas de comportamiento de los esquemas de equilibrado: (a) condensadores conmutados, (b) doble nivel de condensadores conmutados, (c) condensadores conmutados optimizados (Ye y otros, 2017). .....	38

Figura 28. Esquema realizado en PSIM del método de condensadores conmutados convencional con 4 celdas .....	39
Figura 29. Resultados de la simulación 1.a para cada método –CC, DNCC y CCO– .....	41
Figura 30. Resultados de la simulación 1.b para cada método –CC, DNCC y CCO– .....	42
Figura 31. Resultados de la simulación 1.c para cada método –CC, DNCC y CCO– .....	43
Figura 32. Resultados de la simulación 2.a para cada método –CC, DNCC y CCO– .....	44
Figura 33. Resultados de la simulación 2.b para cada método –CC, DNCC y CCO– .....	45
Figura 34. Resultados de la simulación 2.c para cada método –CC, DNCC y CCO– .....	46
Figura 35. Circuito básico de una celda conectada al circuito de equilibrado: (a) circuito con todos los componentes desglosados, (b) circuito con los componentes agrupados.....	48
Figura 36. Curva característica de la carga de un condensador.....	49
Figura 37. Relación entre el valor de la resistencia $R_{sc}$ , la capacidad del condensador $C_{eq}$ y la suma de las resistencias parásitas .....	51
Figura 38. Modelo de batería utilizado en la simulación.....	52
Figura 39. Montaje realizado en PSIM de la batería y el sistema de equilibrado.....	53
Figura 40. Comportamiento de la batería ante diferentes velocidades de descarga –14 A y 4 A– con sistema de equilibrado –CE– y sin sistema de equilibrado –SE–.....	55
Figura 41. Comportamiento de la batería ante diferentes velocidades de carga –4 A y 1 A– con sistema de equilibrado –CE– y sin sistema de equilibrado –SE–.....	56

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los electrodos positivos más importantes .....	6
Tabla 2. Características de los electrodos negativos más importantes.....	8
Tabla 3. Principales características de los diferentes métodos de ecualizado de celdas (Hoque y otros, 2017).....	28
Tabla 4. Comparación de los resultados obtenidos con diferentes celdas.....	34
Tabla 5. Datos de las tensiones iniciales de cada celda en cada una de las simulaciones .....	40
Tabla 6. Características de los componentes seleccionados. ....	52
Tabla 7. Datos de las tensiones y capacidades de las celdas en las simulaciones de carga y descarga .....	54

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Contexto, motivación y justificación del Trabajo

En las últimas décadas, la situación medioambiental ha ido empeorando de manera exponencial debido al aumento de población, su globalización y el elevado consumismo. Esta realidad se ha traducido en un aumento de la contaminación y de la generación de residuos muy difícil de gestionar sin perjudicar al medio ambiente. Como consecuencia, la Unión Europea se ha propuesto convertirse en una economía inteligente, sostenible e integradora basada en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el aumento de la eficiencia en el uso de recursos. Para conseguirlo, en 2013 se pactó el 7º Programa de Acción Comunitario en materia de Medio Ambiente –VII PMA–, el cual viene motivado por las deficiencias remarcadas por los informes de la Agencia Europea del Medio Ambiente del anterior programa de acción, donde se establece la política de acción medioambiental hasta 2020 y se ofrece una visión de dónde se quiere estar en 2050.

Conforme a estas políticas, el transporte es uno de los sectores donde están habiendo más cambios, como es el caso de la transición al vehículo eléctrico. En pocos años la movilidad eléctrica ha ido ganando importancia paulatinamente hasta tener en la actualidad una presencia notable en el mercado y con vistas de mucho más en pocos años. Este cambio viene motivado por la alta emisión de gases contaminantes y el bajo rendimiento energético de los motores de combustión interna junto a la escasez de existencias de los combustibles fósiles y su elevado precio.

El gran problema de los vehículos eléctricos recae en cómo almacenar la energía eléctrica, de tal forma que los vehículos eléctricos dispongan de, al menos, unas prestaciones similares a la de los de motor de combustión. Las baterías son las encargadas de ello y su principio de funcionamiento es el de almacenar energía química, la cual son capaces de transformar en energía eléctrica para subministrar la energía demandada por el motor.

Las baterías pueden ser la pieza clave para el éxito de la movilidad eléctrica, por ello se está invirtiendo tanto esfuerzo y tiempo, ya no solo en el estudio de diferentes tipos de batería, sino que también en optimizar al máximo las prestaciones de cada batería, siendo aquí donde entra en juego el sistema de gestión de batería o BMS.

El BMS, como indica su nombre, se encarga de la gestión integral de la batería. Se encarga principalmente de monitorizar y controlar todos los parámetros de la batería para conocer el estado de la batería y optimizar tanto la gestión de la energía como de la vida útil de la batería además de proporcionar seguridad, ya que, bajo ciertas condiciones las baterías pueden llegar a inflamarse o incluso explotar.

Las motivaciones principales de hacer este trabajo son por diferentes motivos. Primero, la gran oportunidad que presenta este proyecto para ampliar mis conocimientos sobre la electrónica de potencia y, especialmente, de las baterías eléctricas, por otro lado, más allá de la electrónica, el mundo de la automoción es otro campo que siempre me ha apasionado y por último, poder juntar estas dos motivaciones en una aplicación real como el proyecto en el que está trabajando el equipo de *Futur-e UPV* en el cual soy miembro

activo. Este proyecto consiste en el diseño íntegro de un prototipo de una moto eléctrica de competición para su participación en la competición *MotoStudent* en la categoría *electric*, donde equipos de todas las universidades del mundo compiten con sus prototipos eléctricos para alzarse con la victoria.

En este trabajo se realiza un estudio de los diferentes tipos de baterías y BMS para, posteriormente, poder elegir qué componentes y diseños son los que presentan mejores prestaciones para el diseño de la batería del prototipo. Esta batería va a ser diseñada para que la moto sea capaz de ofrecer las máximas prestaciones a lo largo de todas las pruebas de dicha competición.

## 1.2. Objetivos del Trabajo

Este proyecto tiene como objetivo el diseño y posterior simulación de una batería integral para un prototipo de moto eléctrica de competición. Esta batería tiene que ser capaz de satisfacer todos los parámetros necesarios para poder participar en la competición *MotoStudent electric*, maximizando el rendimiento del prototipo, así como que asegure en todo momento ser fiable y segura.

Para ello, el trabajo se puede dividir en dos subobjetivos: diseño de la batería –selección de celdas y dimensionado de la batería– y el diseño del BMS. La batería diseñada tiene que adaptarse lo máximo posible a los requisitos de la moto y del motor utilizado para poder ofrecer el máximo rendimiento posible, por lo que la selección de las celdas y el posterior dimensionado de la batería debe tener en cuenta estas necesidades. El BMS es un sistema que monitoriza y controla todos los aspectos de la batería y es un dispositivo con muchas funciones y, por lo tanto, muy complejo. El objetivo del diseño del BMS se basa en diseñar el circuito de balanceo que realizará la función del equilibrado de celdas de la batería, ya que es la función más importante de los BMS actuales.

Finalmente, se realizan varias simulaciones del comportamiento de la batería para poder corroborar el correcto funcionamiento de los elementos diseñados a la largo del trabajo. Esta parte ayuda a confirmar si se han conseguido satisfacer los objetivos propuestos. Asimismo, sirve para confirmar si los análisis y la elección de componentes realizados a lo largo del trabajo se han realizado correctamente.

## 1.3. Metodología

La metodología seguida en este trabajo tiene como objetivo poder desarrollar una batería que se adapte completamente a las necesidades de la moto y así optimizar su rendimiento. Para conseguir esto, el procedimiento a seguir se puede dividir en varios apartados.

Para conseguir el primer objetivo, lo más importante es conocer qué tipos de celdas son las mejores y conocer los requerimientos de dicha batería. Para saber cuáles son las celdas más desarrolladas se tiene que hacer un estudio profundo de las distintas baterías disponibles y de sus posibles vías de desarrollo y realizar una comparación entre las

características más importantes de cada tipo. Por la parte de los requisitos de la batería, para poder realizar un dimensionado óptimo y coherente, es necesario estimar la potencia que debe entregar y la energía que tiene que ser capaz de almacenar.

En cuanto al desarrollo del sistema de gestión de baterías, al igual que con las baterías, se tiene que hacer un estudio de los BMS, sus funciones y los diferentes tipos. En este trabajo la diferenciación de los BMS se realiza mediante la función de equilibrado de celdas por ser la única función que se implementa. Como resultado de esto, se estudian los métodos de equilibrado principales para su posterior comparación y el diseño del método que mejor cumpla las necesidades de la batería.

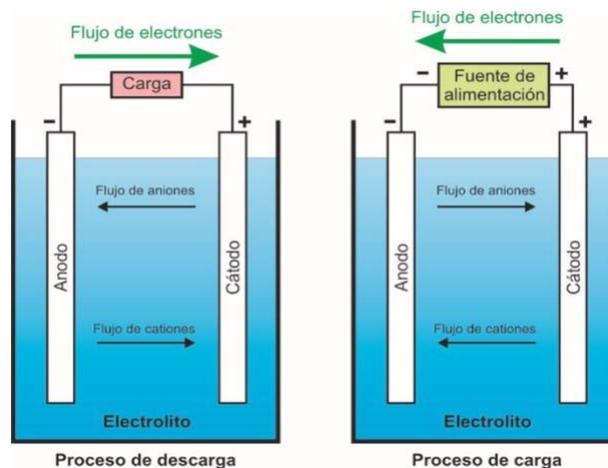
El capítulo de simulaciones está pensado principalmente para simular el comportamiento bajo distintas circunstancias del sistema de equilibrado diseñado implementado en la batería de la moto. Para realizar las distintas simulaciones el software utilizado es PSIM, un programa especializado en la electrónica de potencia muy completo. Esta parte es muy útil para acabar de entender los diferentes comportamientos de cada circuito y para confirmar la elección realizada analíticamente.

Además, a lo largo de todo el trabajo se utilizan elementos que ayuden a aclarar cierta información como imágenes, gráficas, tablas, ecuaciones etc. El uso de estos elementos es muy importante para acabar de entender lo explicado a lo largo del texto de una manera visual e intuitiva.

## **2. STATE OF THE ART DE LAS BATERÍAS**

### **2.1. Introducción a las celdas electroquímicas**

Una celda electroquímica es un sistema de almacenamiento de energía, el cual es capaz de almacenar energía química para su posterior transformación en energía eléctrica –proceso de descarga– o viceversa –proceso de carga–. Estos procesos son llevados a cabo mediante las reacciones de oxidación-reducción. En este tipo de reacciones se encuentran dos sustancias principales las cuales poseen potenciales redox – $E^{\circ}$ – distintos, de manera que espontáneamente se genera un flujo de electrones que parten de la sustancia con menor potencial –electrodo negativo– y los captura la sustancia con mayor potencial –electrodo positivo–. Como consecuencia de este flujo de electrones se produce la oxidación de la parte que pierde electrones y la reducción de la parte que los gana, dando lugar al nombre de dicha reacción. A parte de ello, este tipo de reacciones va asociada con una liberación –descarga– o almacenamiento –carga– de energía química (Albarrán-Zavala, 2008). A parte de estos dos elementos principales, el medio que contiene a los dos electrodos se denomina electrolito, una sustancia normalmente líquida que su característica principal es por una parte, ser conductor de iónico –pero no de electrones–, evitando de esta manera un cortocircuito que se produciría si los electrones circularan por el electrolito y no por el circuito externo, y por otra parte para mantener la electroneutralidad permitiendo que, a la vez que los electrones se desprenden y circulan por el circuito externo, los iones circulan a través de éste (Miao y otros, 2019).



**Figura 1.** Proceso de carga y descarga de una celda electroquímica (Valdivia Miranda, 2018).

## 2.2. Tipos de baterías eléctricas

Dentro del amplio campo de las celdas electroquímicas se diferencian dos grandes ramas, las celdas primarias y las celdas secundarias. Las celdas primarias son aquellas que no pueden ser recargadas, mientras que las secundarias sí que son capaces de recargarse. Este proceso de recarga se consigue al conectarlas a una fuente de alimentación la cual revierte el proceso de descarga, devolviendo los iones y los electrones al electrodo negativo, siendo capaz de realizar un número finito de ciclos.

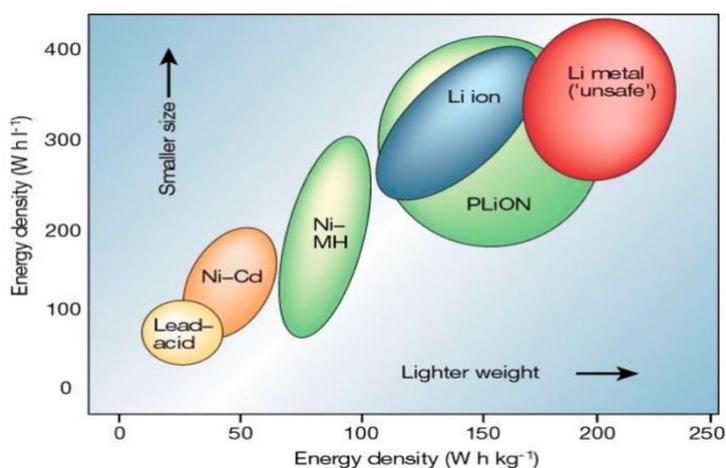
Las baterías son la agrupación de celdas conectadas en serie y/o en paralelo. Existen distintos tipos de baterías, caracterizándose por las sustancias que componen sus electrodos y su electrolito, poseyendo cada tipo características diferentes. A continuación se van a exponer las principales baterías que se pueden encontrar actualmente, destacando las características principales y desventajas de cada una de ellas (Budde-Meiwes y otros, 2013).

En 1859 fueron desarrolladas las baterías de plomo-ácido. Fueron las que se utilizaron en los primeros vehículos eléctricos a finales del siglo XIX (Miao, y otros, 2019). Este tipo de baterías son las más baratas debido al coste de sus materiales. En cambio, poseen una muy baja potencia específica –KW/kg– así como energía específica –KWh/kg– lo que implica un aumento de peso y volumen considerable de la batería en comparación con otro tipo de batería a igualdad de capacidad. Como aspecto a destacar poseen una mayor cuota de reciclaje mucho mayor que las demás baterías.

Años después fue introducida la batería de Níquel-Cadmio, presentando una ligera mejora en términos de densidad de potencia y densidad energética. Sin embargo, esta batería posee varias deficiencias. Por una parte, el llamado efecto memoria, el cual consiste en la degradación prematura de la batería por la realización de cargas o descargas incompletas. Por otra parte, son baterías más caras, medioambientalmente son muy dañinas por culpa del cadmio que contienen y requieren de un sistema que supervise y gestione los parámetros de la batería en términos de seguridad.

Con todas las deficiencias de las baterías de Ni-Cd, las baterías de Níquel-Hidruro metálico nacen como una mejora de las anteriores. Presentan una mejora en la densidad energética de casi el doble que las anteriores, mejoran el aspecto medioambiental al eliminar el cadmio y el efecto memoria se hace menos importante, llegando a ser una de las baterías más utilizadas en el mundo de los vehículos híbridos.

A consecuencia de las deficiencias de las baterías disponibles hasta el momento, a lo largo del siglo XX se continuó investigando para encontrar mejoras que aumentaran la viabilidad del uso de baterías en un abanico más amplio de aplicaciones, llegando a finales de este siglo las baterías de Ion-Litio. Estas baterías se caracterizan por ser los iones de litio los portadores de carga. En términos de eficiencia suponen una mejora sustancial, con valores de eficiencia de Coulomb del 99% –energía aprovechada en la descarga frente a la almacenada en el proceso de carga– y los valores de densidad energética y de potencia aumentan considerablemente respecto de las anteriores. Sin embargo, son muy sensibles a la temperatura de trabajo y al nivel de carga por lo que requieren llevar incorporado un sistema que las gestione y las proteja de situaciones en las que puede tener problemas de seguridad. Esta batería ha supuesto un cambio radical, convirtiéndose en la principal tecnología de almacenamiento de energía en la mayoría de las aplicaciones que requieren un sistema de almacenamiento de energía, como los dispositivos electrónicos y, en especial, los vehículos eléctricos. Existen diferentes tipos de baterías de Ion-litio que se explican a continuación.



**Figura 2.** Comparación de densidad energética ( $\text{Wh l}^{-1}$ ) y energía específica ( $\text{Wh kg}^{-1}$ ) de las diferentes baterías (Tarascon y Armand, 2001).

### 2.3. Diferentes baterías de Ion-Litio

Como ya se ha introducido anteriormente, las baterías de Ion-Litio suponen un salto cualitativo muy significativo. Como se aprecia en la Figura 2, con esta tecnología es posible conseguir baterías de mayor capacidad ocupando menos espacio –mayor densidad energética que el resto– y con un peso mucho más reducido –mayor energía específica que el resto–. Además, éstas también están preparadas para abastecer sistemas de gran

potencia debido a su baja resistencia interna en comparación con las demás baterías. Todo esto supone una mejora considerable sobre todo en aplicaciones móviles donde el espacio es limitado y el peso hay que minimizarlo al máximo.

Las características de este tipo de baterías dependen por completo de los materiales utilizados en los electrodos y electrolito, pudiendo conseguir mayores o menores valores de densidad energética o densidad de potencia, según las características su aplicación. La utilización de distintos materiales también influye en los parámetros de seguridad de la batería, la capacidad de trabajar en un rango mayor de temperaturas o una mayor vida útil, entre otros aspectos. A continuación se muestran los principales electrodos, tanto positivos como negativos, así como los electrolitos que se pueden encontrar en las diferentes baterías hoy en día.

### 2.3.1. Principales electrodos positivos

Los electrodos positivos o cátodos son aquellos que poseen un potencial elevado frente al del Li/Li+. Dicho potencial se calcula haciendo la resta del potencial de la sustancia elegida menos la del litio, la cual es de -3,05V, valor muy característico por ser el elemento con menor potencial redox. Gracias a esta característica del Litio se pueden conseguir unos voltajes de alrededor de 4V por celda, según el material de los electrodos utilizados, lo que, como se demuestra más adelante, implica elevada densidad energética. Los principales electrodos positivos están analizados en la Tabla 1 (Miao,y otros, 2019). Las baterías de Ion-Litio se denominan, en su mayoría, por el electrodo positivo, ya que como se verá más adelante el ánodo y el electrolito utilizados hasta el momento no varía en la mayoría de los casos y si varían la denominación pasaría a ser la del ánodo o electrolito no convencionales.

**Tabla 1.** Características de los electrodos positivos más importantes.

	<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
<b>Óxido de Cobalto-Litio (LCO)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Alta energía específica</li> <li>○ Largo ciclo de vida</li> <li>○ Facilidad de manufacturación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Poca estabilidad térmica</li> <li>○ Muy reactivas</li> <li>○ El cobalto es un material difícil de obtener –caro–</li> </ul>
<b>Óxido de Níquel-Litio (LNO)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Proporciona alto voltaje –aprox. 4V vs Li/Li+–</li> <li>○ Gran capacidad teórica, hasta 250 Ah/kg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Manufactura muy complicada</li> <li>○ Formación de capas pasivadoras –pérdidas–</li> </ul>

Óxido de Manganeso-Litio <b>(LMO)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Resistencia interna muy pequeña</li> <li>○ Grandes corrientes de carga y descarga</li> <li>○ Mejor estabilidad térmica que <math>\text{LiCoO}_2</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Menor capacidad</li> <li>○ Ciclo de vida reducido</li> </ul>
Fosfato de Hierro-Litio <b>(LFP)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Alta potencia específica</li> <li>○ Larga vida útil</li> <li>○ Funcionamiento en un amplio rango de temperaturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Alto ratio de autodescarga en comparación con otros tipos</li> <li>○ Problemas de balanceo</li> </ul>
Óxido de Cobalto-Níquel-Manganeso-Litio <b>(NMC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Mejora de LNO, más estables</li> <li>○ Alta energía y potencia específica</li> <li>○ Las más utilizadas en vehículos eléctricos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Fórmula secreta por cada fabricante</li> </ul>
Óxido de Aluminio-Cobalto-Níquel-Litio <b>(NCA)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Pensado para aplicaciones especiales</li> <li>○ Alta energía y potencia específica</li> <li>○ Largo ciclo de vida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Requerimientos de seguridad mayores que en los otros casos</li> <li>○ Limitación de su viabilidad en diferentes aplicaciones</li> </ul>

### 2.3.2. Principales electrodos negativos

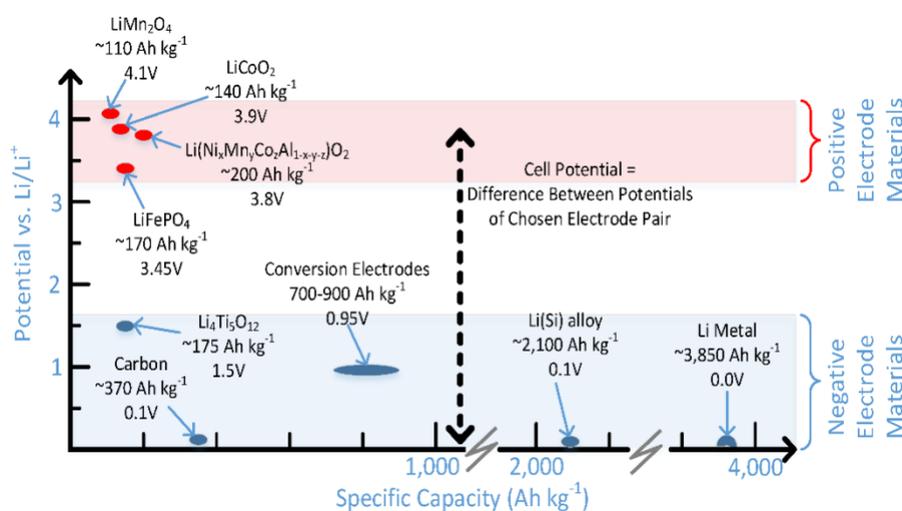
Al contrario que los cátodos, los electrodos negativos o ánodos se caracterizan por poseer un potencial de aproximadamente cero respecto a la referencia del litio. Hasta el momento los ánodos de carbono han sido los más utilizados por su energía específica, bajo potencial y bajo coste entre otros aspectos, pero se han ido desarrollando otros tipos que suponen mejoras considerables como se puede apreciar en la Tabla 2.

A parte de los incluidos en dicha tabla, actualmente se encuentran en desarrollo otros, como son los basados en aleaciones o en silicio entre otros. El ánodo de metal de litio, aunque también se encuentra en desarrollo y en plena fase de estudio para conocer y poder controlar su comportamiento, ha sido integrado en la tabla por la importancia que está tomando debido a su elevada capacidad específica. Esto es así hasta el punto de implementar nuevas tecnologías y materiales para poder utilizar este ánodo de forma segura y conseguir un salto de calidad en las baterías (Ulvestad, 2018).

**Tabla 2.** Características de los electrodos negativos más importantes.

	Ventajas	Inconvenientes
Carbono	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Barato</li> <li>○ Buen rendimiento</li> <li>○ Bajo potencial vs Li/Li+</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Limitada capacidad específica</li> <li>○ Reacciona con oxígeno pudiendo incendiarse</li> </ul>
Óxido de Titanio-Litio (LTO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Muy largo ciclo de vida</li> <li>○ Más seguro que el carbono</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Potencial muy alto</li> <li>○ Bajo rendimiento a niveles altos de potencia</li> <li>○ Baja capacidad</li> </ul>
Metal de Litio	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Gran mejora en términos de capacidad <math>\sim 10</math> veces que el carbono</li> <li>○ Menor potencial <math>\sim 0V</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Crecimiento de dendritas que provocan un cortocircuito</li> <li>○ Riesgos de explosión</li> </ul>

La siguiente figura resume los diferentes tipos de electrodos, tanto los positivos como los negativos, y los ordena según su potencial en referencia al litio –eje vertical–, así como la capacidad específica –eje horizontal–, para ayudar a ordenar y a clasificar cada electrodo anteriormente expuesto. Para obtener una batería con una alta energía específica, los cátodos deben tener tanto potencial vs Li/Li+ como sea posible a la vez de poseer la mayor capacidad específica posible. En cuanto a los ánodos, al igual que los cátodos deben maximizar la capacidad específica, pero tienen que poseer el menor potencial vs Li/Li+ posible, como se demuestra más adelante.



**Figura 3.** Resumen de actuales y futuras composiciones químicas de los electrodos de las baterías de Ion-Litio (Miao y otros, 2019).

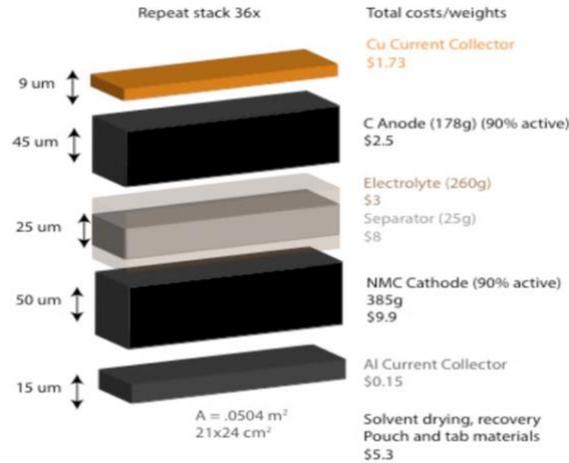
### 2.3.3. Principales electrolitos

El electrolito es el medio en el cual están sumergidos los electrodos y su principal característica es la de ser conductor iónico, favoreciendo el movimiento de los iones de litio de un electrodo al otro e impedir el paso de los electrones a través suyo. Los electrolitos hasta el momento son mayoritariamente líquidos, pero desde hace unos años, y con el objetivo de poder implantar el ánodo de metal de litio, se han empezado a desarrollar electrolitos en estado sólido, lo que supondrá un gran cambio y sobre todo una gran mejora en las baterías de Ion-Litio.

#### 2.3.3.1. Electrolitos en estado líquido

Los electrolitos en estado líquido son los más usados hasta el momento y se dividen en dos grupos: los electrolitos acuosos y los electrolitos de líquido orgánico. Los primeros son muy seguros y tienen un impacto medioambiental bastante reducido, en cambio están muy limitados por su estrecha ventana de potencial electroquímico. Esta ventana se define como la diferencia de potencial que aparece en el electrolito cuando ocurren las reacciones entre el electrolito y los electrodos y que el electrolito es capaz de soportar sin degradarse (Maeshima y otros, 2010). Los electrolitos de líquido orgánico eliminan la limitación de los anteriores utilizando un solvente orgánico con sales de litio. Con una mezcla adecuada de estas sustancias se puede llegar a conseguir una buena estabilidad electroquímica con alta conductividad iónica, características requeridas para una batería de altas prestaciones. Sin embargo, estos electrolitos pueden tener problemas de inflamabilidad y volatilidad debido a que contienen sustancias orgánicas (Miao y otros, 2019).

