



Estudio del sistema de supervisión y balanceado para baterías híbridas con celdas Li-Ión de Alta Potencia y Alta Energía

Documento:

Memoria

Autor:

Adrià González Pérez

Director:

Luís Romeral Martínez

Titulación:

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Convocatoria:

Otoño, 2022

TRABAJO FIN DE ESTUDIOS



Resumen

La temática del presente estudio se basa en el desarrollo e implementación en laboratorio del sistema de supervisión y balanceado para celdas Li-Ión de Alta Potencia y Alta Energía.

En la actualidad los vehículos eléctricos toman cada vez más protagonismo y es necesario desarrollar baterías que sean capaces de satisfacer las necesidades de movilidad actuales. Por esta razón, el trabajo realizado se centra en el desarrollo del monitoreo y supervisión de tensiones de celda y temperatura de un pack de baterías de diferentes tecnologías, como las mencionadas anteriormente. Esta nueva configuración de batería con diferentes tecnologías de celdas en su interior recibe el nombre de batería híbrida.

Para el caso de estudio se utilizarán celdas de Alta Energía y Alta Potencia. La celdas de Alta Energía aumenta el contenido global de energía de la batería y aumenta la autonomía. Por el contrario, las celdas de alta potencia, sirven para mejorar la capacidad de potencia y la aceleración. Estas celdas presentan diferentes rangos de tensiones de trabajo entre otros parámetros, por lo cual el sistema de supervisión y balanceado debe ser capaz de poder operar en un amplio rango de tensiones y corrientes.

El desarrollo y optimización de baterías de alta tensión, potencia y capacidad energética es una necesidad emergente en el continente europeo. Como ejemplo, se cita el proyecto HELIOS (<https://cordis.europa.eu/project/id/963646/es>), en el que colabora actualmente la UPC, orientado al desarrollo de un nuevo concepto de baterías modulares, escalables e inteligentes combinando celdas de alta potencia con celdas de alta energía.

Abstract

The subject of this study is based on the development and implementation in the laboratory of the monitoring and balancing system for High Power and High Energy Li-Ion cells.

Currently, electric vehicles are becoming increasingly important and it is necessary to develop batteries that are capable of satisfying current mobility needs. For this reason, the work carried out focuses on the development of monitoring and supervision of cell voltages and temperature of a battery pack of different technologies, such as those mentioned above. This new battery configuration with different cell technologies inside is called a hybrid battery.

For the case study, High Energy and High Power cells will be used. The High Energy cells increase the overall energy content of the battery and increase autonomy. On the other hand, high power cells serve to improve power capacity and acceleration. These cells present different ranges of working voltages, among other parameters, for which the monitoring and balancing system must be able to operate in a wide range of voltages and currents.

The development and optimization of high voltage batteries, power and energy capacity is an emerging need on the European continent. As an example, the HELIOS project is cited (<https://cordis.europa.eu/project/id/963646/es>), in which the UPC is currently collaborating, aimed at the development of a new concept of modular, scalable and intelligent batteries combining high power cells with high energy cells.



Sumario

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
SUMARIO	III
ÍNDICE DE TABLAS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	V
LISTA DE ABREVIATURAS/GLOSARIO	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 MOTIVACIÓN, CONTEXTUALIZACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	1
1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO.....	3
1.3 METODOLOGÍA.....	3
2 ESTADO DEL ARTE	4
2.1 INTRODUCCIÓN A LAS CELDAS ELECTROQUÍMICAS	4
2.2 BATERÍAS DE LITIO	5
2.3 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE CELDAS	8
2.4 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE GESTIÓN DE BATERÍAS	11
2.4.1 FUNCIONES PRINCIPALES DE UN BMS	11
2.4.2 TOPOLOGÍAS.....	17
2.4.3 MÉTODOS DE BALANCEADO DE CELDAS.....	19
2.4.4 COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS.....	26
2.5 OPCIONES COMERCIALES DISPONIBLES DE BMS.....	26
2.5.1 CIRCUITOS COMERCIALES DE BALANCEADO PASIVO	27
2.5.2 CIRCUITOS COMERCIALES DE BALANCEADO ACTIVO	29
2.6 DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE USO DE UNA BATERÍA.....	31
3 DISEÑO DE LA BATERÍA Y BMS	33
3.1 DISEÑO E HIBRIDACIÓN DE LA BATERÍA.....	33
3.2 REQUERIMIENTOS DEL PROCESO DE BALANCEADO	36
3.3 DISEÑO FINAL DEL BMS	37
3.3.1 SELECCIÓN DE PLACA ELECTRÓNICA COMERCIAL PARA EL CASO.....	38
3.3.2 MONITORIZACIÓN DE VOLTAJES DE LAS CELDAS	40
3.3.3 IMPLEMENTACIÓN DE LA MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DE CELDAS.....	41
4 SISTEMA DE BALANCEO PARA CELDAS DE ALTA POTENCIA Y ALTA ENERGÍA	44
4.1 MODELADO Y SIMULACIÓN	47
4.1.1 MODELO DE CELDAS	47
4.1.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE BALANCEO DESARROLLADO.....	50
4.2 DIMENSIONADO Y ELECCIÓN DE COMPONENTES DEL CIRCUITO DE EQUILIBRADO DISEÑADO	53
4.3 MONTAJE EXPERIMENTAL Y VERIFICACIÓN EN LABORATORIO	57
5 RESUMEN DEL PRESUPUESTO	63
6 ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS IMPLICACIONES AMBIENTALES Y SOCIALES	63
7 CONCLUSIONES Y FUTUROS ESTUDIOS	64
8 REFERENCIAS	65