Actualmente, con este tipo de baterías se están llegando a conseguir valores de energía específicas de 270 Wh/kg con celdas NMC. Con esta tecnología se espera llegar en un futuro a valores cercanos a los 400 Wh/kg, pudiéndose conseguir reduciendo el porcentaje de materiales inactivos y aumentando el de los componentes activos. Además, si se lograra introducir el ánodo de metal de litio, estos valores podrían aumentar aún más, pudiendo llegar a los 475 Wh/kg (Ulvestad, 2018). En la Figura 4 se desglosa un ejemplo de la composición de una batería NMC actual, incluyendo el tamaño de cada elemento utilizado –electrodos, electrolito, separador y colectores– así como su precio y su peso. A parte de estos datos, también se incluyen los porcentajes de material activo utilizado en la composición de los electrodos. Cuanto mayor sea el porcentaje de material activo utilizado en los electrodos mejores características tendrá la batería, especialmente en cuanto a capacidad de almacenar energía. Más adelante se demuestra su directa relación con la energía específica de la celda y la necesidad de reducir al máximo las partes inactivas de los componentes para mejorar las características de las baterías.



**Figura 4.** Tamaño, peso y precio de una batería de Ion-Litio con electrolito líquido de 52Ah (Ulvestad, 2018).

Cabe remarcar que, aunque la capacidad específica del ánodo de metal de litio sea 10 veces mayor que la del de carbono, la energía específica de la celda no va a aumentar de tal manera debido a la capacidad del electrodo positivo y la masa de elementos inactivos. Para facilitar la comprensión de lo comentado, a continuación se demuestra matemáticamente.

$$Q(\text{mAh/g}) = \frac{mcQ_c + maQ_a}{mc + ma} \quad (1)$$

$$ma = \frac{mcQ_c}{Q_a} \quad (2)$$

$$Q(\text{mAh/g}) = \frac{1}{\frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_a}} \quad (3)$$

Donde el subíndice “a” se refiere al ánodo y el subíndice “c” al cátodo. La ecuación de la capacidad tiene la forma de una suma de resistencias en paralelo, donde el valor más pequeño es el que más impacto tiene en el resultado final, por lo que al aumentar el valor de  $Q_a$  en 10 veces –sustitución del ánodo de carbono por el de metal de litio– el resultado sería:

$$Q_{\text{carbono}} = \frac{1}{\frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_a}} = \frac{Q_c Q_a}{Q_c + Q_a}$$

$$Q_{\text{Lim}} = \frac{1}{\frac{1}{Q_c} + \frac{1}{10Q_a}} = \frac{10Q_c Q_a}{Q_c + 10Q_a}$$

$$Q_{\text{Lim}}/Q_{\text{carbono}} = 1 + \frac{9Q_c}{10Q_a + Q_c} \quad (4)$$

Finalmente, la capacidad de los cátodos es menor que la de los ánodos, rondando valores de 200 Ah/kg, como se puede ver en la Figura 3. Sabiendo que el ánodo de carbono es de 370 Ah/kg, se puede simplificar la expresión considerando  $Q_a=2Q_c$ , quedando finalmente:

$$Q_{lim}/Q_{carbono} = 1 + \frac{9Q_c}{20Q_c + Q_c} = 1 + \frac{9}{21} = 1,429$$

Por último, para calcular la energía específica hay que sumar en la ecuación 3 el valor de la masa de los materiales inactivos  $-m_{inact}-$  y multiplicarla por el valor del voltaje  $-U-$ , por lo que aún se ve aún más reducido este aumento en la energía específica por la utilización del metal de litio como electrodo negativo como se desarrolla a continuación:

$$E \text{ (Wh/kg)} = \frac{U}{\frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_a} + m_{inact}} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} E_{carbono} &= \frac{U}{\frac{1}{Q_c} + \frac{1}{2Q_c} + m_{inact}} \\ E_{Lim} &= \frac{U}{\frac{1}{Q_c} + \frac{1}{20Q_c} + m_{inact}} \end{aligned} \right\} E_{Lim}/E_{carbono} = 1 + \frac{9}{21 + 20Q_c * m_{inact}} \quad (6)$$

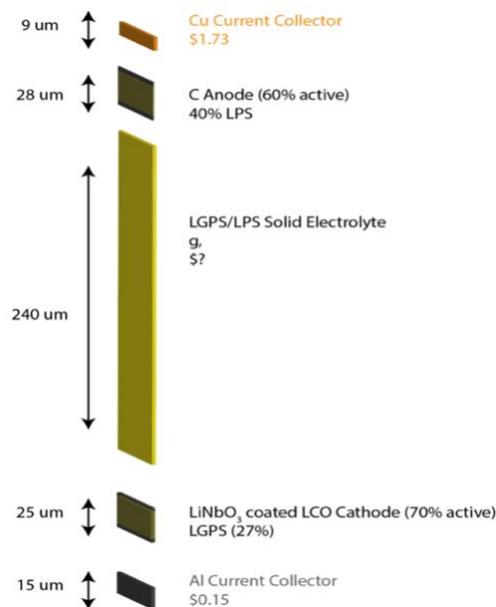
Como se puede apreciar, en la Ecuación 6 se calcula la razón entre la energía específica de una celda con ánodo de carbono y otra con ánodo de metal de litio. El resultado de dicha ecuación depende de la cantidad de masa de los componentes inactivos de dichas celdas  $-suponiendo que ambas poseen la misma-$ , pudiendo acercarse al valor anterior de 1,429, siendo este valor el máximo posible, indicando que la máxima mejora en la energía específica de la celda con ánodo de litio metálico frente al ánodo convencional sería del 42,9 %, valores muy alejados de la realidad por la relativamente elevada cantidad de elementos inactivos.

### 2.3.3.2. Electrolitos en estado sólido

Los electrolitos líquidos poseen ciertas limitaciones, por una parte con aspecto de seguridad, ya que al ser líquidos orgánicos pueden inflamarse con cierta facilidad y por otra parte, por la imposibilidad de albergar el ánodo de metal de litio. Esto es debido a que a lo largo de varios ciclos de carga y descarga dicho ánodo empieza a desarrollar dendritas, las cuales van creciendo poco a poco a través del electrolito, llegando a producir un cortocircuito en la batería. Debido a las deficiencias que presentan estos electrolitos se están investigando alternativas a éstos que solucionen las limitaciones de los anteriores. Los electrolitos de estado sólido, aunque todavía se encuentran en pleno desarrollo, parecen ser la solución a medio plazo.

En este tipo de electrolitos el movimiento de los iones se produce de una manera muy distinta. El único método de transporte de iones es a través de la estructura cristalina del material utilizado. En dicha estructura cristalina debe haber vacantes a lo largo de dicha estructura, de tal manera que los iones vayan pasando de vacante en vacante hasta llegar al electrodo opuesto. Para conseguir una buena conductividad se requiere de un camino con suficientes vacantes a lo largo de él para facilitar su movimiento y una estructura iónica estable que presente una fuerza de interacción débil con los iones móviles (Gao y otros, 2018).

Existen 3 familias de electrolitos sólidos: la de los sulfuros, la de los polímeros y la de los óxidos. Los sulfuros son los que presentan un mayor potencial debido a su mayor conductividad. Los materiales utilizados son derivados de los LISICON –*Lithium Super Ionic Conductors*–. En este caso los oxígenos que llevan los LISICON son sustituidos por azufre, consiguiendo una mayor conductividad que supera a aquella que tienen los electrolitos líquidos. Además, estos materiales pueden conseguir densidades muy bajas. Esto repercute positivamente en la energía específica de la batería, siendo un requisito para poder presentar una clara mejora. En cambio la estabilidad del material y el mal contacto entre las caras de los electrodos todavía supone mucho camino por mejorar. La familia de los óxidos posee una conductividad bastante baja, es muy denso y presenta un procesado complejo, por lo que es el que menor potencial parece tener (Ulvestad, 2018). Por último, los electrolitos de polímero se caracterizan por poseer buenas propiedades en cuanto a contacto entre caras, evitando pérdidas internas, y presentan una mejora de seguridad en las baterías respecto de aquellas con electrolito líquido orgánico. Sin embargo, poseen una mala conductividad a temperatura ambiente. Para mejorar los problemas de conductividad se están incorporando una serie de aditivos llegando a conseguir baterías de alta potencia de descarga.



**Figura 5.** Esquema de la composición de una batería de Ion-Litio con electrolito sólido de azufre (Ulvestad, 2018).

Actualmente este tipo de baterías aún no están tan desarrolladas como para sustituir a aquellas con electrolito líquido, especialmente las que poseen electrolitos de la familia de los sulfuros o de los óxidos. Sin embargo, actualmente se pueden encontrar baterías de polímero de litio que presentan buenas características, destacando su alta potencia. En la Figura 5 se ve la composición de una batería de Ion-Litio de electrolito sólido basado en azufre. En este caso destaca el grosor del electrolito –240 micras– y la reducción de la parte activa de los materiales, lo cual al ser comparado con el esquema planteado de la Figura 4 confirma que de momento aún no plantea ninguna mejora.

Los desafíos más grandes están relacionados con solucionar el problema que hay en cuanto al contacto entre los electrodos y el electrolito, ya que un mal contacto entre las caras genera una alta resistencia, que se traduce en pérdidas; el entendimiento del mecanismo de transporte de iones a través de la estructura cristalina; el aumento del porcentaje de la parte activa de los materiales y los problemas de la seguridad y fiabilidad.

Como breve conclusión de este capítulo, las baterías de Ion-Litio son el presente de la movilidad eléctrica, presentando valores que cada vez se van aproximando más a los de los vehículos convencionales y haciendo posible que la movilidad eléctrica sea una alternativa viable, en estos momentos, al motor de combustión interna. Por otra parte, hay varias líneas de desarrollo centradas especialmente en la introducción del ánodo de metal de litio así como la utilización de electrolitos sólidos que representan el futuro. Un futuro muy prometedor para la movilidad eléctrica, pero que como indican los diferentes artículos, esta tecnología aún no está lo suficientemente desarrollada como para competir con las baterías de Ion-Litio convencionales. Vista la importancia de las baterías de Ion-Litio y su necesidad de incorporar un BMS, en el siguiente capítulo se revisa el estado de los BMS, sus diferentes funciones y sus distintos métodos de equilibrado.

## 3. STATE OF THE ART DE LOS BMS

### 3.1. Introducción a los sistemas de gestión de batería

Como se ha introducido en el capítulo anterior, las baterías son muy susceptibles a las condiciones de funcionamiento y especialmente las de Ion-Litio. Las celdas están diseñadas para un rango concreto de funcionamiento en cuanto a temperatura, tensión y corriente dentro del cual funcionan correctamente y sin ningún tipo de peligro. Sin embargo, cuando cualquiera de estos parámetros sale del rango puede haber desde problemas leves de rendimiento, como disminución de la capacidad de la batería o sobrecalentamiento de esta reduciendo su vida útil, hasta problemas graves en los que puede inflamarse e incluso explotar siendo potencialmente peligrosa para cualquier persona que la manipule o que esté cerca de ella. Por todo ello se necesita un dispositivo capaz monitorizar y realizar un control continuo y preciso de estos valores en cada momento, verificando que la batería se encuentra en un rango de trabajo seguro y en caso de que no sea así, disponer de los medios necesarios para corregir los valores y volver a un estado seguro antes de que sea demasiado tarde. Este dispositivo es el sistema de gestión de batería o BMS –*Battery Management System*– y puede ser más o menos complejo según su aplicación. En el caso de un BMS para una batería de un vehículo eléctrico, otra de sus características más importantes es la de tener la batería preparada en todo momento para abastecer la demanda energética del motor, de modo que pueda aumentar el tiempo de uso sin recargar la batería y en el caso de un vehículo de competición, optimizar la demanda energética pudiendo completar toda la carrera siendo capaz de entregar la energía al motor en todo momento. A modo de resumen, los objetivos más importantes de un BMS son:

- Proteger las celdas de la batería de sufrir daños.
- Prolongar la vida útil de la batería.
- Mantener la batería preparada para satisfacer la demanda del motor.

### 3.2. Funciones principales de un BMS

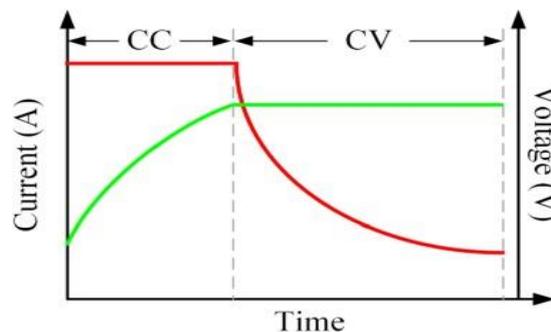
Para poder conseguir dichos objetivos, el BMS debe ser capaz de desempeñar un conjunto de funciones que, funcionando conjuntamente y de una manera sincronizada, puedan gestionar por completo la batería. Las funciones principales que debe desempeñar son las siguientes:

**Monitorización de las celdas:** Las baterías de un vehículo eléctrico está formada por cientos de celdas agrupadas en serie y en paralelo, siendo cada una de ellas diferente de las demás por diferencias en su manufacturación, por el estrés térmico a la que estén sometidas según en qué parte de la batería se encuentren o por la cantidad de ciclos que han hecho, entre otros. Además, las celdas de Ion-Litio son muy sensibles a trabajar fuera de su rango de funcionamiento –temperatura, tensión e intensidad–, pudiendo ser muy peligrosas al encontrarse fuera de éste. Por todo ello se requiere una monitorización en

todo momento de todos los parámetros de la batería para saber si está funcionando correctamente o hay que activar algún mecanismo para corregir estos valores y evitar una situación potencialmente peligrosa.

**Control de la carga y la descarga:** Los procesos de carga y descarga son críticos, de tal manera que se puede optimizar el rendimiento, maximizar la capacidad de la batería y prolongar la vida de las baterías o, por lo contrario, someterlas a estrés y conseguir lo opuesto. La causa de esto viene por el carácter altamente exotérmico de las reacciones químicas que se producen en el interior de las celdas. Al someter a una batería a un proceso de carga/descarga demasiado rápido se aceleran las reacciones químicas, las cuales van a generar más calor y, por lo tanto, va a aumentar la temperatura de ésta, pudiendo producirse un escape térmico en el que aparece un proceso de realimentación positiva donde el aumento de las reacciones aumenta la temperatura y ese crecimiento de las temperaturas favorece las reacciones químicas. Para evitar que suceda, los fabricantes indican en la hoja de especificaciones de cada celda los valores máximos de tensión y corriente a los que puede trabajar en los procesos de carga y de descarga sin producirse una situación de peligro.

El proceso de carga se realiza introduciendo energía de una fuente de alimentación externa, normalmente de la red y debe hacerse en unas condiciones específicas de tensión y corriente, por lo que se tiene que incluir una fase de corrección de la tensión y corriente para adaptarlos a los que necesita la batería. El método de carga más habitual es el CC-CV que consiste en aplicar una corriente constante mientras la tensión de la batería va aumentando hasta que llega a su tensión máxima. En este momento, pasa de corriente constante a tensión constante, reduciendo la corriente lentamente hasta que carga completamente como se puede apreciar en la Figura 6.



**Figura 6.** Proceso de carga CC-CV de una batería  
(Lin y otros, 2019)

El proceso de descarga consiste en la extracción de la energía almacenada, consiguiendo abastecer la demanda energética. Al igual que en la carga, es muy importante controlar el proceso, de modo que no se sobrepasen los valores especificados por el fabricante y que se gestione la entrega de energía de manera óptima. De esta forma, se puede maximizar el rendimiento de la batería reduciendo las pérdidas energéticas y ampliando la cantidad de energía capaz de proporcionar sin comprometer la salud de la batería.

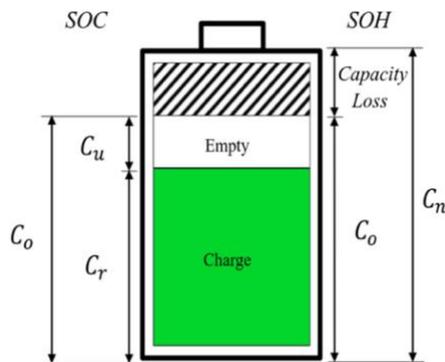
**Determinación de estados:** Los estados de la batería son el SoC –*State of Charge*–, el SoH –*State of Health*– y el SoF –*State of Function*–. Proporcionan información muy importante del estado de la batería y se puede utilizar para saber la vida útil que le queda a la batería, evaluar las prestaciones de las que dispone después de la utilización de la batería a lo largo del tiempo, determinar la diferencia de carga entre celdas y estimar si la batería va a ser capaz de responder a las demandas energéticas previstas.

El SoC determina el estado de carga de la batería en cada momento y se calcula como la energía actual de la batería respecto de la energía después de ser cargada completamente. Su objetivo es ofrecer información en cada momento de la carga que queda en la batería y en cada celda. De esta manera se puede determinar el estado de equilibrado de las celdas y así poder activar el circuito de equilibrado cuando sea necesario. Es muy importante remarcar que las baterías no están preparadas para trabajar desde el 100% al 0% del SoC. Normalmente en el proceso de descarga las celdas no pueden caer por debajo del 20/30%, denominándose descarga profunda si sobrepasan dichos valores. En el proceso de carga hay que tener cuidado de no sobrecargarlas, ya que son muy susceptibles. Si se cargan por encima del límite superior pueden llegar a explotar o, por el contrario, si se descargan por debajo del inferior, las baterías van a verse dañadas produciéndose su degradación, reduciendo su vida útil. La estimación del estado de carga se puede clasificar en dos grupos: estimación directa y estimación indirecta. Los métodos directos requieren determinar propiedades físicas de las celdas, requiriendo aparatos de medición muy precisos y siendo imposible muchas veces acceder al interior de las celdas para poder realizar la medición, por ello se han tenido que desarrollar los métodos indirectos. Estos métodos se basan en la medición de valores de tensión, corriente y temperatura de las celdas. Aunque estas variables sean sencillas de obtener, la estimación del SoC de esta manera es más complicada ya que no guarda una relación lineal con dichos parámetros (Rezvanizani y otros, 2014).

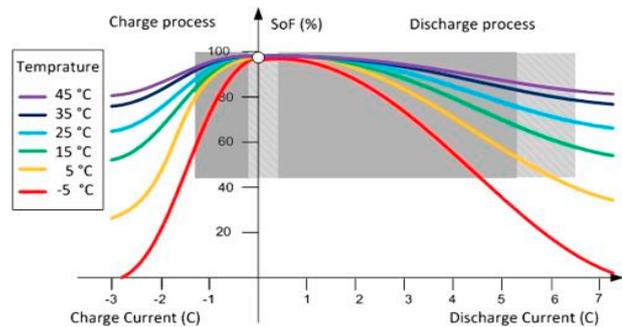
El SoH se utiliza para determinar el deterioro que ha sufrido la batería respecto de su estado inicial debido a la degradación causada por las reacciones químicas irreversibles que se producen constantemente en cada celda. A consecuencia de ello, la capacidad de la celda y su vida útil se ven reducidas poco a poco.

Al contrario que en el SoC, no hay ninguna manera fija de determinarlo, sino que cada fabricante determina cómo medirlo en sus celdas. Sin embargo, sí es posible realizar estimaciones, aunque no demasiado precisas, en función de la capacidad y la resistencia interna de las celdas. El estado de salud representa la pérdida de rendimiento que ha sufrido la batería debido a su uso a lo largo del tiempo. Las pérdidas de rendimiento se pueden traducir en pérdida repentina de energía o el aumento de la temperatura durante la operación de carga o descarga. La Figura 7 plasma lo explicado hasta el momento sobre el SoC y SoH. En cambio, hay veces que no es posible predecir el rendimiento de la batería ya que aún teniendo valores de SoC y SoH próximos al 100%, esto no implica siempre que toda la energía almacenada pueda ser utilizada. Aquí aparece el SoF o estado de funcionamiento de la batería.

El SoF se define como la cantidad de energía que puede ser utilizada por la batería con respecto a la energía total que hay almacenada en la batería. Lo bueno de este parámetro es que es específico de cada aplicación, dependiendo sobre todo de las condiciones de carga/descarga y de la temperatura, como se aprecia en la Figura 8 (Rezvanizani y otros, 2014).



**Figura 7.** Diferencia entre SoC y SoH (Achsán, 2020).



**Figura 8.** Valores del SoF con respecto al ratio de carga/descarga y a la temperatura (Rezvanizani y otros, 2014).

**Protección de la batería:** Debido a la diferencia entre celdas es fácil que se produzcan situaciones en que las diferentes celdas de una batería tengan estados de carga distintos unas de otras. Esta situación si no se controla e intenta evitarse puede llegar a acabar en una situación peligrosa, ya que mientras hay celdas que están llegando a valores del SoC por debajo de los límites inferiores hay otras que todavía tienen bastante energía o al contrario. El BMS debe controlar el estado de todas las celdas desconectando la batería cuando alguna celda deja de trabajar en el rango seguro.

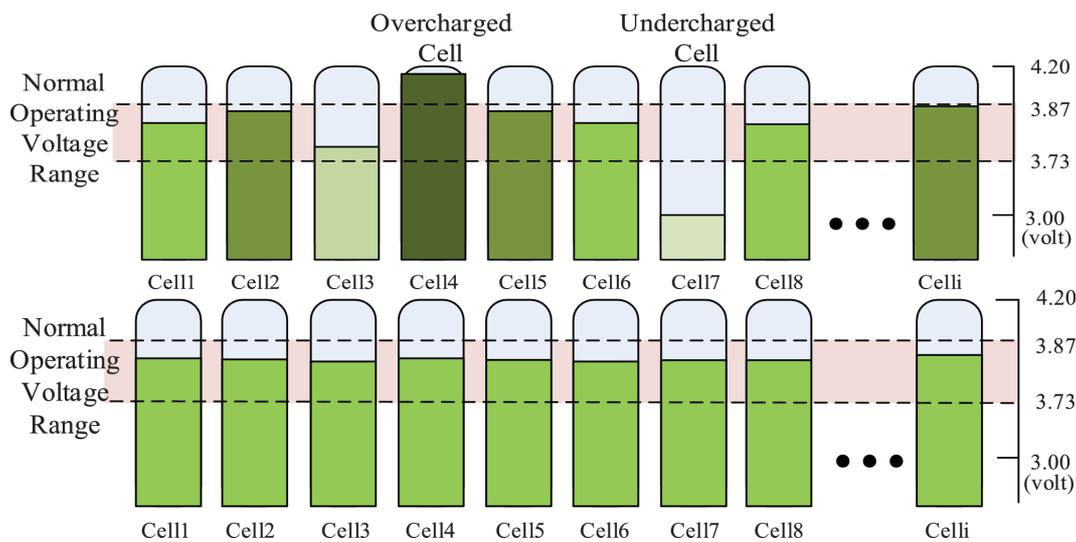
**Equilibrado de celdas:** Debido a las diferencias entre celdas ya comentadas anteriormente, las celdas durante el proceso de carga o descarga tienden a cargarse y descargarse a distinto ritmo unas de las otras. Estas diferencias que se producen son muy nocivas para la batería y suponen una pérdida de rendimiento. Aprovechando la función de monitorización de las celdas, el circuito de equilibrado detecta la diferencia de carga entre las celdas y actúa para poder mitigar dicha diferencia, consiguiendo una batería equilibrada.

Dentro del balance de celdas se encuentran dos principios de funcionamiento diferentes:

- Métodos pasivos: se basan en disipar energía de las celdas con mayor estado de carga para igualarlas a las que menor estado de carga poseen. Estos métodos son más sencillos y baratos pero suponen una pérdida energética y un aumento de la temperatura.

- Métodos activos: se basan en la transferencia de energía de las celdas con un estado de carga mayor a aquellas con un menor estado de carga. Son más complejos pero suponen una mejora en el aprovechamiento de la energía de las celdas.

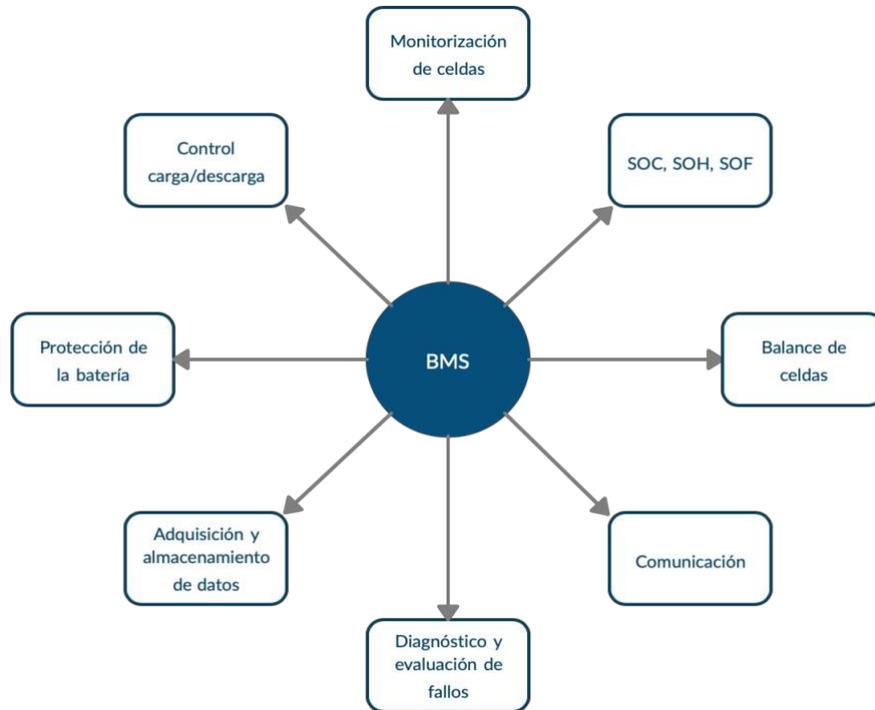
En la Figura 9 se ve la diferencia entre una batería con celdas desequilibradas y otra con las celdas equilibradas. Mientras en la batería desequilibrada hay celdas con riesgo de explotar por sobrecarga y otras con riesgo de sufrir una descarga profunda y dañar la batería, en la batería equilibrada todas están funcionando en el rango deseado, aumentando las prestaciones, la vida útil y la seguridad de la batería.



**Figura 9.** Celdas desequilibradas vs celdas equilibradas (Hannan y otros, 2018).

**Diagnóstico y evaluación de fallos:** Las baterías pueden sufrir varios tipos de problemas como son: sobrecarga de celdas, sobrecalentamiento, desequilibrio de celdas, etcétera. Por otra parte, el BMS también es susceptible de otros problemas como son, entre otros, errores en la adquisición de datos o problemas de aislamiento. Por todo ello, el BMS debe ser capaz de detectar dichos fallos y dar una respuesta rápida para mantener la seguridad de la batería como principal objetivo (Hannan y otros, 2018).

Además de estas funciones, el BMS debe ser capaz de comunicarse con los otros subsistemas del vehículo y también adquirir datos mediante sensores y su posterior procesado y almacenamiento. En la Figura 10 se ve el esquema de las funciones principales de un BMS, donde todas las funciones son complementarias y conforman un sistema capaz de proteger y gestionar una batería íntegramente.



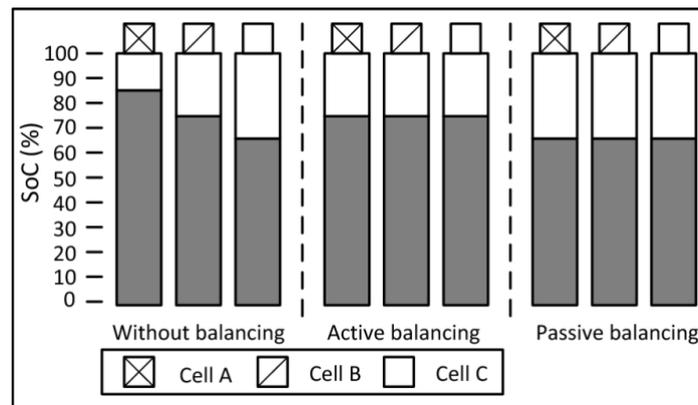
**Figura 10.** Esquema de las funciones principales de un BMS.

Como se ha podido apreciar el BMS es una parte vital de las baterías para su funcionamiento óptimo. Tanto es así que a las baterías con sistemas BMS sofisticados se les denomina baterías inteligentes, ya que son capaces de autogestionarse y saben qué hacer en cada situación, de manera que el aprovechamiento de la energía disponible en una batería ha ido aumentando significativamente en cuestión de pocos años. Actualmente, la función que más importante y diferenciadora respecto a las demás es la referente al balanceo de celdas, por lo que se explica con más detalle en el siguiente apartado, incluyendo los diferentes métodos de equilibrado y sus características para determinar cuál es el que mejor se adapta a los requisitos de la batería de la moto y así realizar el diseño de dicho circuito.

### 3.3. Tipos de equilibrado de celdas

El equilibrado de celdas es la función del BMS que más importancia tiene para este proyecto, ya que gracias a esta función se consigue mejorar el rendimiento de la batería, de tal forma que en el proceso de carga todas las celdas se carguen de manera segura hasta su valor de carga máxima y en la descarga entreguen la máxima energía posible. A parte de evitar situaciones peligrosas, supone un salto cualitativo en el aprovechamiento de la energía. Este aprovechamiento es vital para el proyecto para el cual va dirigido, donde es necesario extraer el máximo rendimiento y eficiencia energética de la batería. Utilizar un método apropiado de ecuilización supone garantizar el aprovechamiento de la máxima cantidad de energía posible de una batería, evitando el sobredimensionado de la misma y, por lo tanto, reduciendo el peso y el espacio requerido.

Dentro del equilibrado de celdas hay dos grandes ramas citadas anteriormente que se diferencian en el principio de funcionamiento. Mientras los métodos pasivos se basan en igualar los estados de carga de las celdas mediante la disipación de energía de aquellas con más carga, los métodos activos se basan en la transferencia de energía entre las más cargadas y las menos cargadas. La Figura 11 representa la diferencia que supone el uso de métodos pasivos o activos en el estado de carga de unas celdas antes y después de ser ecualizadas. Es muy remarcable la diferencia de energía que hay después del equilibrado entre los dos métodos.

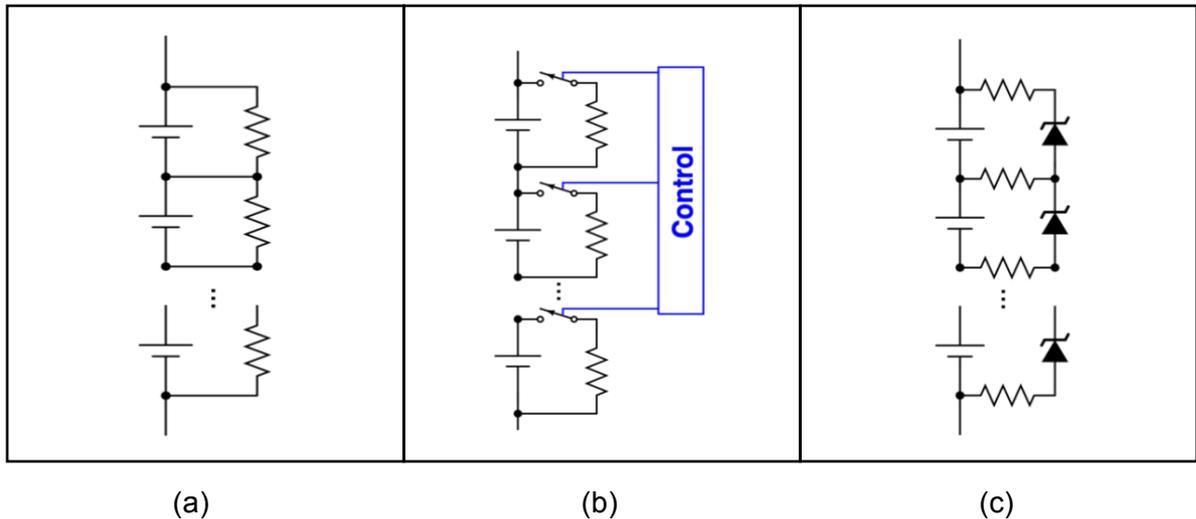


**Figura 11.** Comparación entre balanceo activo y pasivo (Ahmad y otros, 2019).

### 3.3.1. Métodos de equilibrado pasivo

Estos métodos se caracterizan por ser relativamente sencillos y baratos, por ello han sido bastante utilizados hasta el momento, sobre todo en sistemas de baja potencia. Esto es debido a que en el proceso de disipar la energía sobrante se genera calor y se pueden producir altas corrientes, por lo que en sistemas de alta potencia, a parte de que la pérdida energética sería mucho mayor, el calor y las corrientes generadas serían muy difícil de gestionar (Ahmad y otros 2019).

Dentro de los métodos pasivos, los más representativos son los que utilizan resistencias como elemento de disipación de energía. Estos son muy simples y fiables aunque muy poco eficientes. Hay dos métodos principales: ecualizado con resistencia fija y ecualizado con resistencia conmutada. El primero es el esquema más simple, ya que no requiere ningún control y se implementa con una simple resistencia por celda. El principal problema de este esquema es que continuamente se está derivando energía a las resistencias, aún estando las celdas equilibradas. El método de resistencias conmutadas es el más complejo ya que necesita implementar el control de los interruptores, requiriendo la monitorización de la tensión de las celdas para saber cuándo y cuál interruptor conectar. Sin embargo, es el método más eficiente dentro del balanceo pasivo. (Cadaru y otros, 2010).



**Figura 12.** Esquemas de equilibrado pasivo: (a) resistencia fija, (b) resistencia conmutada, (c) diodo Zener (Plett y otros, 2013).

A parte de los circuitos a base de resistencias también existen otros tipos como es el caso de los diodos Zener. En este caso se usa un diodo Zener en paralelo a cada celda de manera que sin necesidad de interruptores este diodo es capaz de bloquear el paso de corriente hasta que se alcanza cierta tensión –tensión Zener–. Sin embargo, la cantidad de corriente que tienen que soportar los diodos supone una desventaja, ya que supone sobredimensionarlos siendo así más caros (Linzen y otros, 2005). Además, aunque el control es muy simple y es más eficiente que el método de resistencias fijas no es un sistema apto en baterías con alta sensibilidad a la sobrecarga debido a la variabilidad de la tensión Zener según la temperatura, lo que implica un control no demasiado preciso.

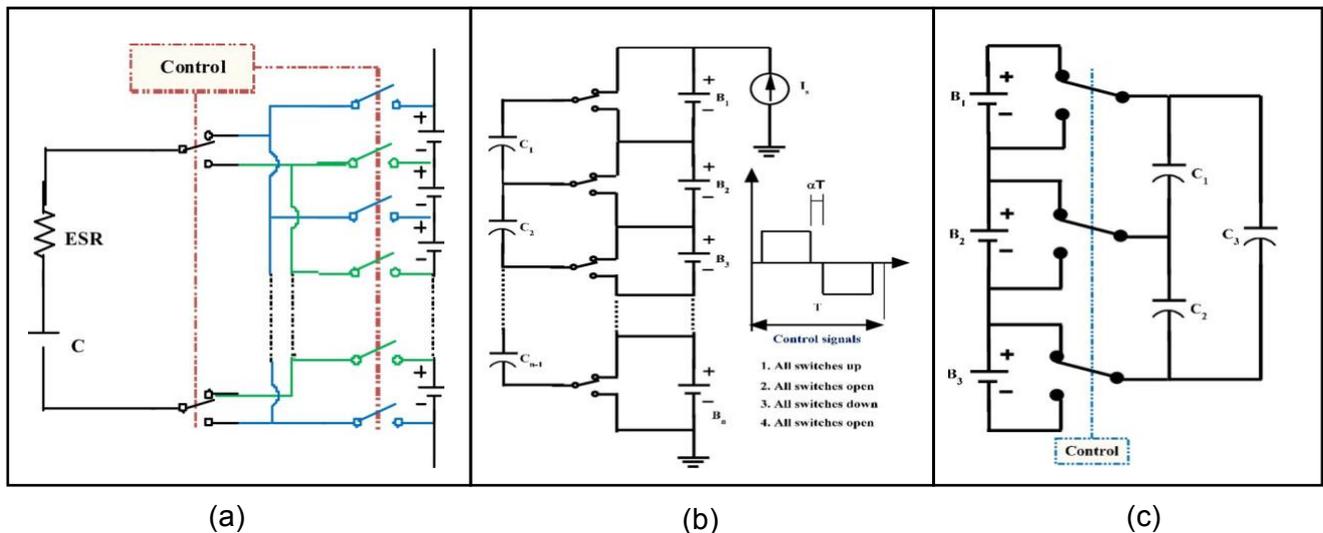
Como conclusión, los métodos pasivos son métodos sencillos y baratos para realizar el equilibrado de celdas, sin embargo no son aptos para aplicaciones de media/alta potencia y no son capaces de prolongar el tiempo de uso de la batería, ya que el excedente de energía es disipado. Es un buen método de protección de la batería pero en este caso se busca algo más que eso. El objetivo del balance en este caso más allá de proteger la batería es el de maximizar la energía útil de la batería, por todo ello los métodos pasivos quedan descartados.

### 3.3.2. Métodos de equilibrado activo

Los métodos activos surgen para solucionar el principal problema de los anteriores, la pérdida de energía. Su principio de funcionamiento es traspasar energía de aquellas celdas con mayor carga a aquellas con menor carga. A diferencia de los métodos pasivos, los elementos principales dejan de ser resistencias y pasan a ser condensadores, bobinas y transformadores. La solución para la batería va a ser uno de estos métodos por lo que se van a ver las características principales de cada tipo.

### 3.3.2.1. Equilibrado con condensadores

El principio de funcionamiento del equilibrado con condensadores es el de utilizar las diferencias de tensión entre las celdas para cargarlos y descargarlos y así realizar el equilibrio de voltaje entre ellas. Es de los métodos más sencillos y baratos. Hay tres esquemas predominantes: condensador conmutado, condensadores conmutados y doble nivel de condensadores conmutados, como se puede ver en la Figura 13.

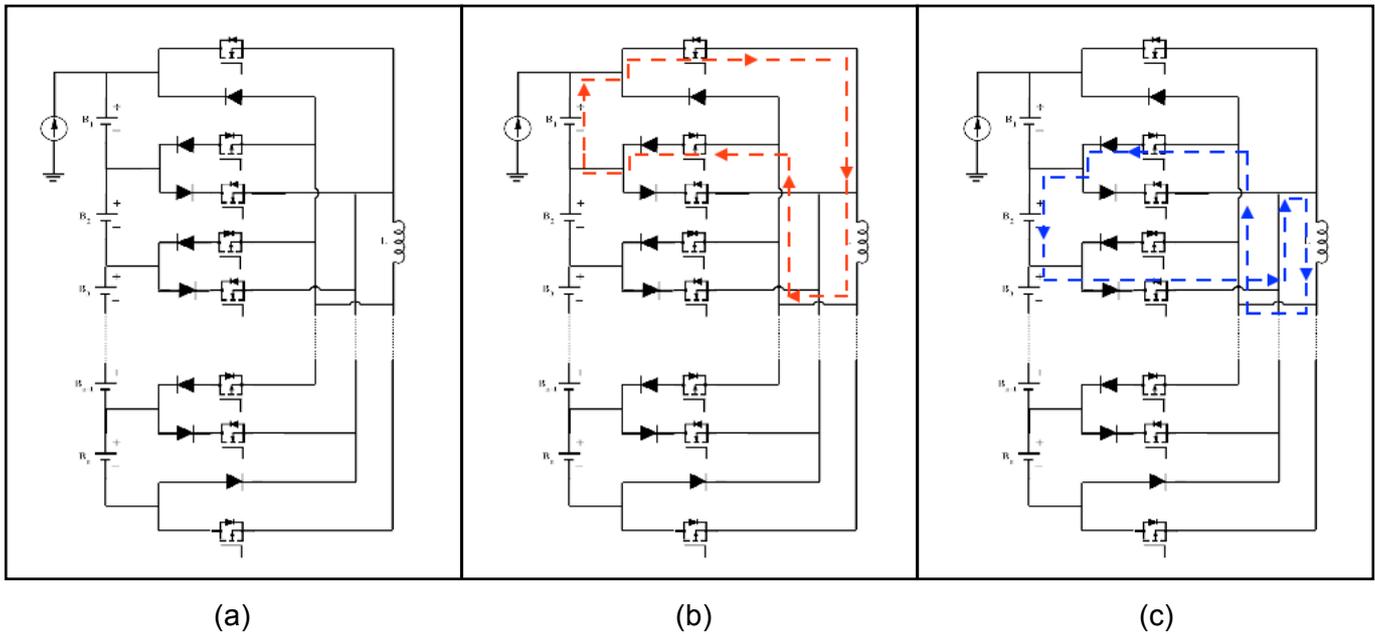


**Figura 13.** Esquemas de equilibrado con condensadores: (a) condensador conmutado, (b) condensadores conmutados, (c) doble nivel de condensadores conmutados (Daowd, 2013).

El esquema más simple de implementar y controlar es el de condensadores conmutados, donde los interruptores sólo tienen dos posiciones y cada condensador puede mover energía de una celda a su contigua, consiguiendo un balanceo lento. Tanto el esquema de condensador conmutado como el de dos niveles de condensadores conmutados presentan una mejora en cuanto al tiempo de equilibrado. Esto se debe a que poseen mecanismos que permiten traspasar energía entre dos celdas no adyacentes. Además, el último esquema también se puede utilizar en el ecualizado de baterías modulares, donde el segundo nivel de condensadores es el que se encarga de conectar los módulos, manteniendo el equilibrio energético no sólo entre las celdas de un módulo sino que también entre los módulos (Daowd, 2011).

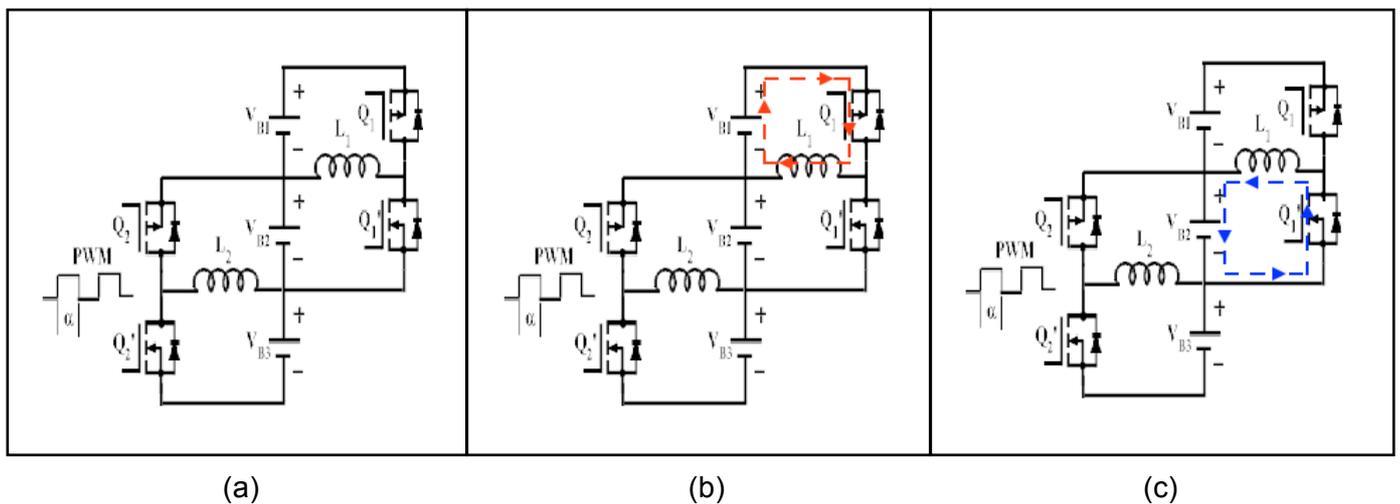
### 3.3.2.2. Equilibrado con inductores

En el caso del equilibrado mediante inductores, su funcionamiento consiste en conectar una celda a una bobina, cargándola. Posteriormente se desconecta esa celda y se conecta a otra celda con menor carga, realizando la transferencia energética mediante una bobina, siendo un mecanismo bastante parecido al del equilibrado con condensadores. Sin embargo, el equilibrado se produce más rápido que en los anteriores aunque el control de los interruptores es más complejo debido a la sensibilidad de los inductores a los cambios bruscos de corriente (Daowd, 2011).



**Figura 14.** Esquema (a) y funcionamiento de balanceo por un inductor (b), (c) (Daowd, 2011).

Dentro del equilibrado por inductores hay dos esquemas diferentes: equilibrado con un inductor y equilibrado con múltiples inductores. La Figura 14 y la Figura 15 muestran ambos esquemas respectivamente y muestran también el funcionamiento de carga y descarga del inductor para realizar el equilibrado de celdas. En el esquema de un único inductor, mediante el control de la carga de cada celda se elige qué par de celdas son las seleccionadas para realizar la transferencia energética, de modo que se pueden elegir dos celdas cualesquiera de la batería. El proceso de eculizado que hay representado sería entre las celdas 1 y 2. Activando los interruptores requeridos se hace pasar energía de la celda 1 a través de la bobina hasta que ésta quede cargada, acto seguido se desconectan los interruptores. El circuito está diseñado para seguir dejando circular la corriente de la bobina, cargando la batería entera, mientras los interruptores están cerrados, hasta que se activan de nuevo, forzando el paso de dicha corriente a través de la celda 2 cargándola.

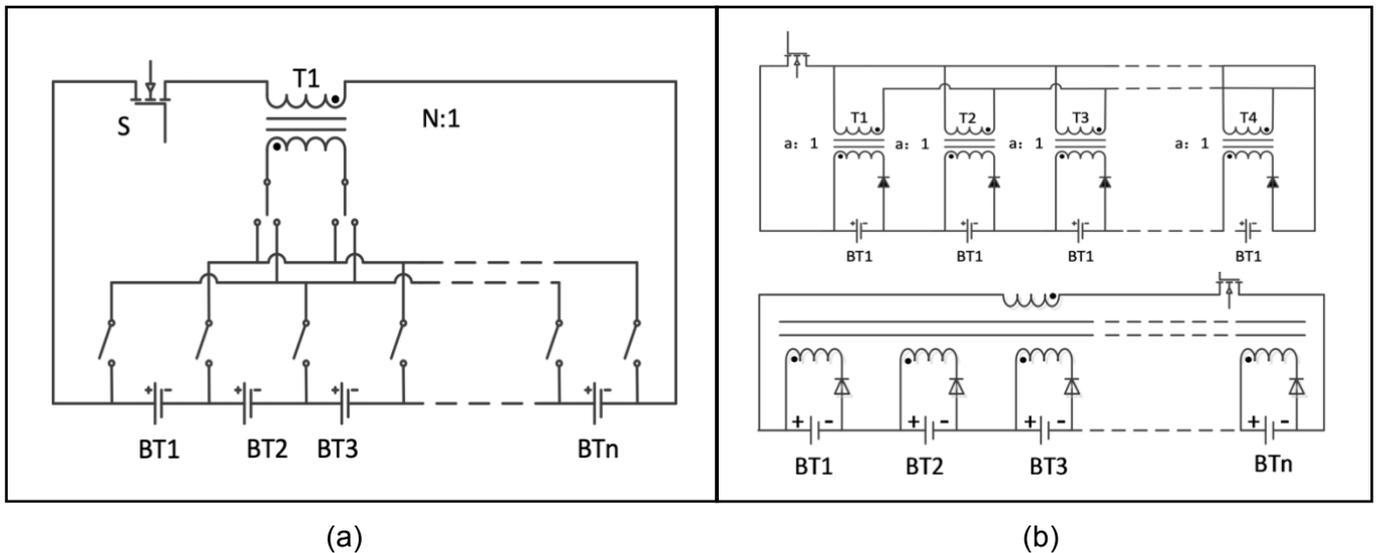


**Figura 15.** Esquema (a) y funcionamiento de un sistema de balanceo por múltiples inductores (b), (c) (Daowd, 2011).

El esquema de múltiples inductores se caracteriza por transferir energía entre celdas adyacentes. Esto puede implicar un aumento del tiempo de balanceo, especialmente en casos donde la batería esté formada por largas cadenas de celdas y el problema ocurra entre celdas extremas. En este caso, para poder pasar la energía de una celda con mayor carga en un extremo a otra con menor en el otro extremo, se requieren muchas operaciones de balanceo para traspasar energía entre estas. En cuanto al mecanismo de equilibrado de celdas, es similar al comentado anteriormente. En este caso, en el proceso de equilibrado, al contrario que en el caso de inductor único, el balanceo de celdas tiene que ser el representado en la Figura 15. Si se elige la celda 1 para cargar la bobina, la celda 2 es la única que puede recibir esa energía, mientras que en el otro esquema podría haber sido cualquiera de las demás celdas.

### 3.3.2.3. Equilibrado con transformadores

El elemento principal de estos circuitos son los transformadores y a diferencia de los dos métodos anteriores no transmiten la energía entre las celdas sino que lo hacen entre la batería y una celda o viceversa, según el esquema. En el primer caso el funcionamiento consiste en transferir energía de la batería a la celda con menor carga, mientras que en el último se trata de pasar energía de la celda con mayor carga a la batería. Hay varios esquemas según el número de transformadores y devanados, como se muestran en la Figura 16.



**Figura 16.** Esquemas de equilibrado con transformadores: (a) devanado único, (b) devanados múltiples (Song y otros, 2018).

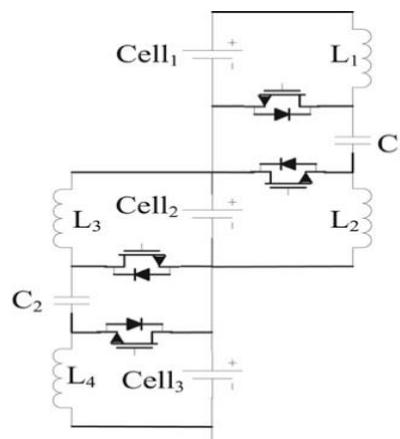
El funcionamiento del esquema de devanado único es similar al de un inductor y al del condensador conmutado, salvando las diferencias, ya que como se ha comentado estos esquemas no realizan transferencia de celda a celda. Sin embargo, la idea de ir conectando la celda requerida mediante los interruptores al devanado secundario del transformador los hace similares. Dentro de los esquemas de devanados múltiples hay por una parte, el transformador compartido, el cual utiliza un núcleo magnético y múltiples devanados en el secundario de éste, mientras que por la otra parte, se encuentra el esquema de múltiples

transformadores, el cual se compone de tantos núcleos magnéticos como celdas en la batería, siendo muy adaptable a modificaciones en el número de celdas. Los sistemas de equilibrado mediante transformadores son complejos de controlar y caros y, excepto el de múltiples transformadores, solo ecualizan en el proceso de carga (Song y otros, 2018).

### 3.3.2.4. Equilibrado con convertidores

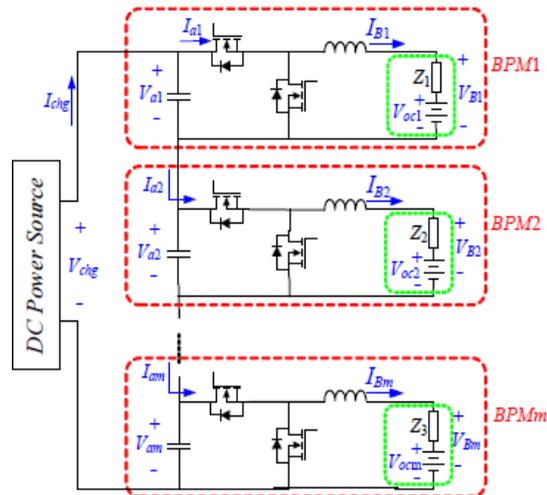
Los sistemas de equilibrado de celdas basados en convertidores son los más avanzados actualmente debido a su eficiencia, velocidad y precisión de ecualizado. Se utilizan distintos tipos de convertidores para el equilibrado de celdas, siendo los más importantes el Cûk, Boost, Ramp, Full-bridge, Resonant y Flyback. Todos ellos se caracterizan por un control muy preciso del ecualizado de celdas y su alta eficiencia. Sin embargo, su funcionamiento, implementación y control son muy complejos (Hoque, 2017).

**Cûk:** Este convertidor se compone de 2 inductores, dos interruptores y un condensador y se dispone entre cada par de celdas, transfiriendo energía entre celdas cada par de celdas. El tiempo de equilibrado es relativamente alto, en especial, en baterías grandes, ya que realiza el equilibrado entre celdas adyacentes.



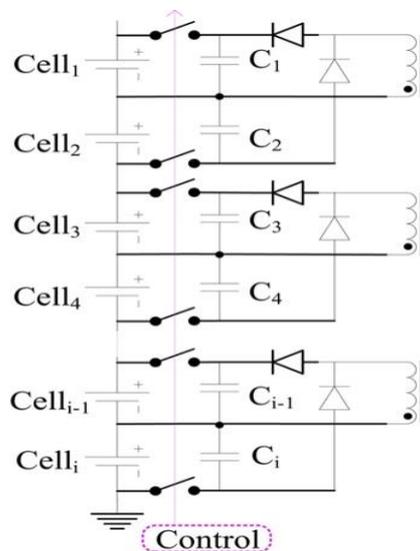
**Figura 17.** Equilibrado con convertidor Cûk (Hoque, 2017).