Índice de tablas

TABLA 1. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LAS BATERÍAS DE LITIO	6
TABLA 2. DIFERENTES QUÍMICAS DENTRO DE LA TECNOLOGÍA DE BATERÍAS DE LITIO.....	7
TABLA 6. PROS Y CONTRAS DE LAS TÉCNICAS DE BALANCEO PASIVO	22
TABLA 7. COMPARATIVA DE LOS MÉTODOS DE BALANCEADO ACTIVO	24
TABLA 8. TABLA RESUMEN DE VENTAJAS, DESVENTAJAS Y APLICACIONES DE BALANCEO ACTIVO Y PASIVO.....	26
TABLA 9. MONITOR DE CELDAS COMERCIALES CON POSIBILIDAD DE BALANCEADO	27
TABLA 10. CASOS DE USO PARA EL SISTEMA DE BALANCEO.....	31
TABLA 11. EVALUACIÓN DE LOS CASOS DE USO PARA EL BALANCEO PASIVO.....	32
TABLA 12. EVALUACIÓN DE LOS CASOS DE USO PARA EL BALANCEO ACTIVO	32
TABLA 13. DATOS ELÉCTRICOS DE LAS CELDAS Y MÓDULOS.....	35
TABLA 14. REQUISITOS A CUMPLIR POR EL SISTEMA DE BALANCEO.	37
TABLA 15. CONSTANTES PARA EL CÁLCULO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS NTC. (FUENTE:[33]).....	42
TABLA 16. TENSIONES MÁXIMAS Y MÍNIMAS DE LAS CELDAS.	54
TABLA 17. TABLA RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS ELÉCTRICOS.....	55
TABLA 18. TABLA RESUMEN DEL PRESUPUESTO GLOBAL DEL ESTUDIO.	63