**Buck y/o Boost:** Son convertidores muy usados en el ecualizado de celdas y según las características de su aplicación se pueden utilizar diferentes esquemas. El esquema Boost se puede utilizar para transferir la energía de las celdas con mayor carga a la batería, mientras que un esquema Buck-Boost, se puede utilizar para transferir la energía de las celdas con mayor carga a aquellas con menor carga. Son eficientes y rápidos. Sin embargo requieren de un control inteligente para seleccionar las celdas para hacer la transferencia energética.



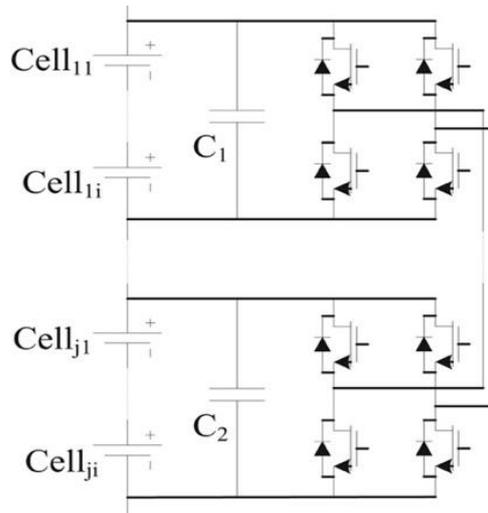
**Figura 18.** Equilibrado con convertidor Buck-Boost (Daowd, 2011).

**Ramp:** Tiene un funcionamiento muy similar al del transformador de múltiples devanados. Se compone de un transformador con el primario conectado a la batería y los múltiples devanados secundarios conectados a cada par de celdas adyacentes. El funcionamiento de este tipo de convertidor se divide en los dos semiciclos de la onda senoidal generada en el transformador. En el primer semiciclo recibirán la mayor parte de la energía aquellas celdas que ocupen una posición impar que tengan menor carga, mientras que en el siguiente semiciclo lo harán las más débiles de aquellas que ocupen una posición par.



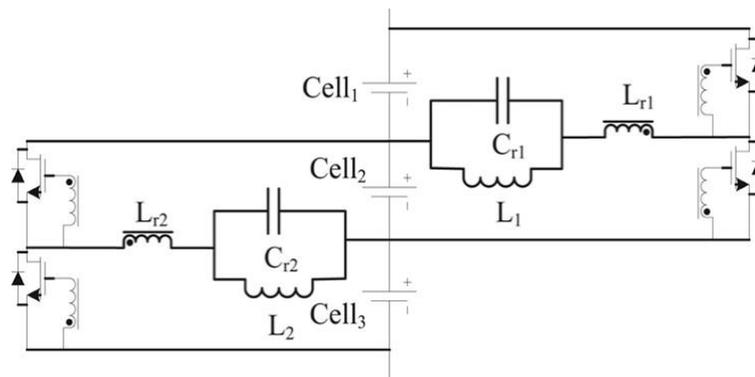
**Figura 19.** Equilibrado con convertidor Ramp (Hoque, 2017).

**Full-bridge:** Consiste en un puente de interruptores que permite el equilibrado tanto en la carga como en la descarga y por su configuración este esquema funciona especialmente bien en baterías modulares. Las desventajas más destacadas son: su gran complejidad en el control de los interruptores, el gran tamaño que requiere y el elevado coste.



**Figura 20.** Equilibrado con convertidor Full-bridge (Hoque, 2017).

**Resonant:** Se caracterizan por utilizar un circuito de resonancia –formado por un inductor y un condensador– para controlar los interruptores del circuito de equilibrado de celdas. Este circuito de resonancia funciona con las diferencias de tensión entre celdas adyacentes y utiliza una inductancia como medio de transferencia energética. Este método posee una alta eficiencia debido a la reducción de pérdidas energéticas correspondiente al control de los interruptores.



**Figura 21.** Equilibrado con convertidor Resonant (Hoque, 2017).

**Flyback:** Se basan en el esquema de balanceo con transformador, pudiendo utilizar un transformador con devanado único o con múltiples devanados más la incorporación de algunos interruptores y condensadores. Pueden funcionar entregando la energía de las celdas con mayor carga a la batería o pasando energía de la batería a las celdas con menor carga. Son muy complejos y poseen pérdidas magnéticas que repercuten en su eficiencia.

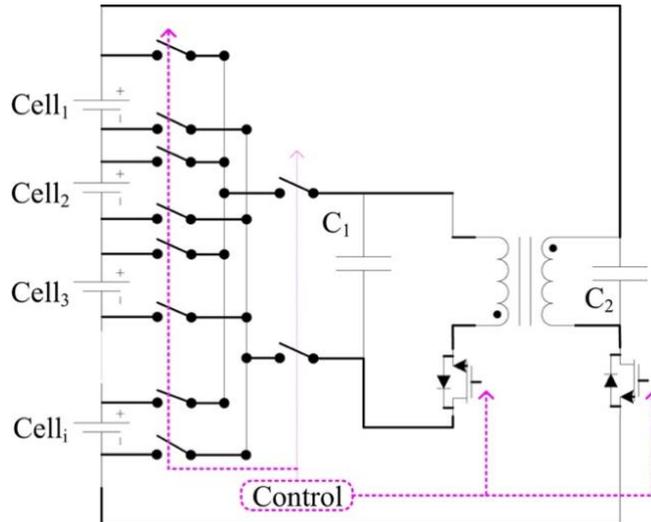


Figura 22. Equilibrado con convertidor Flyback (Hoque, 2017).

### 3.3.3. Comparación entre métodos

En los apartados anteriores han sido presentados los principales métodos de balanceo pasivos y activos. En este apartado se comparan estos métodos según distintos parámetros como la velocidad de equalizado, el flujo de energía, la dificultad de implementación y de control, la eficiencia, el tamaño y el coste. En la Tabla 3 queda realizada dicha comparación.

Tabla 3. Principales características de los diferentes métodos de equalizado de celdas (Hoque y otros, 2017).

Método	Complejidad de control	Complejidad de implementación	Velocidad de equilibrado	Flujo de energía	Eficiencia energética	Tamaño	Coste
Resistencia fija	Muy simple	Simple	Lenta	Fijo	Muy bajo	Muy pequeño	Muy barato
Diodo Zener	Muy simple	Simple	Lenta	Carga	Baja	Muy pequeño	Muy barato
Resistencia conmutada	Simple	Simple	Lenta	Carga	Baja	Muy pequeño	Muy barato

<b>Método</b>	<b>Complejidad de control</b>	<b>Complejidad de implementación</b>	<b>Velocidad de equilibrado</b>	<b>Flujo de energía</b>	<b>Eficiencia energética</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Coste</b>
Condensador conmutado	Alta	Media	Media	Carga/Descarga	Excelente	Pequeño	Barato
Condensadores conmutados	Media	Media	Lenta	Carga/Descarga	Excelente	Medio	Medio
Doble nivel de condensadores conmutados	Media	Media	Media	Carga/Descarga	Excelente	Medio	Medio
Inductor único	Alta	Media	Alta	Carga/Descarga	Alta	Medio	Medio
Inductor múltiple	Alta	Media	Alta	Carga/Descarga	Alta	Medio	Medio
Transformador de devanado simple	Alta	Alta	Media	Carga	Media	Medio	Alto
Transformador de devanados múltiples	Media	Alta	Media	Carga	Media	Grande	Alto
Transformadores múltiples	Media	Media	Media	Carga/Descarga	Media	Grande	Alto
Convertidor Cûk	Alta	Media	Alta	Carga/Descarga	Alta	Medio	Medio
Convertidor Buck/Boost	Alta	Alta	Muy Alta	Carga/Descarga	Excelente	Medio	Medio
Convertidor Ramp	Alta	Muy alta	Media	Carga/Descarga	Media	Grande	Alto
Convertidor Full-bridge	Alta	Media	Muy alta	Carga/Descarga	Excelente	Grande	Alto
Convertidor Resonant	Alta	Muy alta	Media	Carga/Descarga	Alta	Grande	Alto
Convertidor Flyback	Media	Media	Media	Carga/Descarga	Media	Grande	Alto

De la tabla anterior se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los métodos pasivos son muy poco eficientes, realizan un ecualizado lento y sólo es efectivo en la carga. Sin embargo, son los más simples de implementación y control, los más baratos y requieren muy poco espacio.
- Los métodos de equilibrado basados en condensadores son, dentro de los métodos de balanceo activo, los más simples de implementación y control, los más baratos y los que menos espacio requieren. Además, aunque la velocidad de balanceo no es elevada, son muy eficientes.
- Los métodos de equilibrado basados en inductores son muy eficientes y consiguen el equilibrado de celdas en muy poco tiempo. En cambio, el control es complejo y debido a la alta frecuencia de conmutación requieren filtros para eliminar el ruido.
- Los métodos de equilibrado basados en transformadores son complejos de implementación y control, tienen problemas de magnetización, por lo que son menos eficientes, tienen un tamaño muy grande y la velocidad de equilibrado no es tan alta como con inductores, ya que utilizan equilibrado de batería a celda o de celda a batería.
- Los métodos de equilibrado basados en convertidores suponen, en general, mejoras respecto a los anteriores métodos activos en cuanto a velocidad, eficiencia y precisión de ecualizado, pero la complejidad de control e implementación es muy elevada, además de la necesidad de conocimientos muy avanzados para entender correctamente el funcionamiento de cada método.

## **4. DISEÑO DE BATERÍA Y BMS**

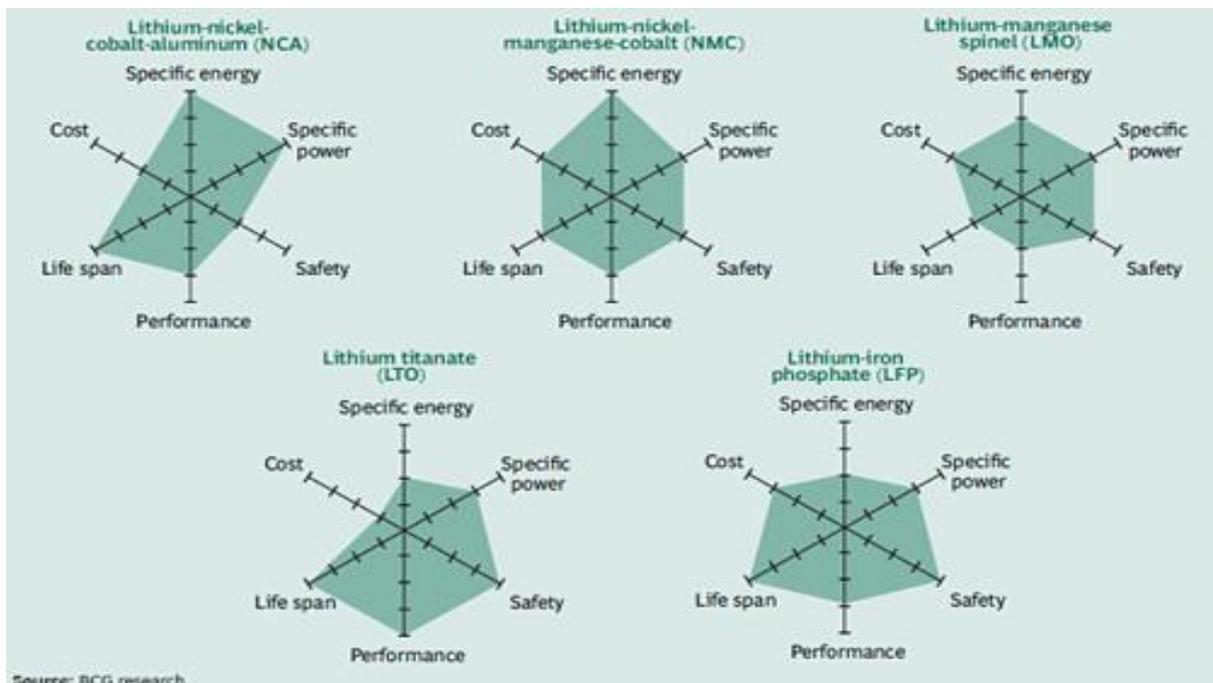
Una vez realizado el estudio en profundidad tanto de las baterías como de los BMS se puede proceder al diseño de estos. Primeramente se realiza el diseño de la batería y posteriormente el diseño del sistema de equilibrado de dicha batería. El proceso tiene que ser así y no al contrario, ya que el BMS se diseña específicamente para satisfacer las características de una batería, en caso contrario no serviría de nada su uso, ya que no gestionaría eficientemente la batería. Para diseñar la batería se necesita por una parte, el estudio realizado anteriormente para acotar el tipo de celdas que buscar y, por otra parte, tener una estimación de la potencia y la energía que tiene que ofrecer la batería para realizar el predimensionado de la batería con cada tipo de celda. Para diseñar el sistema de equilibrado se acotan los métodos mediante el estudio realizado en el capítulo anterior y posteriormente se realiza un análisis de cada uno de los circuitos para elegir el que mejores características ofrezca y finalmente diseñarlo a medida para la batería.

## 4.1. Diseño de la batería

Después del análisis de las baterías más importantes que se pueden encontrar actualmente, ahora es el momento de seleccionar el tipo de celda que puede funcionar mejor a la hora de diseñar una batería que va a ser utilizada en un prototipo de moto eléctrica de competición. Lo primero es centrarse en una de las grandes familias expuestas. Siendo consecuentes con lo anteriormente expuesto, en una moto de competición prima que en todo momento la batería sea capaz de ofrecer al motor la energía demandada y poder almacenar la energía suficiente para acabar la carrera ocupando el menor espacio y con el mínimo peso posible. Esto elimina de un plumazo las baterías de plomo-ácido, níquel-cadmio y níquel-hidruro metálico.

La batería que se va a utilizar es de Ion-Litio, pero dentro de éstas hay muchas variedades. Dentro de estas baterías se encuentran dos grupos: baterías con electrolito líquido o con electrolito sólido. Como se ha visto en el apartado anterior las baterías de electrolito sólido todavía se encuentran en desarrollo, sin ser éstas todavía una mejora de las actuales en la mayoría de los casos. Sin embargo, las baterías Li-Po presentan velocidades de descarga muy elevadas, una característica que se busca para esta batería.

Dentro de las celdas de Ion-Litio convencionales se encuentra una gran variedad de tipos según los electrodos utilizados, consiguiendo unas prestaciones de cada tipo de celda muy diferentes unas de otras, como ya se ha explicado en el segundo capítulo. En la Figura 23 se comparan las características más importantes de 5 de las baterías actualmente más desarrolladas del mercado. Estos parámetros son energía específica, potencia específica, seguridad, rendimiento a altas y bajas temperaturas, vida útil y precio.



**Figura 23.** Comparación de las baterías de Ion-Litio más importantes («Is Li-ion the Solution for the Electric Vehicle? – Battery University», s. f.)

Aquellas baterías que posean mayor área del hexágono coloreada son mejores. Sin embargo, no es lo único importante, ya que aunque posean una gran área coloreada, debe satisfacer lo más posible a las prestaciones que se buscan para la moto. Éstas, al tratarse de una moto de competición, son las siguientes:

- Alta energía específica y densidad energética para poder almacenar la suficiente energía para completar la carrera con el menor peso y volumen posible.
- Alta potencia específica para poder abastecer la demanda energética del motor.
- Garantizar la seguridad de cualquier persona que manipule el prototipo.

Como se puede apreciar, el rendimiento predomina en los requisitos de la batería, dejando a un segundo plano factores como el precio o vida útil de la batería, ya que su cometido va a ser aportar el máximo rendimiento al prototipo durante la competición. Por otra parte, en caso de igualdad de características se elegiría aquella más barata y/o con una mayor vida útil. Habiendo matizado todo lo que se busca de la batería, el siguiente paso es estimar los valores de energía y potencia que ha de tener la batería para completar la competición.

Para esta parte es necesario tener valores de referencia lo más reales posibles de la energía total que tiene que ser capaz de almacenar la energía y la potencia que tiene que ser capaz de suministrar al motor. De acuerdo con Rodríguez y otros (2017), el prototipo del equipo UMA Racing Team, que participó en la edición de 2016 de la competición MotoStudent, consumió una energía de 4,53 kWh en la carrera, que es la prueba más larga y por lo tanto en la que se requiere más energía. En la edición de 2016 la carrera consistía en una vuelta de formación, 5 vueltas al circuito –la carrera– y la vuelta al box suponiendo que el consumo de energía de la primera y la última suponen un consumo del 70% respecto al de una vuelta de carrera. No obstante, según la regulación de la vigente edición (MotoStudent, 2019) la carrera consiste, a diferencia de lo dicho anteriormente, de 6 vueltas además de la de formación y la vuelta a boxes. Con todo esto, y suponiendo que se va a utilizar el mismo motor y que las características del prototipo una vez construido van a ser muy similares, la energía que se necesitará para completar la carrera es de 5,24 kWh y debe ser capaz de suministrar la potencia máxima del motor –34 kW– y a una tensión de 96 V. Finalmente, para poder tener un margen de error, la energía capaz de almacenar la batería es de 5,5 kWh.

Con los valores de energía, potencia y tensión de la batería definidos, el siguiente paso es buscar celdas, obtener sus características –facilitadas por el fabricante, aunque no siempre– y calcular la cantidad de celdas en serie y en paralelo que se necesitan para cumplir con los valores de energía y potencia, de manera que se ajusten lo máximo posible a los valores de referencia y se obtenga el menor peso posible. Los datos más importantes que hay en la hoja de especificaciones de una celda son:

- Tensión nominal ( $U_0$ )
- Capacidad nominal ( $C_0$ )
- Corriente máxima de carga ( $I_c$ )
- Corriente máxima de descarga ( $I_d$ )
- Tensión máxima de carga ( $U_{max}$ )
- Tensión mínima de descarga ( $U_{min}$ )
- Peso
- Dimensiones

Para poder dimensionar la batería quedaría combinar los valores de las características de cada celda con los requisitos anteriores de la batería, con las siguientes expresiones:

$$U_{batería} = N_s * U_0 \quad (7)$$

$$E_{batería} = N_s * N_p * C_0 * U_0 \quad (8)$$

$$P_{min} = N_s * U_{min} * N_p * I_d \quad (9)$$

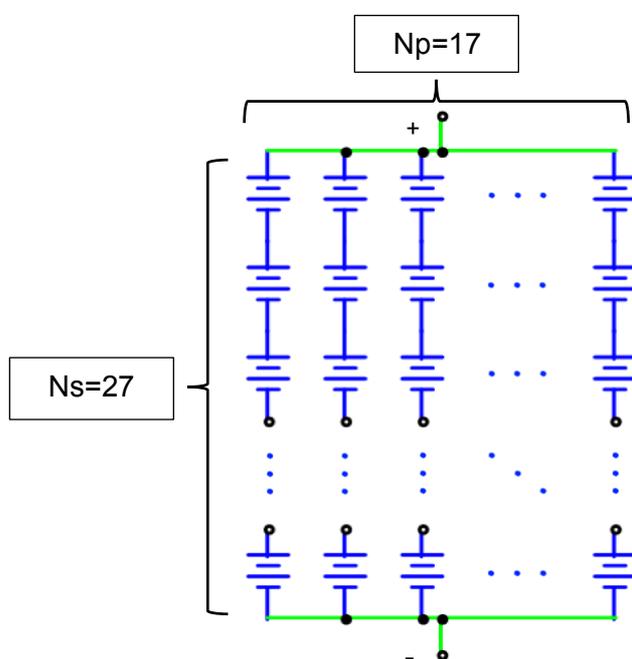
De la Ecuación 7 obtiene el número de celdas en serie – $N_s$ – sabiendo la tensión nominal de la celda y la tensión de la batería –valor determinado por el motor–. Una vez conocido el número de celdas en serie, ya se puede obtener el valor del número de celdas en paralelo – $N_p$ – despejando de la Ecuación 8 y de la Ecuación 9. Lo ideal sería que de ambas ecuaciones el valor de  $N_p$  fuera lo más parecido posible, de tal manera que la batería se ajustara lo máximo posible a los valores de potencia y energía, y reducir así el tamaño y el peso de la batería lo máximo posible.

La Tabla 4 recoge los resultados obtenidos con las diferentes celdas más destacadas de cada tipo, cuyos cálculos quedan recogidos en el primer apartado del Anexo de Cálculos. Cabe remarcar que después de hacer un estudio de mercado las celdas de NMC, NCA y Li-Po destacan respecto de las demás en términos de potencia y de energía específica como se indicaba anteriormente en la Figura 23.

**Tabla 4.** Comparación de los resultados obtenidos con diferentes celdas.

Celda	Ns	Np	Peso (kg)	Volumen (L)	Precio (€)
Panasonic/Sanyo NCR2070C (NCA)	27	17	30,29	10,19	3213
LG INR18650HG2 (NMC)	27	26	33.69	12.30	3037.5
Samsung INR18650- 25S (NMC)	27	23	29,187	10,77	4347
PL-9759156-10C (Li-Po)	26	6	32,76	15,99	7098

Por último, haciendo la comparación de las celdas de la tabla, hay dos celdas que consiguen unas características muy similares. Por una parte, está la batería diseñada con las celdas de Samsung, la cual es la más ligera y ocupa un volumen bastante reducido. Por otra parte, la batería diseñada con las celdas de Panasonic es la que menos espacio ocupa con un peso ligeramente mayor que la anterior. Como parámetro diferenciador, el precio entre ambas baterías es bastante dispar con una diferencia del 35% entre ambas. Dado la igualdad de las características principales, las celdas de Panasonic son las elegidas para la batería de la moto por la sustancial diferencia de precio, consiguiendo una batería con 27 celdas en serie y 17 en paralelo con un peso total de 30,29 kg, un volumen de 10,19 L y un precio de 3213 €.



**Figura 24.** Esquema de conexión de las celdas de la batería.

## 4.2. Diseño del BMS

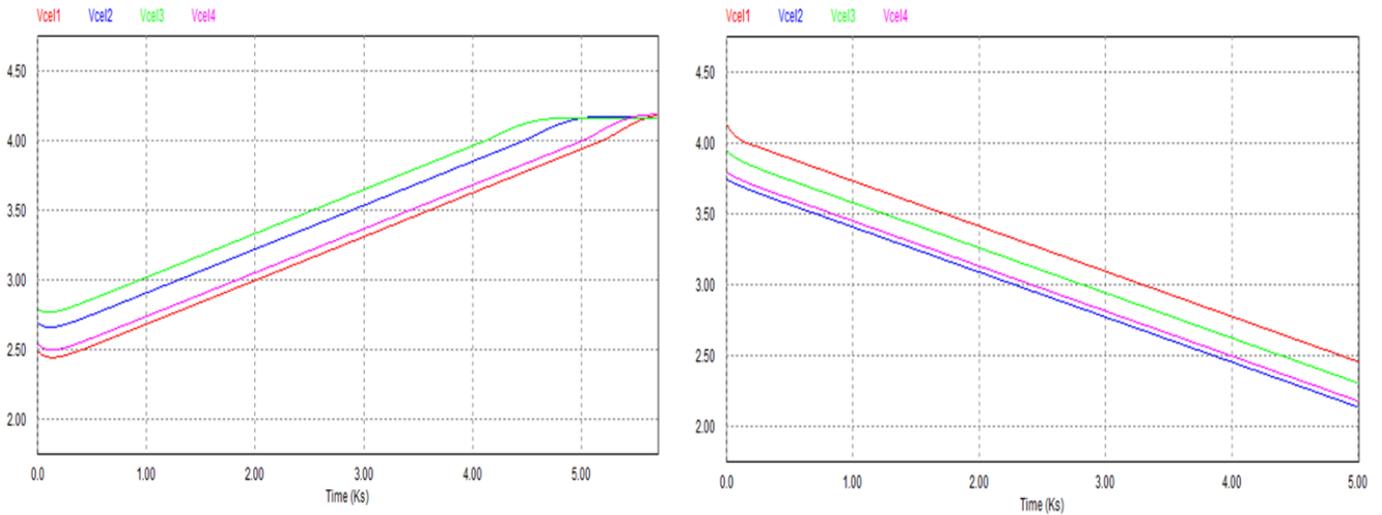
Con la batería diseñada, se puede proceder al diseño del BMS. Como se ha plasmado a lo largo del trabajo, la función del equilibrado de celdas es la más importante para el caso de este proyecto de entre todas las demás expuestas. Por consiguiente, es la función del BMS que se va a diseñar en este trabajo, ya que diseñar todas las funciones se escapa de los objetivos del trabajo, por su amplia extensión y elevada complejidad. Las características principales del método de equilibrado óptimas para la batería serían las siguientes:

- Alta eficiencia energética
- Control e implementación simple
- Tamaño reducido
- Flujo bidireccional –carga/descarga–
- Velocidad de equilibrado suficiente para mantener equilibradas las celdas a lo largo de la carrera

Uno de los aspectos más importantes es la alta eficiencia energética junto con la posibilidad de realizar el equilibrado tanto en el proceso de carga como en el de descarga, ya que nos asegura que la energía de la batería no se va a ver casi disminuida por el proceso de equilibrado y que gracias a éste va a poder ser utilizada la mayor parte de ella. Por otra parte, la simplicidad del diseño y del control es muy importante para facilitar la comprensión total del funcionamiento y evitar problemas de fiabilidad y si hay alguno, que sea lo más sencillo posible arreglarlo. A parte de estas características, el tamaño también es muy importante ya que el espacio libre es una de las condiciones de contorno más restrictivas de la moto, por lo que cuanto más pequeño sea, mejor. En lo que respecta a la velocidad de equilibrado, una batería es un sistema relativamente lento por lo que normalmente no requiere una velocidad de equilibrado alta. Sin embargo, al utilizarse esta batería en una competición, donde la velocidad de descarga es bastante alta, hay que asegurarse que la velocidad de equilibrado del BMS diseñado sea suficiente para mantener las celdas equilibradas durante la carrera sea cual sea el estado de salud de las distintas celdas.

Una vez expuestas las características que se buscan del BMS, se pueden descartar los métodos pasivos por su pobre eficiencia energética así como por funcionar únicamente en el proceso de carga, como se puede observar en la Figura 25. En dicha figura se representa el comportamiento típico de un proceso de equilibrado realizado con diodos Zener durante un proceso de carga –izquierda– y durante un proceso de descarga –derecha–. Durante el proceso de carga el desequilibrio se mantiene hasta que poco a poco cada celda rebasa la tensión Zener, momento a partir del cual el circuito de equilibrado empieza a funcionar, derivando la energía sobrante de las celdas hasta conseguir una batería equilibrada. En cuanto al proceso de descarga, se aprecia cómo el desequilibrio no desaparece, ya que por debajo de dicha tensión Zener el circuito deja de funcionar, siendo un método útil para compensar desequilibrios en el proceso de carga de una manera sencilla y más eficiente que el método de resistencias fijas, pero no en el de descarga. Por otro lado, dentro de los métodos activos se descartan los convertidores por su elevada complejidad de control e implementación así como del gran tamaño de muchos de ellos. Asimismo, los métodos basados en inductores y transformadores se descartan por su

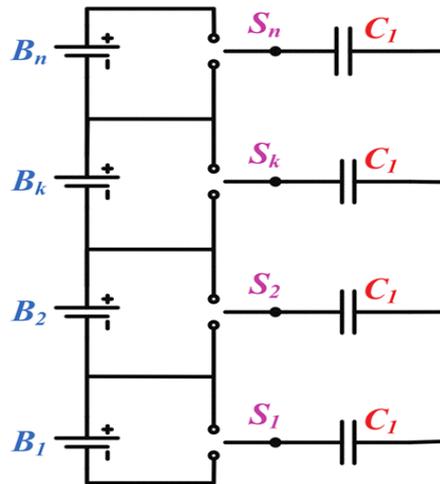
complejidad de control así como por los problemas de magnetización que acarrear los transformadores y por la necesidad de filtros debido a la alta frecuencia de conmutación de los métodos basados en inductores. Los sistemas de ecualizado basados en condensadores son los más apropiados para este proyecto.



**Figura 25.** Comportamiento típico de equilibrado de celdas con diodos Zener.

Dentro del ecualizado con condensadores se encuentran 3 esquemas principales. El esquema de condensadores conmutados es el más sencillo de implementar y, junto con el de doble nivel de condensadores, de controlar. Con una señal PWM se mueven todos los interruptores de una posición a la otra periódicamente hasta conseguir el equilibrio de celdas. Tanto el método de condensador conmutado como el de doble nivel de condensadores conmutados suponen una mejora en la velocidad de equilibrado. Sin embargo, el control para que se realice el ecualizado correctamente en el esquema de un condensador conmutado es mucho más complejo que en los demás casos, por lo que queda descartado.

Por otra parte, dentro del esquema de condensadores conmutados se encuentran diversas variantes que suponen una modificación en el comportamiento del equilibrado de celdas. El esquema elegido como mejora del de condensadores conmutados convencional se presenta en la Figura 26, se denomina esquema de condensadores conmutados optimizado según Wang y otros (2017) y a diferencia del esquema original, este posee tantos condensadores como celdas y por ello presenta unas mejoras considerables en su comportamiento, manteniendo la sencillez de implementación y control que posee el esquema convencional.



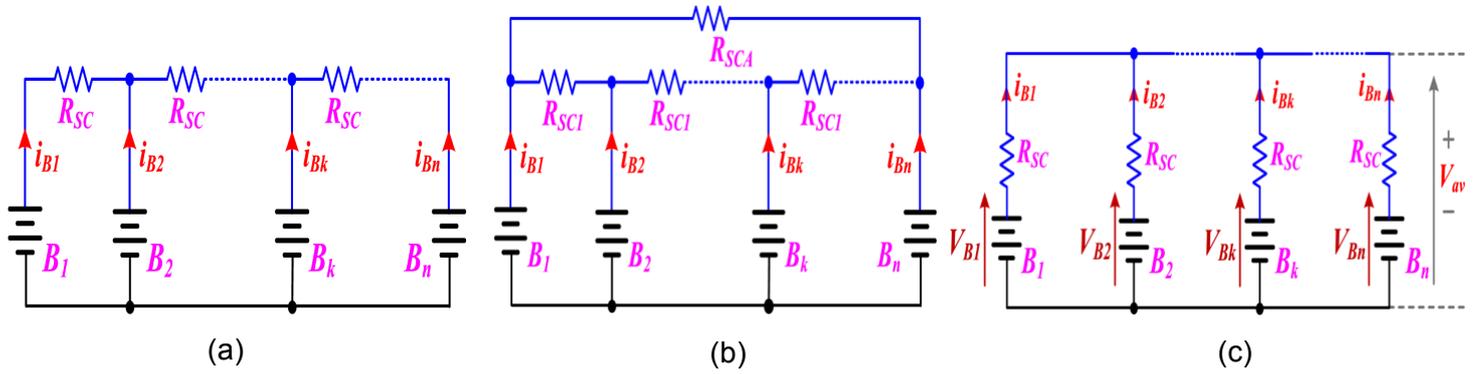
**Figura 26.** Esquema de condensadores conmutados optimizado (Wang y otros, 2017).

Los esquemas mostrados hasta el momento representan los esquemas básicos con componentes ideales, pero en la realidad no es así. Los componentes reales contienen resistencias parásitas así como pequeñas inductancias que afectan al comportamiento final de los circuitos diseñados. Para facilitar la comprensión del funcionamiento del circuito se utilizan los llamados esquemas de comportamiento. Estos son circuitos en los que se sustituyen todos los componentes por resistencias equivalentes, las cuales dependen de las resistencias parásitas, la capacidad de los condensadores, las inductancias parásitas, el ciclo de trabajo y la frecuencia de conmutación de los interruptores. La Ecuación 10 representa el valor de dicha resistencia.

$$R_{SC} = \frac{1 + e^{-\frac{1}{2rcf}}}{Cf \left( 1 - e^{-\frac{1}{2rcf}} \right)} \quad (10)$$

Dicho valor de la resistencia equivalente está calculado para un ciclo de trabajo de la señal PWM *–Pulse-Width Modulation–* que controla los interruptores de 0.5. En dicha ecuación la componente  $r$  representa la suma de las resistencias parásitas que se encuentran en el camino de la corriente (Wang y otros, 2017).

En la Figura 27 se encuentran los esquemas de comportamiento de los distintos métodos seleccionados y en ellos, como se ha comentado anteriormente, se han sustituido tanto los condensadores como los elementos parásitos por resistencias equivalentes, facilitando sus análisis.



**Figura 27.** Esquemas de comportamiento de los esquemas de equilibrado: (a) condensadores conmutados, (b) doble nivel de condensadores conmutados, (c) condensadores conmutados optimizados (Ye y otros, 2017).

En la Figura 27.a se representa el esquema de comportamiento del método de condensadores conmutados convencional –representado en la Figura 13.b–. Es un esquema muy sencillo pero que presenta varias debilidades. Por una parte, su funcionamiento depende de la distribución de la carga de la batería, sufriendo especialmente cuando la mayor diferencia de carga se encuentra entre celdas extremas. Por otra parte, la velocidad de equilibrado se ve muy perjudicada al aumentar el número de celdas a las que tiene que equilibrar.

Una mejora del anterior método es el presentado en la Figura 27.b. Esta figura representa el esquema de comportamiento del método de doble nivel de condensadores conmutados –representado en la Figura 13.c–. Al incluir un condensador uniendo las celdas de las posiciones extremas la velocidad de ecualizado se ve mejorada, especialmente cuando la diferencia de carga se encuentra sobre todo en las celdas de los extremos de la cadena. Por el contrario, la de velocidad de ecualizado se ve perjudicada al aumentar el número de celdas al igual que esquema convencional de condensadores conmutados.

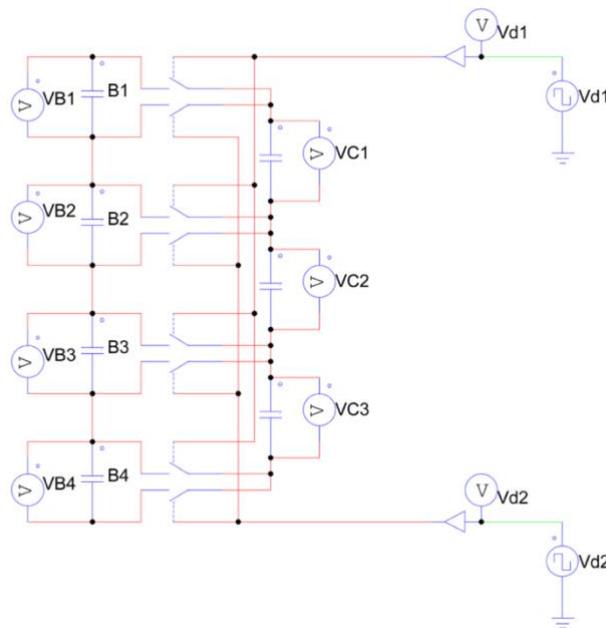
Por último, en la Figura 27.c se encuentra el esquema de comportamiento del método de condensadores conmutados optimizado –representado en la Figura 26–. Éste se caracteriza por su gran estabilidad en la velocidad de equilibrado. Esto es debido a que la transferencia de una celda a cualquier otra tiene que pasar una resistencia equivalente a  $2R_{sc}$ , como se puede apreciar en el esquema. Esto implica que la velocidad de equilibrado es independiente al número de celdas (Ye y otros, 2017). Sin duda esta característica resulta muy importante en baterías con una gran cantidad de celdas.

### 4.2.1. Comparativa de los métodos

Por último, para seleccionar el método que posteriormente se va a diseñar, se han realizado una serie de simulaciones para corroborar el comportamiento de cada método en distintas situaciones. Por una parte, variando el número de celdas a equilibrar y por otra, variando la distribución de tensiones de las celdas.

La Figura 28 presenta el esquema que se ha montado en PSIM del método de condensadores conmutados convencional para el equilibrado de 4 celdas. El esquema consta de 3 partes:

- Circuito de equilibrado
- Circuito de control
- Celdas de la batería



**Figura 28.** Esquema realizado en PSIM del método de condensadores conmutados convencional con 4 celdas.

El circuito de equilibrado se compone de 3 condensadores conectados cada uno de ellos entre celdas adyacentes mediante el uso de interruptores, los cuales son accionados por el circuito de control. Éste consta de dos fuentes de señal cuadrada desfasadas 180 grados, consiguiendo que se activen y desactiven los interruptores que ocupan una posición par y los que ocupan una posición impar alternativamente con un ciclo de trabajo de  $D=0.5$ . Por otra parte, las celdas de la batería están simuladas con condensadores. Esto es debido a que se reduce el tiempo de simulación y así se pueden apreciar mejor las diferencias entre métodos (Wang y otros, 2017). Consecuentemente, se han considerado todos los elementos ideales, despreciando las resistencias parásitas de los elementos. Los

otros esquemas de equilibrado se han realizado de manera análoga al anteriormente explicado. Todos los condensadores de equilibrado tienen la misma capacidad de 220  $\mu\text{F}$ , los condensadores que simulan las baterías son de 3 F y la frecuencia de conmutación es de 50 kHz. Es una simulación basada en el estudio realizado por Ye y otros (2017).

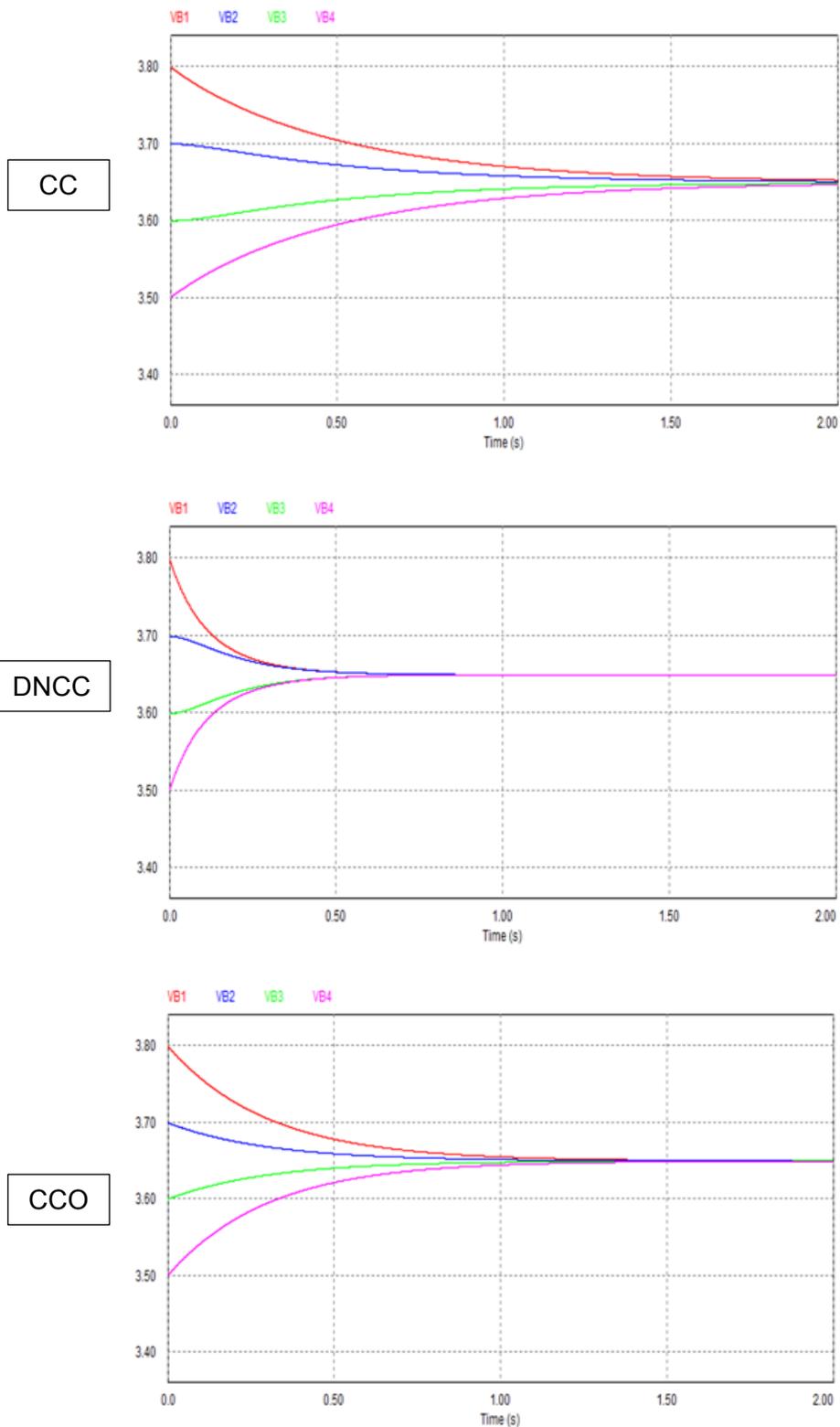
Para realizar la comparación de dichos circuitos, se realizan dos simulaciones. En la primera parte de simulaciones se varía el número de celdas. Las tensiones iniciales están incluidas en la Tabla 5. La característica de las tensiones de esta primera parte es que la diferencia de potencial entre celdas adyacentes es la misma, 0.1 V. Esta simulación sirve para comparar el comportamiento de cada circuito con el aumento de las celdas a equilibrar. La siguiente parte consiste en simular el proceso de equilibrado en los 3 esquemas con 8 celdas en todos los casos, pero variando el perfil de tensiones en las celdas –la diferencia de tensiones entre celdas adyacentes varía–, como muestra la Tabla 5.

**Tabla 5.** Datos de las tensiones iniciales de cada celda en cada una de las simulaciones.

<b>Simulación</b>	<b>V<sub>B1</sub></b>	<b>V<sub>B2</sub></b>	<b>V<sub>B3</sub></b>	<b>V<sub>B4</sub></b>	<b>V<sub>B5</sub></b>	<b>V<sub>B6</sub></b>	<b>V<sub>B7</sub></b>	<b>V<sub>B8</sub></b>
<b>1.a</b>	3.8 V	3.7 V	3.6 V	3.5 V	-	-	-	-
<b>1.b</b>	3.9 V	3.8 V	3.7 V	3.6 V	3.5 V	3.4 V	-	-
<b>1.c</b>	4.0 V	3.9 V	3.8 V	3.7 V	3.6 V	3.5 V	3.4 V	3.3 V
<b>2.a</b>	3.4 V	3.5 V	3.6 V	3.75 V	3.7 V	3.5 V	3.4 V	3.3 V
<b>2.b</b>	3.8 V	3.3 V						
<b>2.c</b>	3.8 V	3.5 V	3.7 V	3.6 V	3.75 V	3.4 V	3.6 V	3.7 V

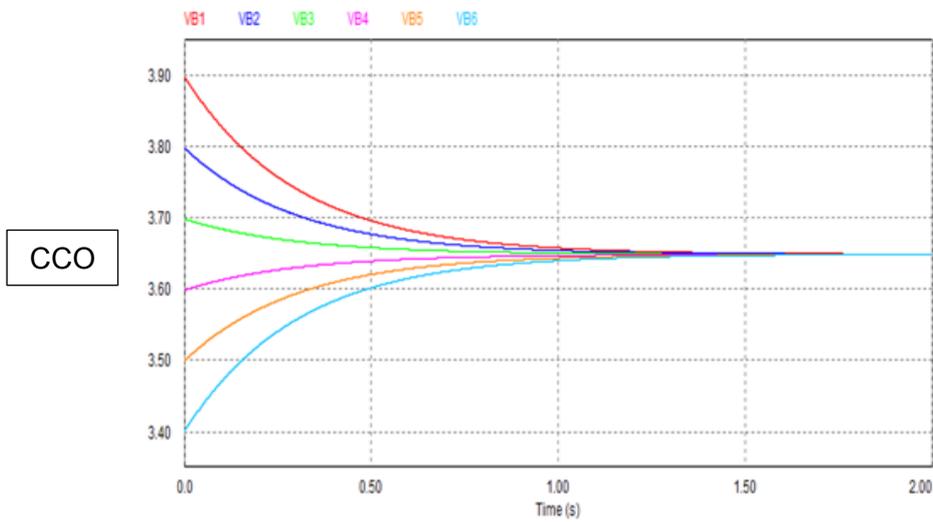
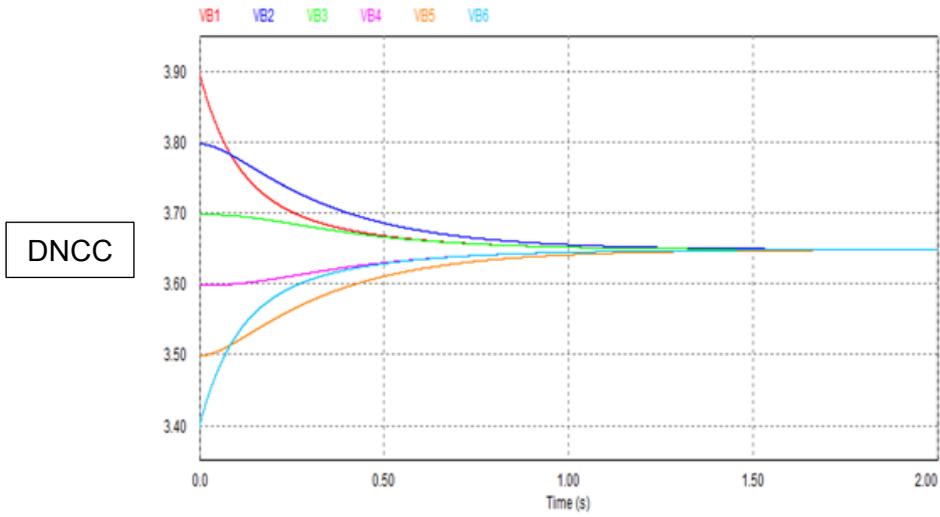
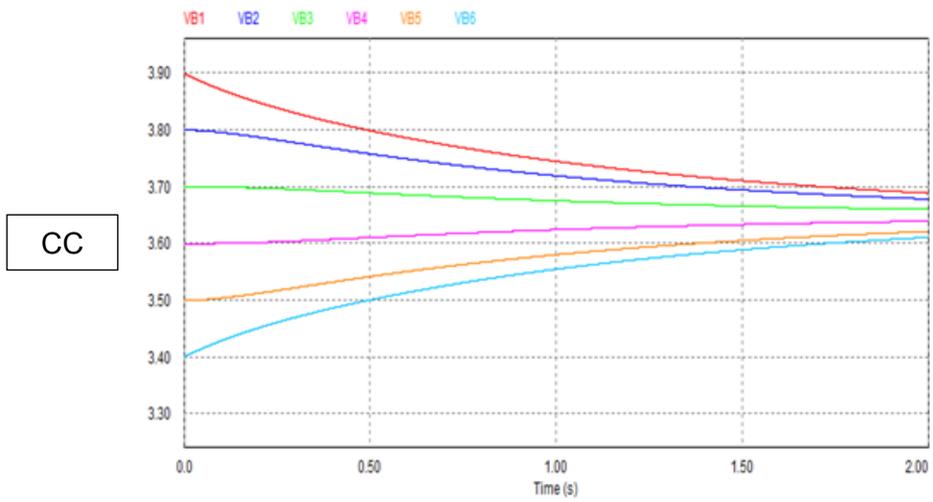
Después de la realización de las simulaciones, los resultados se muestran en las Figuras 29 a 34. La primera gráfica corresponde al esquema convencional de condensadores conmutados –CC–, la segunda a la de doble nivel de condensadores conmutados –DNCC– y la tercera al esquema de condensadores conmutados optimizado –CCO–. Cada Figura representa el resultado de cada simulación indicada en la Tabla 5.

Tras realizar el primer grupo de simulaciones –Figuras 29, 30 y 31–, donde el parámetro que varía es el número de celdas, se aprecia que el esquema convencional es, sin duda, el más lento de los 3 esquemas para cualquier número de celdas y que conforme aumenta el número de éstas la velocidad de balanceo disminuye bruscamente. El esquema de doble nivel de condensadores conmutados es mucho más rápido que el anterior en todos los casos y además, es el más rápido cuando hay pocas celdas que ecualizar. Sin embargo, como se ha comentado en el apartado anterior, la velocidad de balanceo depende fuertemente del número de celdas al igual que el método anteriormente comentado, lo cual se ve reflejado en el tiempo de equilibrado, pasando de poco más de medio segundo cuando hay 4 celdas a casi dos segundos cuando hay 8 celdas. Este problema lo soluciona el tercer esquema, el cual es ligeramente más lento que el de doble nivel de condensadores en el caso de 4 celdas, pero al aumentar el número de celdas mantiene constante su velocidad de ecualizado, realizándolo en poco más de un segundo en todos los casos.



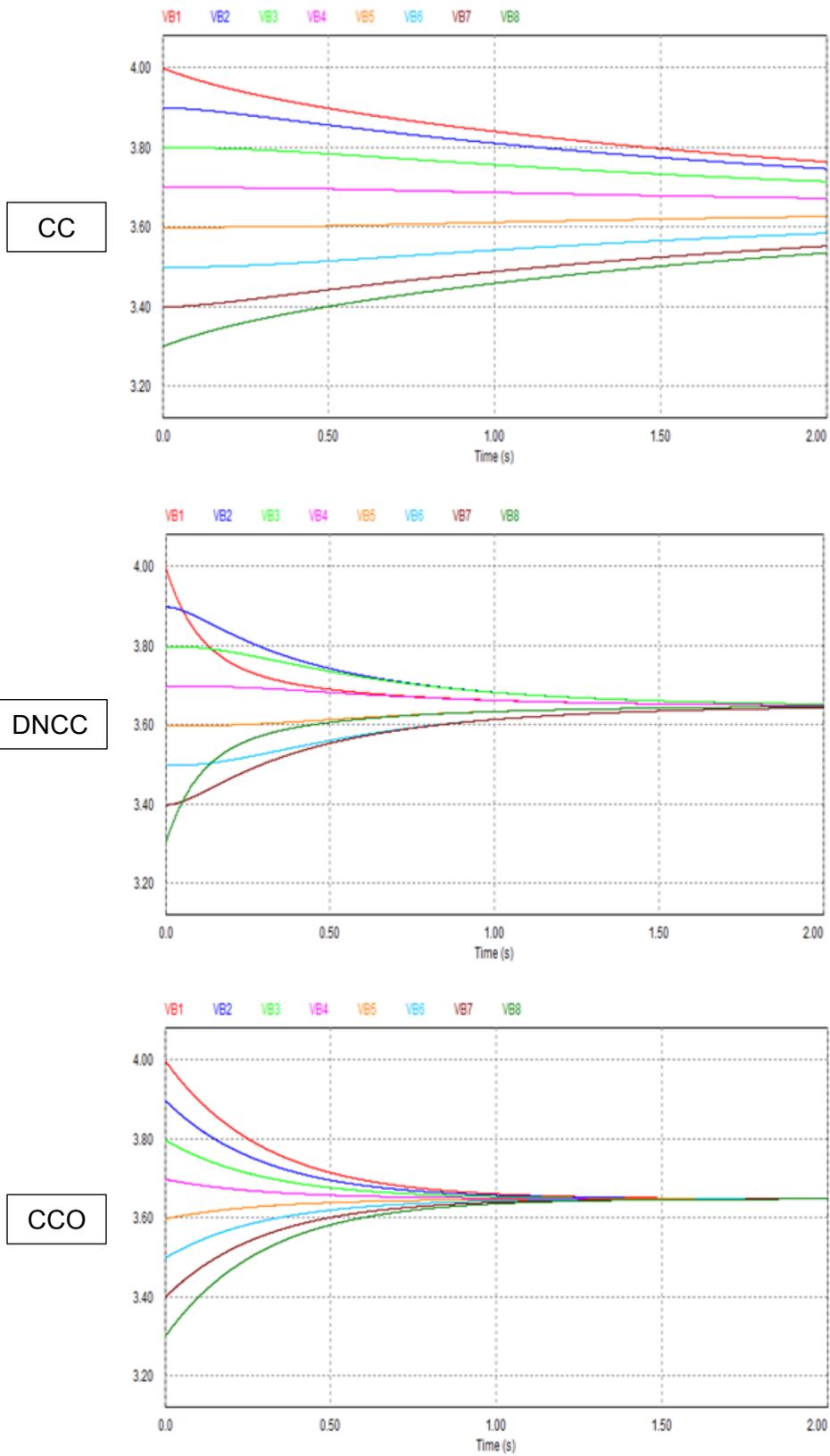
(1.a)

Figura 29. Resultados de la simulación 1.a para cada método –CC, DNCC y CCO–.