Índice de figuras

FIGURA 1. TECNOLOGÍAS ACTUALES DE BATERÍAS LI-ION (FUENTE: [1]).....	1
FIGURA 2. LOGO CORPORATIVO DEL PROYECTO HELIOS (FUENTE:[3])	2
FIGURA 3. ESQUEMA GENÉRICO DE UNA BMS Y CAMPO DE TRABAJO.	2
FIGURA 4. PARTES PRINCIPALES Y COMPORTAMIENTO ESQUEMÁTICO DE UNA CÉLULA ELECTROQUÍMICA (FUENTE:[5])	5
FIGURA 5. FLUJO DE IONES EN LA BATERÍA DE IONES DE LITIO (FIGURA:[6])	6
FIGURA 6. PROCESO DE DESCARGA DE UNA BATERÍA SAMSUNG INR18650-25R (FUENTE:[8])	11
FIGURA 7. MEDICIÓN DE VOLTAJES DE CELDAS EN SERIE	12
FIGURA 8. ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE LA LECTURA DE TENSIONES DE CELDAS	12
FIGURA 9. DISTINTOS TIPOS DE ETAPAS DE ACONDICIONAMIENTO	13
FIGURA 10. CURVA DE TENSIÓN Y CORRIENTE DEL PROCESO CC-CV (FUENTE: 10)	14
FIGURA 11. EQUILIBRADO DE CELDAS DURANTE CARGA / DESCARGA CON CONTROL BASADO EN VOLTAJE. (FUENTE:11)	14
FIGURA 12. EQUILIBRADO DE CELDAS DURANTE CARGA / DESCARGA CON CONTROL BASADO EN ENERGÍA (FUENTE:11)	15
FIGURA 13. ESTRUCTURA BMS CENTRALIZADO.....	17
FIGURA 14. ESTRUCTURA BMS MODULAR	18
FIGURA 15. ESTRUCTURA BMS MASTER-SLAVE	18
FIGURA 16. ESTRUCTURA BMS DISTRIBUIDO.....	19
FIGURA 17. ESQUEMA GENERAL DE LAS TÉCNICAS DE BALANCEADO EXISTENTES. (FUENTE: [16]).....	20
FIGURA 18. ESQUEMAS DE BALANCEADO PASIVO. A) CIRCUITO DE BALANCEADO PASIVO. B) DIAGRAMA DE FLUJO DEL BALANCEO PASIVO (FUENTE: [18])	21
FIGURA 19. CIRCUITOS DE LAS TIPOLOGÍAS DE BALANCEADO PASIVO. A) CELL BALANCING WITH FIXED SHUNTING RESISTORS. B) CELL BALANCING WITH SWITCHING SHUNTING RESISTORS.	22
FIGURA 20. CIRCUITOS DE BALANCEADO ACTIVO. A) BALANCEADO ACTIVO FULL-BRIDGE CONVERTER.B) BALANCEADO ACTIVO SINGLE CAPACITOR (FUENTE: [23])	25
FIGURA 21. CONFIGURACIÓN DE LOS BALANCEADORES PASIVOS COMERCIALES. A) CIRCUITO CON TRANSISTOR DE DESCARGA INTERNO B) CIRCUITO CON TRANSISTOR DE DESCARGA EXTERNO. (FUENTE: [25])	28
FIGURA 22. MÓDULO BASADO EN EL MICROCONTROLADOR BQ79616 CON BALANCEADO PASIVO DEL FABRICANTE TEXAS INSTRUMENTS	29
FIGURA 23. TOPOLOGÍAS COMERCIALES DE BALANCEADO ACTIVE. A) BALANCEADO ACTIVO BASADO EN UN CONVERTIDOR. B) BALANCEADO ACTIVO BASADO EN UN FULL-BRIDGE CONVERTER.(FUENTE: [25])	29
FIGURA 24. MÓDULOS COMERCIALES CON BALANCEADO. A) MÓDULO DE ANALOG DEVICES CON HASTA 10 A DE CORRIENTE DE BALANCEO Y PESO DE 0.88 KG. B) MÓDULO DE TEXAS INSTRUMENT CON HASTA 5 A DE CORRIENTE DE BALANCEO Y PESO DE 1 KG. (FUENTE: [25], [26])	30
FIGURA 25. GRÁFICO RADAR COMPARATIVO CONSIDERANDO EL TIEMPO ÚTIL DE VIDA, VELOCIDAD DE CARGA, PESO Y DENSIDAD DE ENERGÍA. (FUENTE: [30])	34
FIGURA 26. ESQUEMA DE LA CONFIGURACIÓN DE LA BATERÍA HIBRIDA.....	35
FIGURA 27. MÓDULO DE TEXAS INSTRUMENTS EVM BQ79616-Q1. (FUENTE:[32]).....	39
FIGURA 28. CONFIGURACIÓN DE BMS MODULAR CON EL MÓDULO DE TEXAS INSTRUMENTS EVM BQ79616-Q1. (FUENTE:[32])	39
FIGURA 29. CIRCUITO DE BALANCEO DEL MÓDULO DE TEXAS INSTRUMENTS EVM BQ79616-Q1. (FUENTE:[32])	40
FIGURA 30. CONFIGURACIÓN INTERNA DEL MICROCONTROLADOR BQ79616-Q1, SECCIÓN DE MEDICIONES. (FUENTE:[32])....	41
FIGURA 31. CURVA CARACTERÍSTICA DEL NTC. (FUENTE:[33])	41
FIGURA 32. CONFIGURACIÓN INTERNA DEL MICROCONTROLADOR BQ79616-Q1, SECCIÓN DE LOS GPIOS. (FUENTE:[32])	43
FIGURA 33. COMPORTAMIENTO DEL NTC EN FUNCIÓN DEL VALOR DE LA RESISTENCIA DEL PROPIO SENSOR Y DEL VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN.....	43
FIGURA 34. CIRCUITO DE DESCARGA DE LAS CELDAS DISEÑADO.....	44
FIGURA 35. CONTROLADOR DE PUERTA DE LOS TRANSISTORES IRS20752. (FUENTE:[34]).....	45
FIGURA 36. PLACA DE DESARROLLO CON MICROCONTROLADOR STM32F446. (FUENTE:[35]).....	45
FIGURA 37. CONFIGURACIÓN DEL BMS DISEÑADO PARA EL PROYECTO	46
FIGURA 38. PANTALLA DE INICIO STM32CUBEMX.....	46
FIGURA 39. CONFIGURACIÓN DEL RELOJ DEL MICROCONTROLADOR.....	47
FIGURA 40. MODELO ELÉCTRICO DE CELDA BASADO EN OCV-SOC COMO FUENTE DE TENSIÓN Y RESISTENCIA INTERNA.....	48
FIGURA 41. MODELO DE EJEMPLO UTILIZADO PARA EL DISEÑO Y SIMULACIONES DEL SISTEMA DE BALANCEO. A) MODELO DE CELDA SIMPLIFICADO. B) MODELO DE CELDA SIMPLIFICADO IMPLEMENTADO EN SIMSCAPE.	49
FIGURA 42. CURVA OCV PARA LAS CELDAS SAMSUNG 18650-25R A 1C Y 25 °C (CELDA DE ALTA ENERGÍA). A) MODELO DE SIMULACIÓN. B) CURVA CARACTERÍSTICA DE LA HOJA DE DATOS DEL FABRICANTE.....	49