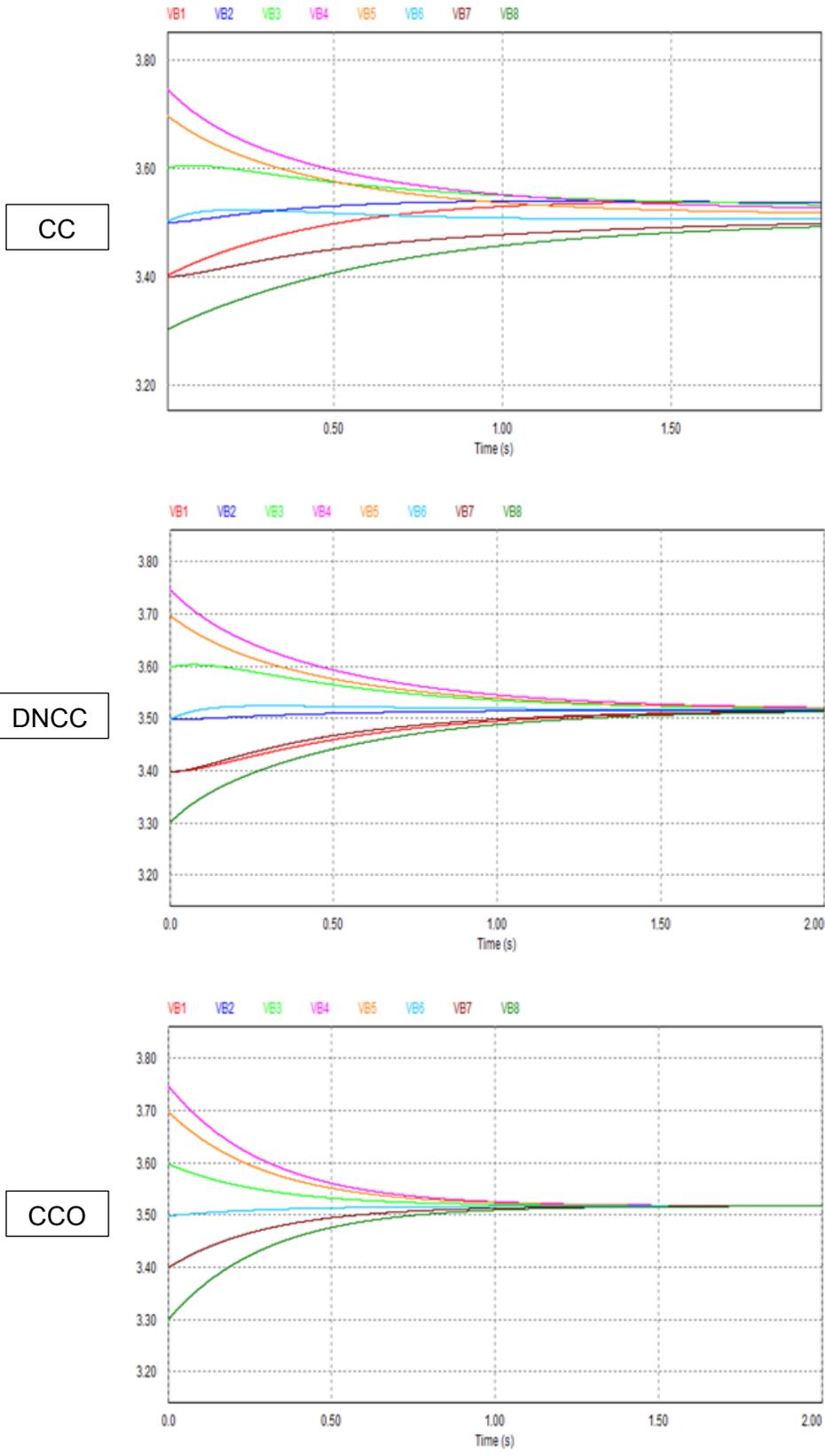
(1.b)

Figura 30. Resultados de la simulación 1.b para cada método –CC, DNCC y CCO–.



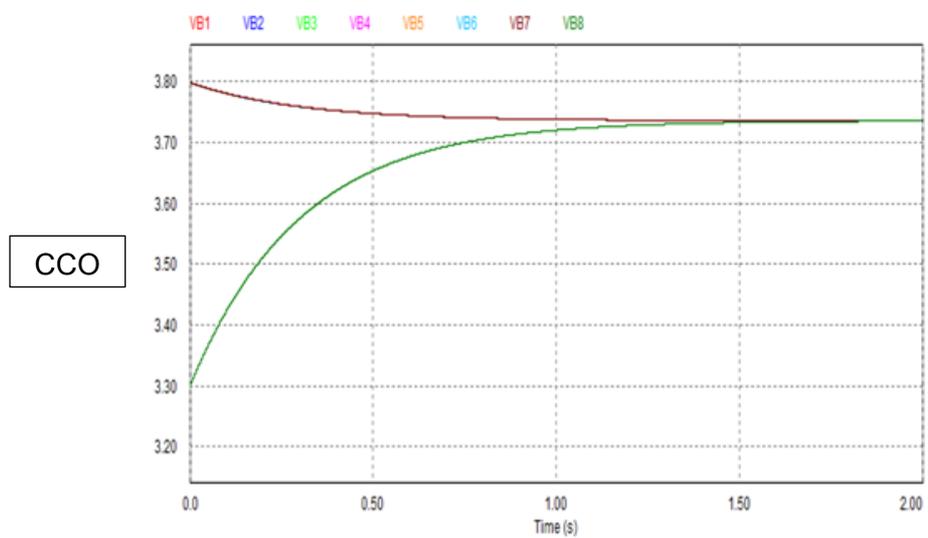
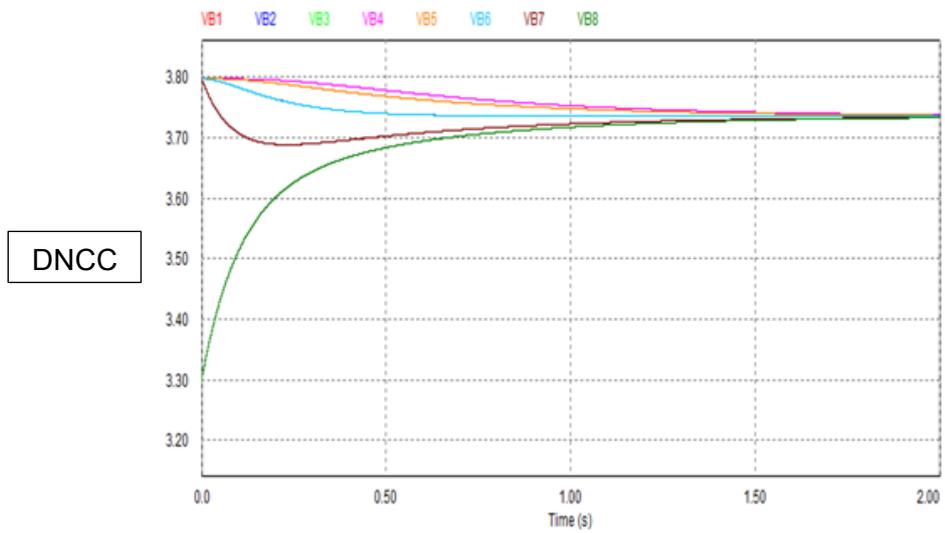
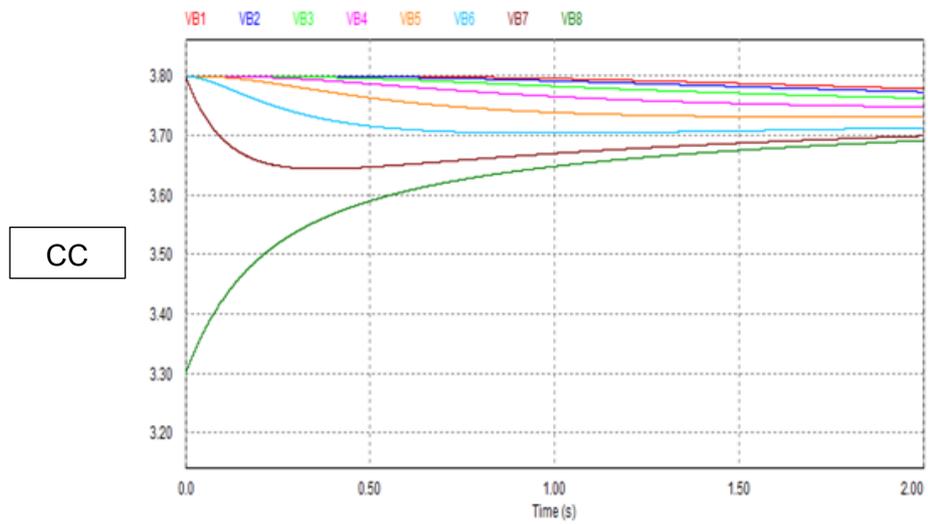
(1.c)

Figura 31. Resultados de la simulación 1.c para cada método –CC, DNCC y CCO–.



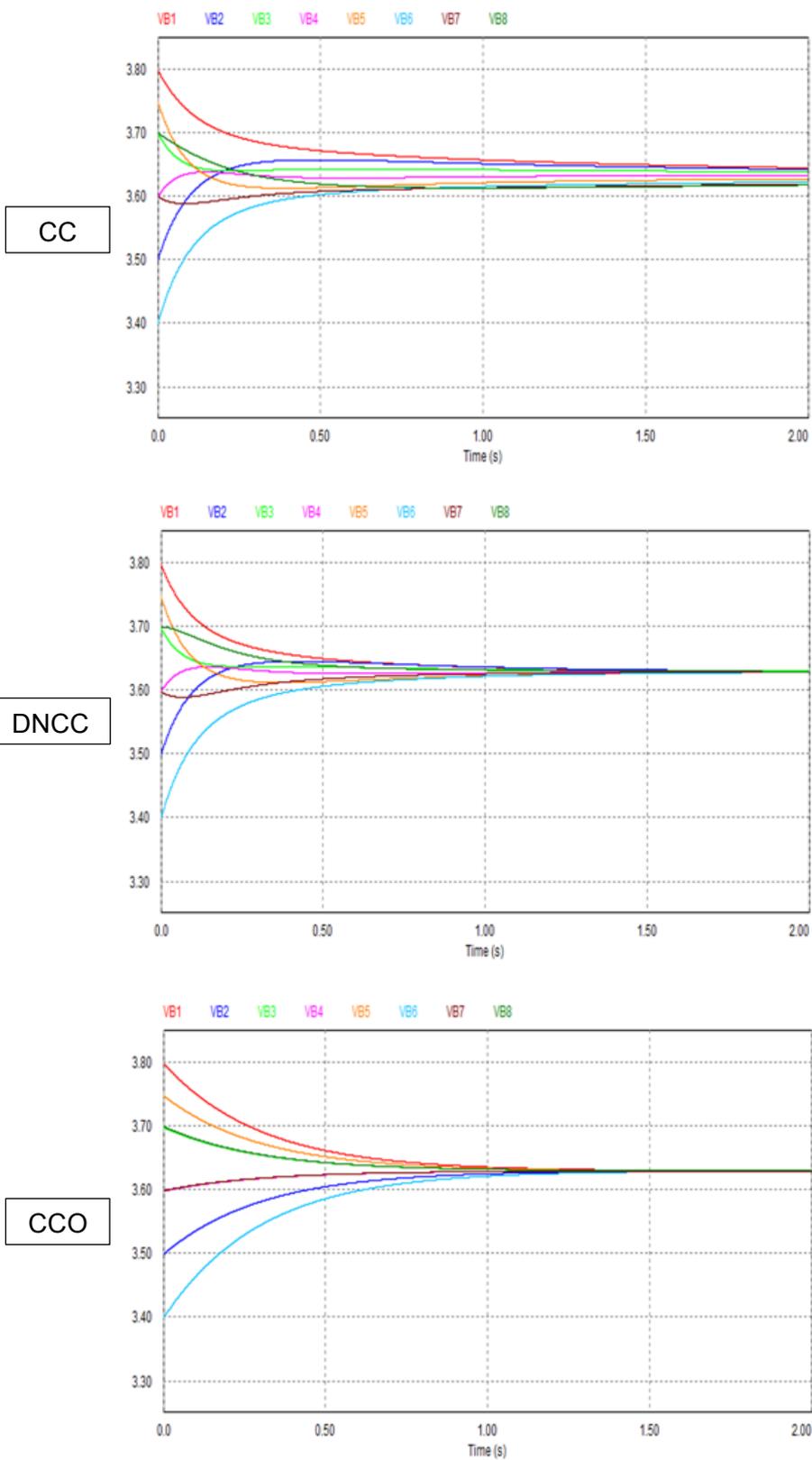
(2.a)

Figura 32. Resultados de la simulación 2.a para cada método –CC, DNCC y CCO–.



(2.b)

Figura 33. Resultados de la simulación 2.b para cada método –CC, DNCC y CCO–.



(2.c)

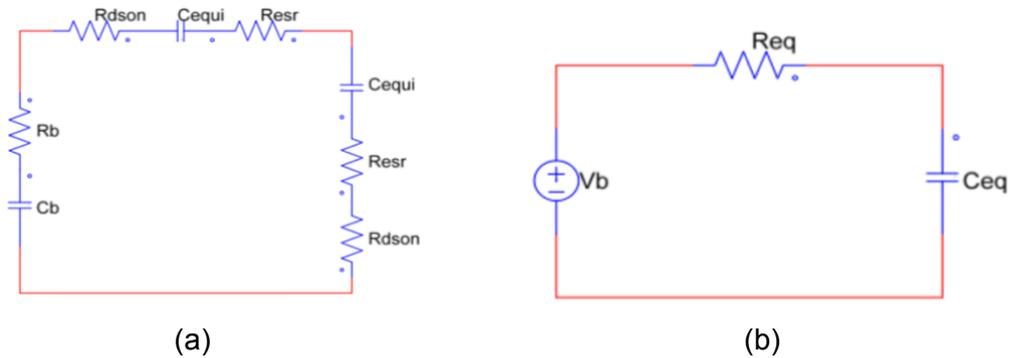
Figura 34. Resultados de la simulación 2.c para cada método –CC, DNCC y CCO–.

En el segundo grupo de simulaciones –Figuras 32, 33 y 34– el parámetro que varía es la distribución de tensiones, diferenciando tres casos. En el primero –simulación 2.a–, la tensión de las celdas de los extremos es menor que en la de las celdas del centro. En la siguiente simulación –simulación 2.b– el nivel de todas las celdas es de 3.8 V excepto una celda con un nivel de tensión menor. Por último, el tercer caso –simulación 2.c– representa una distribución aleatoria de tensiones donde la diferencia de potencial entre celdas adyacentes va variando a lo largo cadena de celdas. Como resultado de estas simulaciones se confirma lo analizado en los esquemas de comportamiento anteriores –Figura 27–. El método de condensadores conmutados es el peor en todos los casos, especialmente cuando la mayor diferencia entre cargas se encuentra en los extremos del conjunto de celdas. Esto es debido a la falta de mecanismos para transferir la energía entre celdas en posiciones extremas. Por otra parte, el método con doble nivel de condensadores mejora considerablemente la velocidad de equilibrado con respecto al anterior gracias a la conexión de los extremos. Sin embargo, al transferir energía entre celdas no adyacentes la resistencia equivalente aumenta proporcionalmente con la diferencia entre la posición de las celdas y para números mucho mayores de celdas en serie se notaría una caída brusca en la velocidad de balanceo. Finalmente, el último esquema como se ha comentado anteriormente no tiene este problema. Se puede apreciar especialmente en la simulación 2.b que todas las celdas que inicialmente parten de 3.8 V se descargan a la vez. Esto se debe a que todas las celdas entregan la misma cantidad de energía, ya que la intensidad de equilibrado en este modelo se calcula como la diferencia de tensión entre la celda y la media de tensión de la cadena entre la resistencia equivalente, siendo ésta la misma entre cualquier celda.

#### 4.2.2. Selección y diseño de circuito

Después de analizar y simular el comportamiento de los diferentes circuitos se puede confirmar que el esquema de condensadores conmutados optimizado –CCO– presenta mejores características de balanceo, ya que como se muestra en las diferentes gráficas, ha mostrado una velocidad de ecualizado alta y ser muy consistente en el tiempo de ecualizado bajo cualquier condición, tanto con diferente número de celdas como con diferentes perfiles de tensiones de las celdas. Además, aunque en algunas simulaciones el método de doble nivel de condensadores conmutados haya realizado el balanceo en menos tiempo, no ha sido así para todos los casos con 8 celdas. Teniendo en cuenta que la batería del prototipo tiene más del triple de celdas en serie, queda clara la ventaja del método seleccionado.

Una vez seleccionado el método de balanceo, el próximo paso es realizar el diseño del circuito. Esto incluye seleccionar los condensadores de equilibrado, la frecuencia de conmutación, los interruptores... consiguiendo optimizar el funcionamiento del circuito de equilibrado para la batería anteriormente diseñada.



**Figura 35.** Circuito básico de una celda conectada al circuito de equilibrado: (a) circuito con todos los componentes desglosados, (b) circuito con los componentes agrupados.

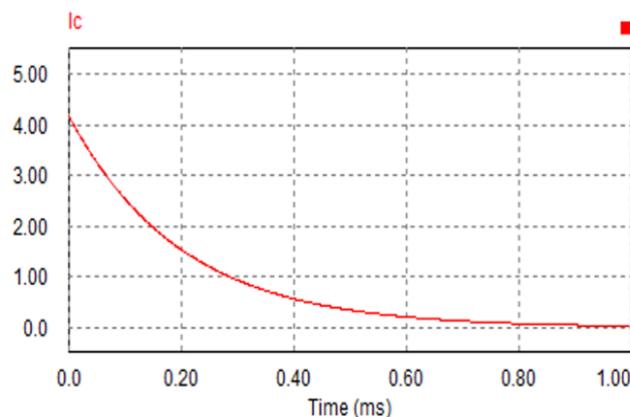
En la Figura 35.a se muestra el circuito básico de una celda conectada al circuito de equilibrado. En dicho circuito se diferencian: el condensador  $C_b$ , la resistencia interna de la batería  $R_b$  –estos dos elementos representan la batería–, las dos resistencias  $R_{dson}$ , que representan las resistencias de conmutación de los interruptores, los dos condensadores  $C_{eqi}$  y las dos resistencias  $R_{esr}$ , que representan las resistencias serie de los condensadores de equilibrado. La Figura 35.b representa el mismo circuito con los elementos agrupados y realizando la simplificación de que en cada ciclo de conmutación la tensión de cada celda se mantiene constante, ya que la capacidad del condensador  $C_b$  tiene una capacidad mucho mayor a los condensadores de equilibrado  $C_{eqi}$ . Por ello se ha sustituido el condensador  $C_b$  por una fuente de tensión de amplitud  $V_b$ , que representa el valor inicial de cada celda al inicio de cada conmutación. Éste es un circuito RC en el que según la tensión de la batería y del condensador la corriente circulará de la batería al condensador – $V_b > V_c$ – o del condensador a la batería – $V_b < V_c$ –. Estos representarían las dos situaciones posibles, que se haya una celda con más carga que su adyacente y cargue al condensador para posteriormente descargarse en la otra celda o lo contrario. Después del análisis del circuito, el tiempo de carga y de descarga del condensador es:

$$t = R_{eq} * C_{eq} * \ln\left(\frac{1}{1-x}\right) \quad (11)$$

En esta ecuación, el parámetro  $x$  indica el porcentaje de carga/descarga del condensador, partiendo del valor  $x=0$  cuando la tensión del condensador es la tensión inicial y  $x=1$  cuando la tensión del condensador se iguala a la de la celda. Por otra parte, el periodo de conmutación viene dado por la suma del tiempo de carga más el de descarga, lo cual está directamente relacionado con la frecuencia de conmutación, la cual se fija a 50 kHz. Esto es debido al óptimo funcionamiento de los componentes electrónicos a dicha frecuencia tal y como demuestra Ye y otros (2017). La Ecuación 11 representa el tiempo de un ciclo completo tal y como se ha dicho antes.

$$2 * R_{eq} * C_{eq} * \ln\left(\frac{1}{1-x}\right) = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{50000} \quad (12)$$

Llegados a este punto se ve claramente la importancia del valor de la resistencia y de la capacidad del condensador. Ambos valores afectan en el tiempo de carga/descarga del condensador, aunque no de la misma manera. El aumento de la capacidad del condensador conlleva un aumento de la energía trasegada, mientras que el aumento del valor de la resistencia conlleva una pérdida mayor de energía y una disminución de la intensidad de balanceo, lo que se traduce en un balanceo más lento y menos eficiente. Por ello, uno de los criterios en el diseño del circuito es reducir al máximo la resistencia equivalente. Por otra parte, en la ecuación aparece el porcentaje de carga/descarga de los condensadores. Un criterio de diseño podría ser el de conseguir un porcentaje de carga/descarga elevado, pudiendo considerar que los condensadores han realizado el proceso completo. Este criterio no sería óptimo en este caso, ya que la velocidad de carga/descarga varía durante el proceso. En la Figura 36 se representa la curva característica de la intensidad en la carga de un condensador. La intensidad de carga o descarga de un condensador a lo largo del ciclo no es constante sino que empieza con la intensidad máxima y conforme se carga/descarga va disminuyendo hasta valores muy pequeños. Esto se traduce en que la potencia inicial es máxima y conforme pasa el tiempo va descendiendo, llegando a transferir muy poca energía, suponiendo una pérdida de velocidad de equilibrado.



**Figura 36.** Curva característica de la carga de un condensador.

Partiendo de que el circuito de equilibrado va a estar funcionando en todo momento, al iniciar el proceso de carga/descarga de la batería todas las celdas parten de un estado equilibrado. No obstante, que partan de un estado equilibrado no implica que se vayan a mantener equilibradas a lo largo de la carga/descarga. Esto se debe a que cada celda tiene una capacidad diferente de las demás por diferencias en el proceso de manufacturación, por trabajar a temperaturas diferentes, por diferentes estados de salud... Habiendo realizado ambas suposiciones se puede determinar cuál sería la peor situación a la que se puede enfrentar el circuito de equilibrado y, por lo tanto, diseñar dicho circuito para conseguir equilibrar las celdas en dicha situación. Ésta sería someter a 2 celdas inicialmente equilibradas, pero con capacidades diferentes, a un proceso de descarga rápido –descarga de las celdas en 15 minutos–, el cual simula la descarga que se produciría durante la carrera. Durante la descarga la celda con menor capacidad va a

descargarse antes que aquella con mayor capacidad. El trabajo del sistema de equilibrado consiste en suplir el desequilibrio de capacidades transfiriendo carga constantemente de la celda con más capacidad a la celda con menos capacidad y conseguir que al final de la descarga ambas celdas acaben con la misma carga, lo que equivaldría a que la tensión entre celdas fuese la misma.

Para determinar la diferencia de capacidades entre celdas se utiliza la hoja de datos del fabricante de las celdas, el cual indica que a lo largo de 100 ciclos de una celda la capacidad de una celda disminuye de 3.5 Ah a 3Ah, esta es la diferencia máxima de capacidad que se toma para el diseño del circuito. Esto significa que durante el proceso de descarga el sistema de equilibrado debe transferir 0.25 Ah de la celda con mayor capacidad a la otra, consiguiendo que al final de la descarga ambas hayan aportado 3.25 Ah. Si la descarga se produce en 15 minutos la intensidad de equilibrado debe ser de 1 A tal y como se deduce de la Ecuación 13.

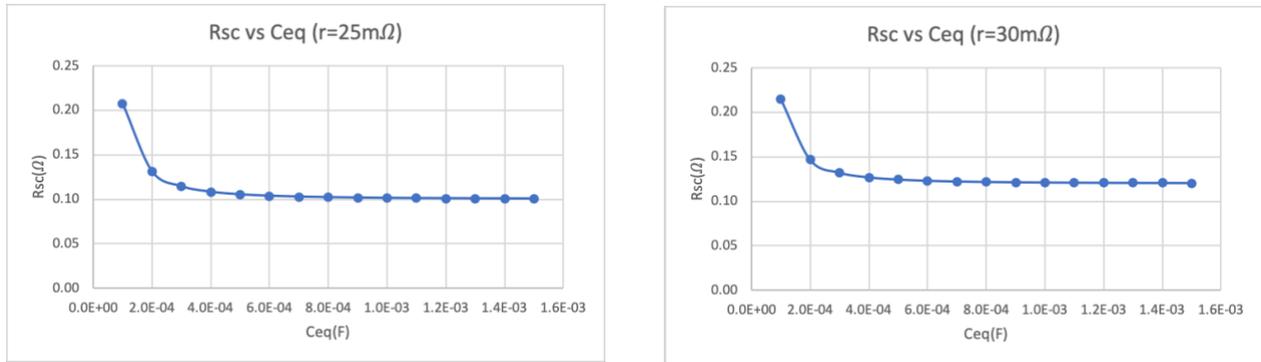
$$I = \frac{C}{t} \quad (13)$$

Por otra parte, la intensidad que circula por el circuito de balanceo viene dada por la diferencia de tensiones entre ambas celdas y la resistencia equivalente del circuito –Ecuación 10– como se muestra en la siguiente ecuación.

$$I = \frac{\Delta V}{R_{sc}} \quad (14)$$

De la ecuación anterior se puede extraer que, para conseguir transferir la suficiente corriente de una celda a otra y conseguir corregir la diferencia de capacidades tiene que haber una diferencia de potencial mínima entre las celdas y que su valor va a depender del valor de la resistencia Rsc. Cuanto menor sea su valor menor será la diferencia de tensión entre celdas y, por lo tanto, el equilibrado será más preciso.

El valor de Rsc viene dado por el valor de la frecuencia, la cual está fijada a 50 kHz, el valor de la capacidad del condensador equivalente Ceq, la cual es la mitad de la capacidad de los condensadores de equilibrado y por la suma de las resistencias parásitas de los elementos. Como se puede apreciar en la Figura 37, la suma de las resistencias parásitas debe reducirse lo máximo posible, ya que el valor mínimo de Rsc aumenta conforme aumenta el valor de las resistencias parásitas. Además, dentro de cada valor de resistencia el valor de la capacidad también hace variar el valor de Rsc, reduciendo su valor conforme aumenta la capacidad de Ceq hasta llegar a una asíntota horizontal, donde Rsc llega a su valor mínimo.



**Figura 37.** Relación entre el valor de la resistencia Rsc, la capacidad del condensador Ceq y la suma de las resistencias parásitas.

Dentro de las resistencias parásitas se encuentran la resistencia serie de la celda, las resistencias de conmutación de los interruptores y las resistencias serie de los condensadores de equilibrado. El valor de la resistencia serie de la celda viene dada por el fabricante y en este caso es de 13 mΩ. Para realizar la conmutación se utilizan transistores MOSFET, ya que están preparados para frecuencias de conmutación elevadas, tienen un tamaño reducido y las pérdidas por conmutación son muy reducidas. Los valores de las resistencias de conmutación de estos transistores se mueven alrededor de pocos miliohmios. Por su reducida resistencia –1 mΩ – y por su razonable precio – 0.42€– los transistores SIRA32-T1-RE3 son los seleccionados. La suma de la resistencia serie de la celda más las de dos transistores da una resistencia de 15 mΩ, a la que queda sumarle las resistencias de los dos condensadores de equilibrado utilizados. El valor mínimo de las resistencias de los condensadores es de entorno a 5 mΩ. Si se suman todas las resistencias parásitas el resultado final es de 25 mΩ. De acuerdo con la gráfica izquierda de la Figura 37, donde se traza el valor de la resistencia Rsc en función de la capacidad del condensador equivalente cuando la resistencia parásita total es de 25 mΩ, se puede apreciar que a partir de 400 μF el valor de Rsc se aproxima al mínimo. Elegir un condensador de capacidad mucho mayor no sería una buena opción ya que a mayor capacidad mayor peso y tamaño de condensador y el valor de Rsc no se vería disminuido prácticamente. Como resultado, el condensador RR50J321MDN1 de 820 μF y 5 mΩ es el seleccionado como condensador de equilibrado, dando una capacidad al condensador equivalente de 410 μF. Con esta elección la resistencia Rsc adquiere un valor de 0.1 Ω, lo que se traduce en un desequilibrio máximo de 0,1 V entre celdas para compensar la diferencia de capacidades entre las celdas en un proceso de descarga rápido, el cual es el caso más desfavorable y por lo tanto 0,1 V será el máximo desequilibrio que se producirá entre celdas. Para facilitar la comprensión de los resultados obtenidos los cálculos realizados se encuentran adjuntos en el tercer apartado del Anexo de Cálculos. A modo de resumen la Tabla 6 indica los componentes seleccionados y sus características.

**Tabla 6.** Características de los componentes seleccionados.

Componente	Capacidad	Resistencia	Precio
RR50J321MDN1 (condensador)	820 $\mu\text{F}$	5 $\text{m}\Omega$	0.31 €
SIRA32-T1-RE3 (transistor)	-	1 $\text{m}\Omega$	0.42 €

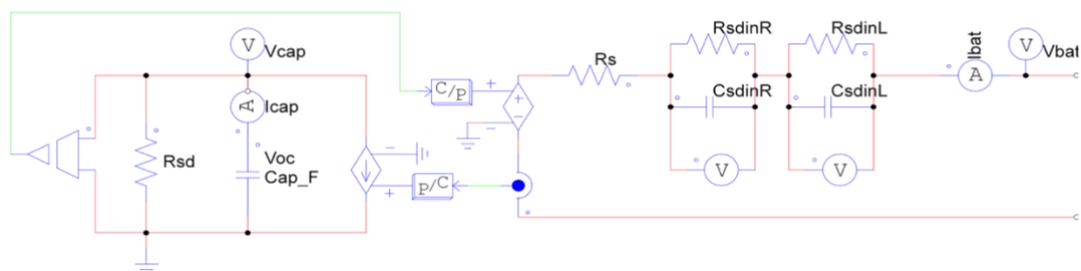
Para realizar el montaje del circuito entero se necesitan tantos condensadores como celdas y el doble de transistores que de celdas, por lo que el precio de los componentes es de 142.29 € por parte de los condensadores y 385.56 € por parte de los transistores, lo que supone un precio total de 527.85 €.

## 5. SIMULACIONES DE CARRERA

Este capítulo se reserva a realizar distintas simulaciones tanto con las celdas seleccionadas como con el circuito de equilibrado diseñado en situación de carrera –descarga rápida– y en situación de recarga rápida de la batería entre las diferentes pruebas de la competición. Como se explica más adelante, el montaje realizado es minucioso e intenta tener en cuenta todos los elementos para que los resultados obtenidos sean lo más fiables y realistas posibles.

Las simulaciones que se realizan en este capítulo y las que se han realizado en capítulos anteriores se han llevado a cabo mediante el software PSIM. Este programa se especializa en la electrónica de potencia, ofreciendo una gran variedad de diseños para realizar proyectos de una manera bastante sencilla. Uno de los campos en los que se especializa es en diseños de trenes de potencia de vehículos eléctricos –la batería y su control forman parte de este sistema–, por lo que es uno de los programas más adecuados para realizar las simulaciones previstas para el proyecto.

Este apartado sirve para corroborar si el sistema de equilibrado diseñado se adapta correctamente a las celdas seleccionadas y cumple con los requisitos de diseño o, por lo contrario, hay algún aspecto a mejorar. Es un paso imprescindible para acabar de comprender el funcionamiento del circuito y para poder aproximarse lo máximo posible a conocer su comportamiento real en la batería de la moto.



**Figura 38.** Modelo de batería utilizado en la simulación.

Para conseguir un comportamiento similar al que tendría en la realidad, uno de los elementos más importantes son las celdas. Para simular el comportamiento de las celdas se ha utilizado el modelo de batería que se presenta en la Figura 38. Como se puede apreciar, el modelo se compone de 2 partes. La parte de la izquierda representa el circuito equivalente que simula la capacidad de la batería, compuesto por el condensador encargado de almacenar la energía de la batería y la resistencia de autodescarga  $-R_{sd}$ . Por la otra parte, el de la derecha es el circuito equivalente que simula la respuesta transitoria de la batería, formado por la resistencia serie  $-R_s$  y los elementos que modelan el comportamiento transitorio rápido  $-R_{sdinR}$  y  $C_{sdinR}$  y los que modelan el comportamiento transitorio lento  $-R_{sdinL}$  y  $C_{sdinL}$ . Los valores de tensión inicial y la capacidad de la batería se introducirían en los parámetros  $V_{oc}$  y  $Cap\_F$  respectivamente, mientras que la tensión de las baterías se mide con el voltímetro  $V_{bat}$  colocado en los bornes de salida de la batería.

El montaje realizado para realizar estas simulaciones consta de 4 celdas en serie, las cuales tienen las mismas características que las celdas seleccionadas, el circuito de equilibrado y el circuito de control de los interruptores. La Figura 39 representa el montaje realizado en PSIM. En el montaje se agrupan las resistencias de conmutación y las resistencias serie de los condensadores de equilibrado para reducir el tamaño del circuito. Asimismo, en vez de utilizar MOSFET como elementos de conmutación se han utilizado interruptores a los cuales se le ha añadido la resistencia de conmutación de los transistores seleccionados. Por último, la capacidad de los condensadores de equilibrado es de  $820 \mu F$  tal y como los que se han elegido en el proceso de diseño.

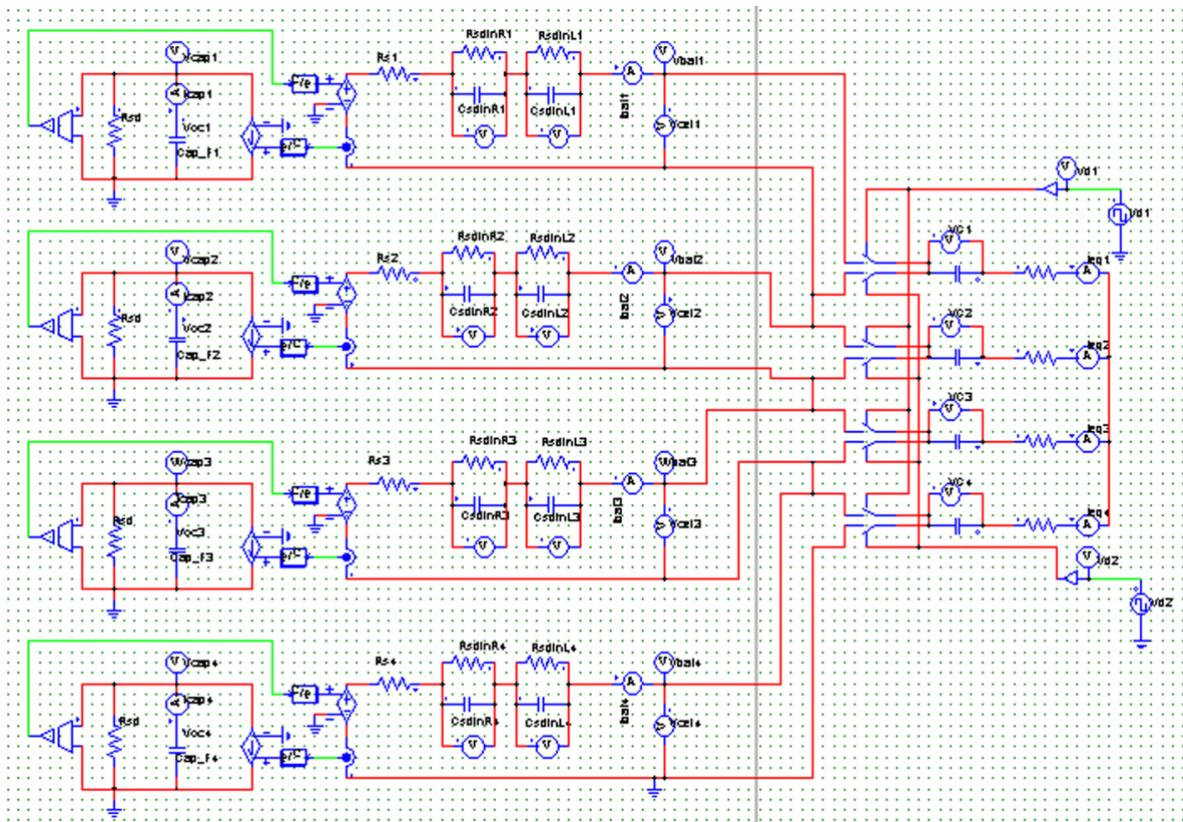


Figura 39. Montaje realizado en PSIM de la batería y el sistema de equilibrado.

Como se ha comentado anteriormente, el circuito de equilibrado funciona durante la carga y durante la descarga y está conectado en todo momento. Esto se traduce en que en el momento de comenzar la carga o la descarga las celdas parten de un estado equilibrado de tensiones. Partiendo de esta hipótesis, las simulaciones realizadas parten de un estado completamente equilibrado. Sin embargo, las celdas van a tender a desequilibrarse debido a la diferencia de capacidades entre ellas. Se simula un proceso de carga y un proceso de descarga con diferentes intensidades de carga/descarga y se compara con la misma carga/descarga en una batería sin circuito de equilibrado para que se pueda apreciar más claramente el funcionamiento del circuito de equilibrado diseñado. En la Tabla 7 se encuentran los datos de cada simulación.

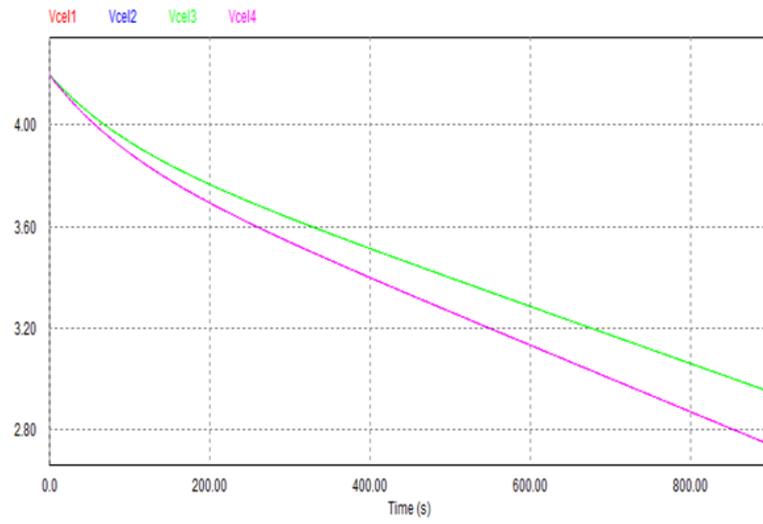
**Tabla 7.** Datos de las tensiones y capacidades de las celdas en las simulaciones de carga y descarga.

<b>Simulación</b>	<b>Celda 1</b>	<b>Celda 2</b>	<b>Celda 3</b>	<b>Celda 4</b>
Descarga (14/4 A)	4.2 V/3.5 Ah	4.2 V/3 Ah	4.2 V/3.5 Ah	4.2 V/3 Ah
Carga (4/1 A)	2.5 V/3.5 Ah	2.5 V/3 Ah	2.5 V/3.5 Ah	2.5 V/3 Ah

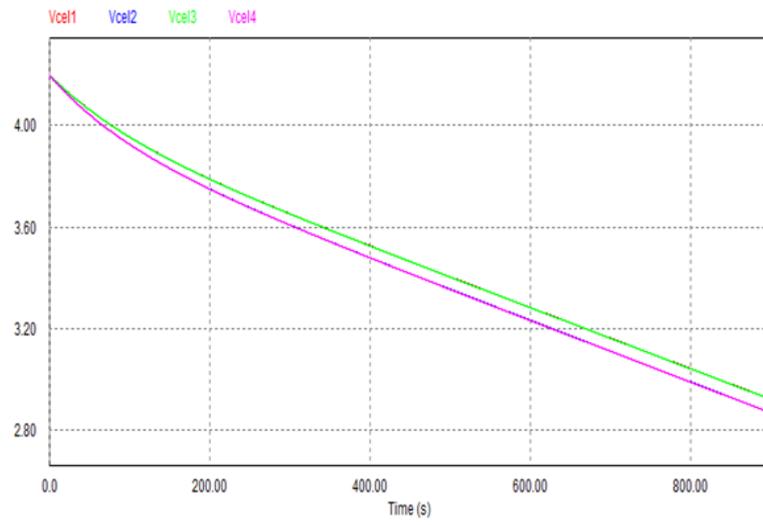
En el proceso de descarga se propone una descarga rápida a 14 A que imita el comportamiento en carrera y una descarga un poco más lenta a 4 A para poder comparar la diferencia de desequilibrio entre celdas que se produce al variar la velocidad de descarga. Además, se realiza la misma descarga rápida a 14 A de la misma batería sin sistema de equilibrado. En el proceso de carga las simulaciones realizadas son muy similares al del proceso de descarga pero con menor intensidad de entrada, ya que las celdas admiten una intensidad de carga mucho menor que de descarga. En estas simulaciones el proceso de carga rápido se realiza a 4 A y el lento a 1 A. La distribución de capacidades de las celdas se ha tomado así porque es la situación más desfavorable que ha sido determinada en el proceso de diseño. La capacidad media de las celdas de la batería es de 3.25 Ah mientras que la capacidad real de cada una es de 3 o 3.5 Ah por lo que el sistema de equilibrado va a tener que compensar 0.25 Ah por cada par de celdas.

En las siguientes figuras se incluyen las gráficas de los diferentes procesos de descarga –Figura 40– y de carga –Figura 41–, en las que se indica mediante una etiqueta el proceso realizado, incluyendo la intensidad de carga/descarga y si se ha realizado la simulación con sistema de equilibrado conectado a las celdas –CE– o, por el contrario, si se ha realizado sin sistema de equilibrado –SE–.

14 A – SE



14 A – CE



4 A – CE

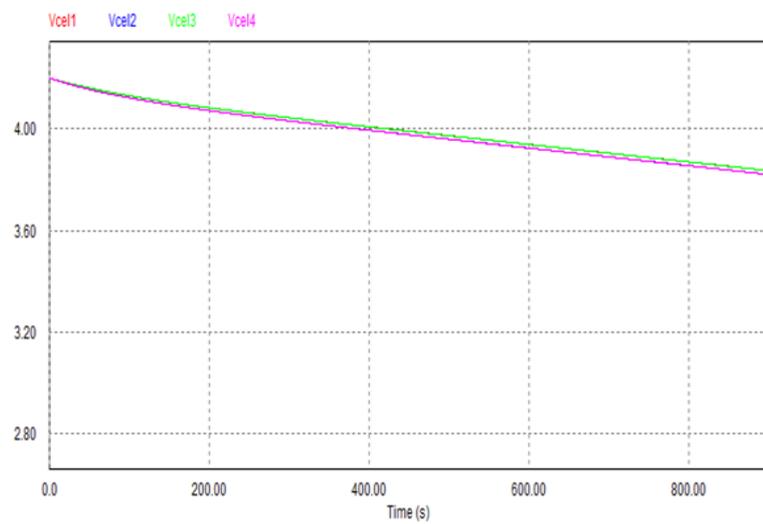
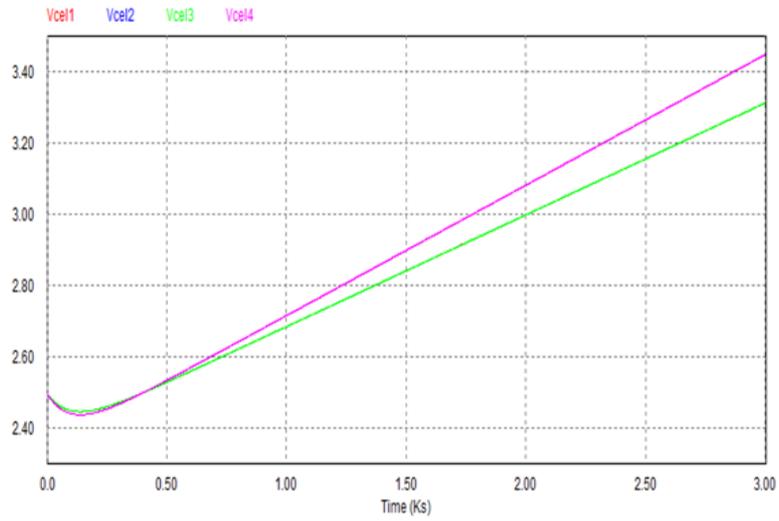
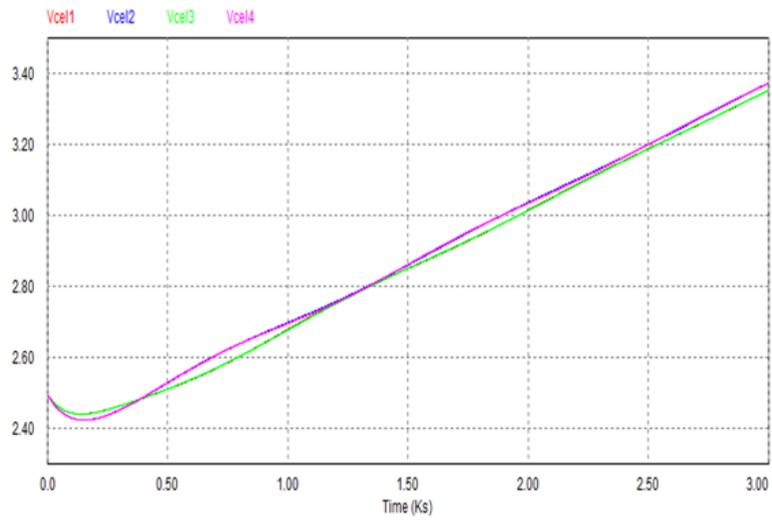


Figura 40. Comportamiento de la batería ante diferentes velocidades de descarga –14 A y 4 A– con sistema de equilibrado –CE– y sin sistema de equilibrado –SE–.

4 A – SE



4 A – CE



1 A – CE

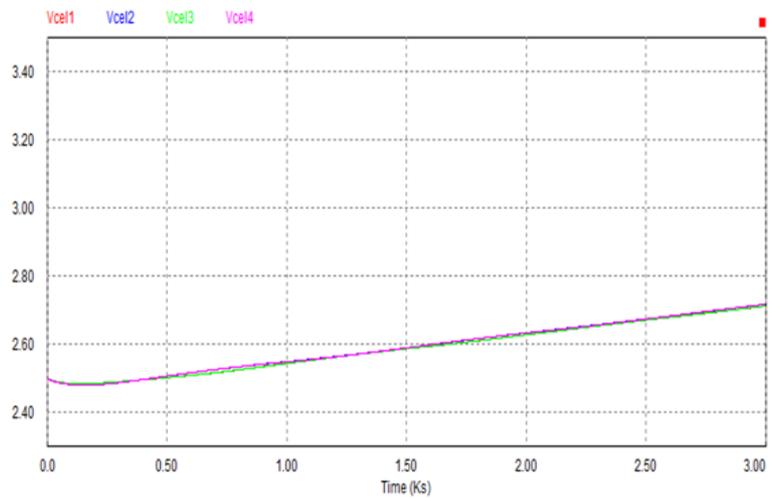


Figura 41. Comportamiento de la batería ante diferentes velocidades de carga –4 A y 1 A– con sistema de equilibrado –CE– y sin sistema de equilibrado –SE–.

La Figura 40 incluye los resultados de las simulaciones de la descarga de la batería en 15 minutos –900 segundos–. La primera gráfica muestra el desequilibrio al que tienden las celdas de la batería de manera natural al someterse a un proceso de descarga rápido, con celdas que poseen diferentes capacidades y sin sistema de equilibrado. En ella se aprecia cómo se descargan mucho antes las celdas 2 y 4 –quedan solapadas al igual que las celdas 1 y 3 por poseer entre ellas la misma capacidad–, produciéndose un desequilibrio importante conforme va pasando el tiempo. La siguiente gráfica refleja el comportamiento del mismo proceso de descarga con sistema de equilibrado. En ella se observa inicialmente que empiezan a divergir las tensiones de las celdas 2 y 4 de las celdas 1 y 3. La diferencia entre esta gráfica y la anterior es que en esta la divergencia, llegados a una diferencia de tensiones determinada, se mantiene constante a lo largo de toda la descarga. Al final de la descarga la diferencia de tensiones es de 0.05 V mientras que en la simulación sin sistema de equilibrado la diferencia de tensiones final es de 0.2 V. La última gráfica sirve para comparar el comportamiento del sistema de equilibrado con una diferente velocidad de descarga. En este caso la descarga se produce a 4 A y se ve claramente que la diferencia de tensiones se reduce proporcionalmente a la disminución de corriente. La diferencia de tensiones que se produce al final de la simulación es de 0.015 V. Esto se debe a que al descargarse más lentamente, la intensidad de equilibrado necesaria es menor y por lo tanto con una menor diferencia de tensiones se consigue la transferencia energética necesaria entre celdas.

Las simulaciones de los distintos procesos de carga se encuentran en la Figura 41. Análogamente a la figura que recopila la descarga, ésta contiene el proceso de carga rápida a 4 A sin equilibrado a la izquierda, carga rápida con equilibrado al medio y carga lenta a 1 A con equilibrado a la derecha. Los resultados obtenidos en los procesos de carga son muy similares a los comentados anteriormente y se pueden extraer las mismas conclusiones. Sin embargo, debido al modelo de batería utilizado, las celdas se descargan ligeramente al principio de la carga. En los procesos de carga con sistema de equilibrado, y especialmente en el proceso de carga rápida, se aprecia una respuesta subamortiguada de la tensión de las celdas que se estabiliza con el paso del tiempo. A parte de esto, el comportamiento obtenido es el buscado durante el proceso de diseño. El circuito de equilibrado corrige el desequilibrio al que tienden las celdas y, como se ha comentado con el proceso de descarga, cuanto más lento sea el proceso más precisión de equilibrado.

Como cierre de este capítulo se puede concluir que los resultados obtenidos son satisfactorios. El circuito de equilibrado diseñado cumple con los requisitos de diseño, consiguiendo equilibrar la diferencia de capacidad entre celdas tanto en la carga como en la descarga de una manera rápida y eficaz. Los buenos resultados de las simulaciones corroboran que todo el proceso de diseño y selección de componentes a lo largo del proyecto ha sido acertado y que se ha cumplido con los objetivos del trabajo de manera exitosa.

## 6. PRESUPUESTO

Después de realizar el proyecto, se puede realizar un desglose de los costes de cada actividad realizada en el que se ven reflejados las herramientas, los recursos materiales y los recursos humanos utilizado a lo largo del proyecto para su desarrollo.

### 6.1. Software

En este apartado se incluyen los programas utilizados durante la elaboración del trabajo. Utilizados en mayor medida en el proceso de diseño y de simulaciones.

SOFTWARE				
Descripción	Cantidad	Unidad	Precio (€/ud)	Importe (€)
Licencia anual PSIM	0.25	año	1000.00	250.00
Licencia anual paquete Office	0.25	año	69.00	17.25
<b>Total</b>				<b>267.25 €</b>

### 6.2. Materiales

En el apartado de materiales se incluyen todos los elementos seleccionados durante el proceso de diseño tanto de la batería como del BMS.

MATERIALES				
Descripción	Cantidad	Unidad	Precio (€/ud)	Importe (€)
Panasonic/Sanyo NCR2070C	459	unidad	7.00	3213.00
RR50J321MDN1 (condensador)	459	unidad	0.31	142.29
SIRA32-T1-RE3 (transistor)	918	unidad	0.42	385.56
Ordenador personal	1	unidad	700.00	700.00
Ordenador del laboratorio	1	unidad	300.00	300.00
<b>Total</b>				<b>4,740.85 €</b>

### 6.3. Mano de obra

En este apartado se recogen todos los recursos humanos que han sido necesarios para la realización del proyecto, incluyendo el trabajo tanto del alumno –Ingeniero Técnico Industrial– como de la ayuda del tutor –Ingeniero Superior Industrial–.

MANO DE OBRA				
Descripción	Cantidad	Unidad	Precio (€/ud)	Importe (€)
Ingeniero Técnico Industrial	300	hora	20.00	6000.00
Ingeniero Superior Industrial	30	hora	40.00	1200.00
<b>Total</b>				<b>7,200.00 €</b>

## 6.4. Coste total

Finalmente, después de desglosar todas las partidas, solo queda realizar el cómputo total de todos los costes y así determinar el presupuesto final del trabajo. Para ello se consideran unos costes indirectos del 12% y un beneficio industrial del 6%.

COSTE TOTAL	
Descripción	Importe
Software	267.25 €
Materiales	4,740.85 €
Mano de Obra	7,200.00 €
<b>Presupuesto de Ejecución Material</b>	<b>12,208.10 €</b>
Gastos Generales (12%)	1,464.97 €
Beneficio Industrial (6%)	732.49 €
<b>Presupuesto de Ejecución por Contrata</b>	<b>14,405.56 €</b>
IVA (21%)	3,025.17 €
<b>Presupuesto base de licitación</b>	<b>17,430.73 €</b>

Asciende el presupuesto a la expresada cantidad de:  
DIECISÉIS MIL CIEN EUROS CON CINCUENTA Y SIETE CÉNTIMOS

## 7. CONCLUSIONES

El diseño de una batería integral para un vehículo de competición eléctrico es un trabajo que requiere un amplio conocimiento de diversos campos de la ingeniería, con especial mención a la rama eléctrica y electrónica así como la química. Sin duda este proceso es de vital importancia en el comportamiento del prototipo en la pista y esto hace que su desarrollo tenga que ser minucioso y requiera tanto tiempo y dedicación.

La transición a la movilidad eléctrica ha creado la necesidad de encontrar métodos de almacenamiento de energía capaces de entregar las mismas o mejores prestaciones que los vehículos convencionales, las cuales las baterías existentes hasta finales del siglo XX no han podido satisfacer. La aparición de la batería de Ion-Litio supone un paso al frente debido a su mejora respecto a las baterías anteriores, ofreciendo mayor capacidad de almacenamiento de energía, menor peso y volumen, mayor rendimiento y una gran aptitud para aplicaciones de potencia elevada. Sin embargo, estas baterías pueden tener problemas de degradación e incluso inflamación o explosión al trabajar a temperaturas muy bajas o altas, o al producirse sobrecargas o descargas profundas. Para evitar la degradación prematura, las situaciones peligrosas y además mejorar la gestión de la energía se utilizan los sistemas de gestión de batería.

En este proyecto el objetivo principal es el de diseñar la batería integral de una moto de competición eléctrica. Para conseguir este objetivo el trabajo se divide en dos partes: realizar el diseño de la batería –selección de celdas y su dimensionado– y diseñar un sistema de equilibrado capaz de protegerla y que asegure una correcta gestión de la energía.

Para diseñar la batería ha sido necesario realizar un estudio en profundidad de las baterías de Ion-Litio. Como se ha visto, hay muchos tipos de baterías de Ion-Litio según los materiales de los electrodos, así como del electrolito. Las prestaciones de éstas dependen de los materiales utilizados y gracias a ello las baterías de Ion-Litio son muy versátiles para una gran variedad de aplicaciones. Sin embargo, la implementación de estas baterías en vehículos eléctricos todavía no mejora las prestaciones que ofrecen los vehículos convencionales. El mayor problema radica en aumentar la densidad energética para poder aumentar la autonomía. La introducción del ánodo de metal de litio y el paso a los electrolitos sólidos son las vías de desarrollo principales y que prometen una mejora sustancial de la densidad energética. No obstante, después del estudio realizado, se demuestra que actualmente la tecnología de las baterías de estado sólido y el uso del famoso ánodo todavía no se encuentran lo suficiente desarrollados como para suponer una mejora a las baterías convencionales de Ion-Litio.

Las características principales de la batería para la moto son elevada densidad energética y elevada densidad de potencia ya que en una competición la reducción de espacio y de peso son lo más importante para marcar la diferencia con el resto de los participantes. Después de realizar el análisis teórico y posteriormente buscar baterías se confirma que las baterías NMC, NCA y Li-Po poseen unas características de densidad energética y de potencia que destacan sobre el resto de las celdas.

La batería diseñada se ha dimensionado a partir de celdas NCA pesa 30,29 kg, tiene un volumen de 10.19 L y tiene un precio de 3213€ teniendo únicamente en cuenta las celdas elegidas, sin incluir el contenedor, elementos de protección, el BMS etc. Esto refleja la disparidad que aún hay con respecto una moto de motor de combustión, donde el tanque de combustible, que es el elemento equivalente a la batería, suponiendo un volumen igual, pesaría mucho menos y el precio sería mucho menor.

Para proteger la batería y optimizar su rendimiento se ha visto la importancia de los sistemas de gestión de baterías, ya que en todo momento asegura un funcionamiento seguro de la batería, consiguiendo una degradación mucho más lenta y evitando situaciones peligrosas. Además, gracias a la estimación del SoC, SoH y SoF se puede predecir el comportamiento de la batería en cada momento. Aunque estas funciones sean de vital importancia, la función más importante para nuestro proyecto es el equilibrado de celdas, puesto que se encarga de exprimir al máximo el rendimiento de la batería. Esto lo consigue manteniendo a todas las celdas al mismo nivel de carga y, como se ha visto a lo largo del trabajo, hay una gran variedad de métodos.

Los métodos pasivos son mayormente utilizados en aplicaciones de baja potencia ya que su principio de funcionamiento es disipar la energía sobrante de las celdas con mayor carga y sería insostenible en aplicaciones de más potencia. Por otra parte, los métodos activos transfieren energía entre las celdas más cargadas y las menos cargadas, por lo que la mayor parte de la energía transferida es útil. Dentro de los métodos activos han destacado los basados en condensadores por tres motivos: simplicidad de implementación y control, alta eficiencia energética y tamaño reducido.

Después de analizar los 3 circuitos preseleccionados y con ayuda de la simulación del comportamiento de cada circuito bajo distintas condiciones el método que mejores prestaciones ofrece es el de condensadores conmutados optimizados por su velocidad y consistencia en el equilibrado. Por último, el diseño de dicho circuito tiene como misión adaptarse por completo a las características de la batería y a los procesos de carga y descarga que va a sufrir. Tras el proceso de diseño las simulaciones realizadas culminan el trabajo realizado corroborando el buen funcionamiento del circuito de equilibrado sobre la batería.

Finalmente, tras la investigación realizada, ha quedado claro que las baterías eléctricas siguen siendo una limitación para los vehículos eléctricos por la falta de autonomía, su vida útil, el tiempo de recarga... Actualmente se encuentran en vías de desarrollo soluciones muy prometedoras como son las baterías de estado sólido con la incorporación del ánodo de Litio metálico que pueden suponer una mejora en la autonomía muy significativa. Estas mejoras junto con sistemas de gestión de baterías más eficientes que se encarguen de prolongar la vida de las baterías y optimicen el uso de la energía de éstas pueden ser los encargados del éxito del vehículo eléctrico. La única manera de conseguirlo lo antes posible es realizando una fuerte inversión en investigación e ir acercándose al objetivo final poco a poco. Al tratarse de un trabajo a medio/largo plazo, muchas cosas pueden cambiar, dejando muchas incógnitas: ¿Serán las baterías de Ion-Litio las encargadas de alimentar a los vehículos eléctricos del futuro o será otra tecnología distinta?, ¿Serán baterías eléctricas o serán otros métodos de almacenamiento de energía como las celdas de combustible las encargadas de alimentar los motores eléctricos.

## 8. TRABAJOS FUTUROS

Una vez finalizado el proyecto, quedan varias líneas de trabajo posibles que se escapan del alcance de este trabajo por extensión y por falta de conocimientos principalmente. Entre ellas se encuentran:

- Diseñar el sistema de conexión de las celdas.
- Diseñar las protecciones de la batería
- Diseñar el contenedor de la batería
- Profundizar en todas las funciones del BMS y, en especial, en la estimación de parámetros –SoC, SoH y SoF– y de los mecanismos de monitorización y control.
- Implementar el circuito de equilibrado desarrollado en el trabajo.
- Realizar el diseño del BMS completo.
- Realizar un modelo real de la batería con el BMS.

Son objetivos bastante ambiciosos que, debido a la satisfactoria experiencia que ha sido realizar este trabajo pueden lograrse en el Trabajo de Fin de Máster con una buena planificación y puede resultar un proyecto muy interesante.

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, A. B., Ooi, C. A., Ishak, D., Teh, J. (2019). Cell Balancing Topologies in Battery Energy Storage Systems: A Review. *10th International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications*, 159-165. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-6447-1\\_20](https://doi.org/10.1007/978-981-13-6447-1_20)
- Albarrán-Zavala, E. (2008). El potencial redox y la espontaneidad de las reacciones electroquímicas. *Latin-American Journal of Physics Education*, 2(3), 336-345. [http://www.lajpe.org/index\\_sep08.html](http://www.lajpe.org/index_sep08.html)
- Achsan, B. M. (2020, 13 abril). *Remaining Useful Life: Predictive Maintenance - IT Paragon*. Medium. Recuperado 25 de mayo de 2020, de <https://medium.com/it-paragon/remaining-useful-life-predictive-maintenance-5b78a17f7d10>
- Budde-Meiwes, H., Drillkens, J., Lunz, B., Muennix, J., Rothgang, S., Kowal, J., y Sauer, D. U. (2013). A review of current automotive battery technology and future prospects. *Journal of Automobile Engineering*, 227(5), 761–776. doi:10.1177/0954407013485567
- Cadar, D. V., Petreus, D. M., Patarau, T. M. (2010). An energy converter method for battery cell balancing. *33rd International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2010*, 290-293. <https://doi.org/10.1109/isse.2010.5547305>
- Cell Balancing and Battery Equalisation. (s. f.). Recuperado 27 de mayo de 2020, de <https://www.mpoweruk.com/balancing.htm>
- Daowd, M., Antoine, M., Omar, N., van den Bossche, P., & van Mierlo, J. (2013). Single Switched Capacitor Battery Balancing System Enhancements. *Energies*, 6(4), 2149-2174. <https://doi.org/10.3390/en6042149>
- Daowd, M., Omar, N., Van Den Bossche, P., & Van Mierlo, J. (2011). Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation. *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/vppc.2011.6043010>

Gao, Z., Sun, H., Fu, L., Ye, F., Zhang, Y., Luo, W., & Huang, Y. (2018). Promises, Challenges, and Recent Progress of Inorganic Solid-State Electrolytes for All-Solid-State Lithium Batteries. *Advanced Materials*, 30(17), 1705702. doi:10.1002/adma.201705702

Hannan, M. A., Hoque, MD. M, Hussain, A., Yusof, Y., Ker, P. J. (2018). State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations. *IEEE Access*, 6, 19362-19378. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2817655.

Hoque, M. M., Hannan, M. A., Mohamed, A., & Ayob, A. (2017). Battery charge equalization controller in electric vehicle applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1363-1385. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.126>

Is Li-ion the Solution for the Electric Vehicle? – Battery University. (s. f.). Recuperado 23 de mayo de 2020, de [https://batteryuniversity.com/learn/archive/is\\_li\\_ion\\_the\\_solution\\_for\\_the\\_electric\\_vehicle](https://batteryuniversity.com/learn/archive/is_li_ion_the_solution_for_the_electric_vehicle)

Lin, Q., Wang, J., Xiong, R., Shen, W., & He, H. (2019). Towards a smarter battery management system: A critical review on optimal charging methods of lithium ion batteries. *Energy*, 183, 220-234. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.128>

Linzen, D., Buller, S., Karden, E., & DeDoncker, R. W. (2005). Analysis and Evaluation of Charge-Balancing Circuits on Performance, Reliability, and Lifetime of Supercapacitor Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(5), 1135-1141. <https://doi.org/10.1109/tia.2005.853375>

Maeshima, H., Fisher, C., Kuwabara, A., Moriwake, H. (2010). Electrochemical Potential Windows of Supercapacitor Electrolytes from First-Principles Calculations. *ATMC5*, 2, 198-199. [http://amtc5.com/amtc\\_letters2.html](http://amtc5.com/amtc_letters2.html)

Miao, Y., Hynan, P., von Jouanne, A., Yokochi, A. (2019). Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advances. *Energies*, 12(6), 1074. doi:10.3390/en12061074

MotoStudent. (2019). *Reglamento de la competición*. Recuperado de <http://www.motostudent.com/rules.html>

- Plett, G. (2013). Cell Balancing. *Universidad de Colorado*, 1-24. Recuperado de <http://mocha-java.uccs.edu/ECE5720/ECE5720-Notes05.pdf>
- Rezvanizani, S. M., Liu, Z., Chen, Y., y Lee, J. (2014). Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility. *Journal of Power Sources*, 256, 110-124. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.085>
- Rodríguez, A., González-González, J.M., Aguado, J.A. (2017). Sizing Electric Battery Storage for Electric Racing Motorcycle. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(15), 383-387. <https://doi.org/10.24084/repqj15.328>
- Song, S., Xiao, F., Peng, S., Song, C., & Shao, Y. (2018). A High-Efficiency Bidirectional Active Balance for Electric Vehicle Battery Packs Based on Model Predictive Control. *Energies*, 11(11), 1-24. <https://doi.org/10.3390/en11113220>
- Tarascon, J. M., Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414, 359-367. <https://doi.org/10.1038/35104644>
- Types of Lithium-ion Batteries – Battery University. (2019). Recuperado 12 de mayo de 2020, de [https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types_of_lithium_ion)
- Ulvestad, A. (2018). A Brief Review of Current Lithium Ion Battery Technology and Potential Solid State Battery Technologies. *arXiv.org: Applied Physics*. doi:1803.04317
- Valdivia Miranda, C. (2018). *Diseño de un BMS para baterías de tecnología Li-ion* (Trabajo de Fin de Máster). Universitat Oberta de Catalunya, Barcelona, España.
- Wang, Y., Yin, H., Han, S., Alsabbagh, A., & Ma, C. (2017). A novel switched capacitor circuit for battery cell balancing speed improvement. *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 1977-1982. <https://doi.org/10.1109/isie.2017.8001556>
- Ye, Y., Cheng, K. W. E., Fong, Y. C., Xue, X., & Lin, J. (2017). Topology, Modeling, and Design of Switched-Capacitor-Based Cell Balancing Systems and Their Balancing Exploration. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(6), 4444-4454. <https://doi.org/10.1109/tpel.2016.2584925>

# ANEXO DE CÁLCULOS

## A.1. Elección de celdas

De todas las celdas encontradas se destacan 4, cuyos datos del fabricante se encuentran en la siguiente tabla.

	Panasonic/Sanyo NCR2070C	LG INR18650 HG2	Samsung INR18650-25S	PL-9759156- 10C
<b>Tensión nominal (<math>U_0</math>)</b>	3.6 V	3.6 V	3.6 V	3.7 V
<b>Capacidad nominal (<math>C_0</math>)</b>	3.5 Ah	3.0 Ah	2.5 Ah	10.0 Ah
<b>Corriente máxima de descarga (<math>I_d</math>)</b>	30 A	20 A	25 A	100 A
<b>Corriente máxima de carga (<math>I_c</math>)</b>	4 A	4 A	4 A	10 A
<b>Voltaje máximo (<math>U_{max}</math>)</b>	4.2 V	4.2 V	4.2 V	4.2 V
<b>Voltaje mínimo (<math>U_{min}</math>)</b>	2.5 V	2.5 V	2.5 V	2.75 V
<b>Dimensiones (mm)</b>	70.0(L)x20.1(D)	65.2(L)x18.50(D)	65.0(L)x18.43(D)	160x61x10.5
<b>Peso (<math>m_c</math>)</b>	66 g	48 g	47 g	210 g
<b>Precio (<math>P_c</math>)</b>	7 €	4.50 €	7 €	45.50 €

Para el diseño de la batería se ha establecido la tensión nominal de la batería en 96 V debido a las características del motor, dato que se utilizará para obtener el valor de número de celdas en serie mediante la ecuación 7. Por otra parte, el número de celdas en paralelo se decidirá comparando el valor que se obtenga de calcular la cantidad de celdas en serie para satisfacer las necesidades de energía almacenada –5,5 kWh– por una parte, y por otra parte, la potencia capaz de suministrar como mínimo –34 kW– mediante las ecuaciones 8 y 9 respectivamente, cogiendo el valor mayor de ambos resultados. Una vez diseñada se calcula las dimensiones, el peso y el precio de cada batería.

### A.1.1. Diseño de batería para la celda Panasonic/Sanyo NCR2070C

$$U_{batería} = N_s * U_0 \longrightarrow N_s = \frac{96}{3.6} = 26.67 = 27$$

$$E_{batería} = N_s * N_p * C_0 * U_0 \longrightarrow N_p = \frac{5500}{27 * 3.5 * 3.6} = 16.17 = 17$$

$$P_{min} = N_s * U_{min} * N_p * I_d \longrightarrow N_p = \frac{34000}{27 * 2.5 * 30} = 16.79 = 17$$

Después de realizar los cálculos se obtiene que la batería tendrá 27 celdas en serie y 17 celdas en paralelo para conseguir las características mínimas requeridas. Ahora se calcula el peso, la dimensión y el precio de la batería.

$$\text{Peso (kg)} = N_s * N_p * m_c = 27 * 17 * 0.066 = 30.29 \text{ kg}$$

$$\text{Volumen (l)} = N_s * N_p * V_c = 27 * 17 * 0.7 * \frac{\pi * 0.201^2}{4} = 10.19 \text{ l}$$

$$\text{Precio (€)} = N_s * N_p * P_c = 27 * 17 * 7 = 3213 \text{ €}$$

### A.1.2. Diseño de batería para la celda LG INR18650 HG2

$$U_{batería} = N_s * U_0 \longrightarrow N_s = \frac{96}{3.6} = 26.67 = 27$$

$$E_{batería} = N_s * N_p * C_0 * U_0 \longrightarrow N_p = \frac{5500}{27 * 3.0 * 3.6} = 18.86 = 19$$

$$P_{min} = N_s * U_{min} * N_p * I_d \longrightarrow N_p = \frac{34000}{27 * 2.5 * 20} = 25.18 = 26$$

Después de realizar los cálculos se obtiene que la batería tendrá 27 celdas en serie y 26 celdas en paralelo para conseguir las características mínimas requeridas. Ahora se calcula el peso, la dimensión y el precio de la batería.

$$\text{Peso (kg)} = N_s * N_p * m_c = 27 * 26 * 0.048 = 33.69 \text{ kg}$$

$$\text{Volumen (l)} = N_s * N_p * V_c = 27 * 26 * 0.652 * \frac{\pi * 0.185^2}{4} = 12.30 \text{ l}$$

$$\text{Precio (€)} = N_s * N_p * P_c = 27 * 25 * 4.5 = 3037.5 \text{ €}$$

### A.1.3. Diseño de batería para la celda Samsung INR18650-25S

$$U_{\text{batería}} = N_s * U_0 \longrightarrow N_s = \frac{96}{3.6} = 26.67 = 27$$

$$E_{\text{batería}} = N_s * N_p * C_0 * U_0 \longrightarrow N_p = \frac{5500}{27 * 2.5 * 3.6} = 22.63 = 23$$

$$P_{\text{min}} = N_s * U_{\text{min}} * N_p * I_d \longrightarrow N_p = \frac{34000}{27 * 2.5 * 25} = 20.15 = 21$$

Después de realizar los cálculos se obtiene que la batería tendrá 27 celdas en serie y 23 celdas en paralelo para conseguir las características mínimas requeridas. Ahora se calcula el peso, la dimensión y el precio de la batería.

$$\text{Peso (kg)} = N_s * N_p * m_c = 27 * 23 * 0.047 = 29.187 \text{ kg}$$

$$\text{Volumen (l)} = N_s * N_p * V_c = 27 * 23 * 0.65 * \frac{\pi * 0.1843^2}{4} = 10.77 \text{ l}$$

$$\text{Precio (€)} = N_s * N_p * P_c = 27 * 23 * 7 = 4347 \text{ €}$$

### A.1.4. Diseño de batería para la celda PL-9759156-10C

$$U_{\text{batería}} = N_s * U_0 \longrightarrow N_s = \frac{96}{3.7} = 25.94 = 26$$

$$E_{\text{batería}} = N_s * N_p * C_0 * U_0 \longrightarrow N_p = \frac{5500}{26 * 10 * 3.7} = 5.72 = 6$$

$$P_{min} = N_s * U_{min} * N_p * I_d \longrightarrow N_p = \frac{34000}{26 * 2.75 * 100} = 4.75 = 5$$

Después de realizar los cálculos se obtiene que la batería tendrá 26 celdas en serie y 6 celdas en paralelo para conseguir las características mínimas requeridas. Ahora se calcula el peso, la dimensión y el precio de la batería.

$$Peso (kg) = N_s * N_p * m_c = 26 * 6 * 0.21 = 32.76 kg$$

$$Volumen (l) = N_s * N_p * V_c = 26 * 6 * 1.6 * 0.61 * 0.105 = 15.99 l$$

$$Precio (€) = N_s * N_p * P_c = 26 * 6 * 45.5 = 7098 €$$

## A.2. Comprobaciones específicas de la batería seleccionada

Una vez seleccionada la celda con la cual se va a diseñar la batería, es conveniente hacer unas comprobaciones extra. Por una parte, la batería tiene que cumplir que la tensión máxima sea menor que el límite proporcionado por la competición. Por otra parte, en caso de optar por integrar un sistema de frenado regenerativo la batería tiene que ser capaz de almacenar la energía generada al frenar. Las celdas están preparadas para poder tener una descarga de energía mucho mayor que la carga, por ello hay que comprobar si serían capaz de absorber toda la energía ya que en el proceso de frenado se puede producir mucha energía en muy poco tiempo, lo que equivale a corrientes elevadas.

### A.2.1. Comprobación de limitación de tensión

Según la normativa de MotoStudent la tensión de la batería está limitada. Esta tensión máxima es de 126 V de corriente continua según el artículo 1 del apartado D del documento de regulaciones de la edición 2019/2020.

$$U_{bat.max} = N_s * U_{max} \longrightarrow U_{max} = 27 * 4.2 = 113.4 V$$

La tensión máxima de la batería diseñada es de 113.4 V, por lo que entra dentro de los límites de la competición.

### A.2.1. Capacidad de implementación de frenado regenerativo

Para realizar esta comprobación se han utilizado los datos de la prueba de frenado de la edición de 2018 de MotoStudent electric ya que es en esta prueba donde se registra el mayor frenado que va a realizar la moto. La moto que realizó el mayor frenado recorrió 46.1 m para detener una moto a 101.58 km/h. Si se supone una deceleración constante se calcula el tiempo de frenado como:

$$v^2 - v_0^2 = 2 * a * \Delta x \longrightarrow 0 - \left(\frac{101.58}{3.6}\right)^2 = 2 * a * 46.1 \longrightarrow a = -\frac{\left(\frac{101.58}{3.6}\right)^2}{2 * 46.1} = -8.63 \text{ m/s}^2$$

$$v = v_0 + a * t \longrightarrow 0 = \left(\frac{101.58}{3.6}\right) + (-8.63) * t \longrightarrow t = \frac{-\left(\frac{101.58}{3.6}\right)}{(-8.63)} = 3.27 \text{ s}$$

Por otra parte para calcular la energía recuperada del proceso de frenado se va a hacer un balance energético con la energía cinética. Para poder realizarlo se suponen un peso de la moto con el piloto de 175kg, un reparto de frenada de 60/40 –delantera/trasera– y un rendimiento de la frenada regenerativa del 70%, lo que implica que sólo un 70% de la energía que absorbida se almacena en la batería.

$$E_{frenado} = -\Delta E_c = \frac{1}{2} * m * v_0^2 - \frac{1}{2} * m * v_f^2 = \frac{1}{2} * 175 * \left(\frac{101.58}{3.6}\right)^2 = 69665.77 \text{ J}$$

$$E_{frenada \text{ regenerativa } \acute{u}til} = 0.4 * 0.7 * E_{frenado} = 19506.41 \text{ J}$$

$$P_{frenada \text{ regenerativa } \acute{u}til} = \frac{E_{frenada \text{ regenerativa } \acute{u}til}}{t} = \frac{19506.41}{3.27} = 5965.26 \text{ W}$$

$$P_{\text{max carga } \text{batería}} = Ns * U_0 * Np * I_c = 27 * 3.6 * 17 * 4 = 6609.6 \text{ W}$$

La batería diseñada muestra ser capaz de absorber la energía de frenado bajo las suposiciones consideradas y con los datos de MotoStudent 2018 ya que la potencia de carga capaz de soportar  $-P_{\text{max carga } \text{batería}}$  es mayor que la potencia entregada por el generador  $-P_{frenada \text{ regenerativa } \acute{u}til}$ .

### A.3. Diseño del circuito de equilibrado

El criterio de diseño del circuito de equilibrado es reducir al máximo la diferencia de tensiones producidas entre dos celdas, las cuales poseen una diferencia de capacidad máxima supuesta de 0.5 Ah –3,5Ah y 3Ah–, durante un proceso de descarga rápida que simula la descarga producida en la carrera partiendo de un estado equilibrado de carga.

La duración aproximada de la carrera es de 15 minutos según el tiempo realizado por los equipos en las ediciones anteriores. Esto significa que durante los 15 minutos que dura la carrera el circuito de equilibrado debe transferir la energía necesaria entre celdas para que ambas finalmente aporten la misma energía. Para ello la intensidad que debe trasegar el circuito de equilibrado se puede calcular según la Ecuación 13 como:

$$I = \frac{C}{t} = \frac{0.25 \text{ Ah}}{0.25 \text{ h}} = 1 \text{ A}$$

El objetivo es disminuir tanto como sea posible la diferencia de tensión entre celdas de tal manera que ambas celdas hayan proporcionado la misma energía al final de la carrera y la diferencia de tensiones final entre ellas sea tan pequeña como sea posible para poder considerar las celdas equilibradas. Para poder relacionar la intensidad de equilibrado con la diferencia de tensiones entre celdas se utiliza la Ecuación 14, la cual es simplemente la Ley de Ohm, teniendo en cuenta que el valor de la resistencia introducido es  $R_{sc}$ , la resistencia obtenida a partir de los modelos de comportamiento comentados en la memoria.

$$I = \frac{\Delta V}{R_{sc}} \longrightarrow 1 \text{ A} = \frac{\Delta V}{R_{sc}} \longrightarrow R_{sc} = \Delta V$$

La diferencia de tensiones entre celdas es directamente proporcional y tiene el mismo valor que la resistencia  $R_{sc}$ , lo que significa que cuanto menor sea la resistencia menor será la diferencia de tensiones producida entre celdas. El valor de dicha resistencia viene dado por la Ecuación 10 y su valor depende de la capacidad de el condensador equivalente  $C_{eq}$ , la frecuencia de conmutación y la suma de las resistencias parásitas –la resistencia interna de la celda  $R_b$ , las resistencias de conmutación de los transistores  $R_{dson}$  y las resistencias de los condensadores de equilibrado  $R_{esr}$ –. Según el fabricante de las celdas seleccionadas la resistencia interna de las celdas es de 13 mΩ. Tras la búsqueda realizada las resistencias de conmutación se fijan en 1 mΩ y las de los condensadores en 5 mΩ tal y como se explica en el apartado del diseño del circuito. La frecuencia se fija en 50 kHz y queda fijar el valor de la capacidad del condensador equivalente  $C_{eq}$ .

$$R_{sc} = \frac{1 + e^{-\frac{1}{2 \cdot 0.025 \cdot C_{eq} \cdot 50000}}}{C_{eq} \cdot 50000 \left( 1 - e^{-\frac{1}{2 \cdot 0.025 \cdot C_{eq} \cdot 50000}} \right)}$$

Con el resto de las variables fijadas, el valor de la resistencia depende del valor de la capacidad del condensador  $C_{eq}$ , cuyo valor es el de la mitad de cada condensador de equilibrado. Cuando el valor de la capacidad es muy pequeño el valor de la resistencia es muy elevado y conforme la capacidad aumenta la resistencia disminuye. Sin embargo, tal y como se muestra en la Figura 32 la pendiente de la curva de la resistencia va

disminuyendo conforme el valor de la capacidad aumenta, llegando a estabilizarse a partir de cierto valor. Esto supone que pasado dicho valor de capacidad lo único que se hace es aumentar el tamaño y el peso de los condensadores –ya que a mayor capacidad mayor tamaño y peso– sin conseguir una disminución de la resistencia. En este caso dicho valor se consigue alrededor de 400  $\mu\text{F}$ , seleccionando finalmente un condensador de 820  $\mu\text{F}$  de capacidad, consiguiendo un valor  $C_{eq}$  de 410  $\mu\text{F}$  –el valor de  $C_{eq}$  es la mitad de  $C_{eqi}$  por tener dos condensadores de equilibrado en serie del mismo valor–, un valor muy cercano al límite comentado y que cumple con los requisitos supuestos anteriormente de 5  $\text{m}\Omega$  de resistencia  $R_{sr}$ . El valor de la resistencia es:

$$R_{SC} = \frac{1 + e^{-\frac{1}{2 \cdot 0.025 \cdot 410 \cdot 10^{-6} \cdot 50000}}}{410 \cdot 10^{-6} \cdot 50000 \left( 1 - e^{-\frac{1}{2 \cdot 0.025 \cdot 410 \cdot 10^{-6} \cdot 50000}} \right)} = 0.107 \Omega$$

Con la relación entre la resistencia y la diferencia de tensiones vista anteriormente se puede determinar que la máxima diferencia de tensiones que se obtendrá será de 0.107 V para conseguir compensar las diferencias de capacidad entre celdas durante la carrera y aún así finalizar la carrera con las celdas en un estado equilibrado de carga. Este caso se supone que es el peor y por lo tanto el valor de dicha diferencia de tensiones nunca será superior a dicho valor.