FIGURA 43. CURVA OCV PARA LAS CELDAS FARASIS P73 A 1C Y 25 °C (CELDA DE ALTA ENERGÍA). A) MODELO DE SIMULACIÓN. B) CURVA CARACTERÍSTICA DE LA HOJA DE DATOS DEL FABRICANTE.....	50
FIGURA 44. CURVA OCV PARA LAS CELDAS TOSHIBA SCIB 20AH A 1C Y 25 °C (CELDA DE ALTA POTENCIA).). A) MODELO DE SIMULACIÓN. B) CURVA CARACTERÍSTICA DE LA HOJA DE DATOS DEL FABRICANTE.....	50
FIGURA 45. BALANCEADO PASIVO IMPLEMENTADO EN SIMSCAPE CON BATERÍA 6S1P.....	51
FIGURA 46. ALGORITMO DE CONTROL BÁSICO PARA EL BALANCEO PASIVO DISEÑADO	51
FIGURA 47. BALANCEADO PASIVO IMPLEMENTADO EN SIMSCAPE CON BATERÍA 6S2P.....	52
FIGURA 48. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DEL SISTEMA DE BALANCEADO CON CELDAS SAMSUNG 18650-25R. A) RESULTADOS CON CONFIGURACIÓN 6S1P B) RESULTADOS CON CONFIGURACIÓN 6S2P.....	52
FIGURA 49. VARIACIONES DEL VALOR DE RESISTENCIA EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA. A) CORRIENTE VERSUS RESISTENCIA. B) POTENCIA VERSUS RESISTENCIA.....	53
FIGURA 50. MOSFET Y RESISTENCIA PARA EL SISTEMA DE BALANCEADO DISEÑADO. A) MOSFET SQS460EN DE VISHAY. B) RESISTENCIA DE DISIPACIÓN DE 3,3 OHMIOS. (FUENTES: [39],[40])	56
FIGURA 51. MOSFET UTILIZADO PARA EL PROTOTIPO DE LABORATORIO. (FUENTE: [41])	56
FIGURA 52. ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO DE BALANCEADO DISEÑADO.....	57
FIGURA 53. VISUALIZACIÓN 3D DE LA PCB DEL SISTEMA DE BALANCEADO DESARROLLADO.	57
FIGURA 54. PROTOTIPO DE LABORATORIO CON LA EVM BQ79616-Q1.	58
FIGURA 55. PRIMERA PRUEBA DE LABORATORIO CON EL BALANCEADO INTEGRADO DE LA EVM BQ79616-Q1.	59
FIGURA 56. SEGUNDA PRUEBA DE LABORATORIO CON EL BALANCEADO INTEGRADO DE LA EVM BQ79616-Q1.....	59
FIGURA 57. MONTAJE DEL PROTOTIPO FINAL DE LABORATORIO CON EL SISTEMA DE BALANCEO DISEÑADO Y LA EVM BQ79616-Q1 COMO CIRCUITO MONITOR.	60
FIGURA 58. PRUEBAS CON EL CIRCUITO DE BALANCEADO DISEÑADO CON LA FUENTE DE TENSIÓN CONTINUA A 4,2 V, 2,7 V Y 1,5V. A)PRUEBA DEL CIRCUITO CON 4,2 V. B)PRUEBA DEL CIRCUITO CON 2,7 V. C)PRUEBA DEL CIRCUITO CON 1,5 V.	61
FIGURA 59. PRUEBAS CON EL CIRCUITO DE BALANCEADO DISEÑADO CON CELDAS SAMSUNG 18650-25R.	62



Lista de abreviaturas/Glosario

Abreviació/Acrónimo	Definició
Ah	Amperio - hora
ASIL	Automotive Safety Integrated Level
BEV	Battery Electric Vehicle
BMC	Battery Management Controller
BMS	Battery Management System
ECM	Equivalent Circuit Model
EV	Electric Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
Li-ion	Lithium-ion
HE	High Energy
HP	High Power
SoC	State of Charge
V	Voltios
A	Amperios
IoT	Internet of Things
SoC	State of Charge
TI's	Texas Instruments
GPIO	General Purpose Input / Output

1. Introducción

1.1 Motivación, contextualización y justificación del trabajo

La contaminación ha provocado la necesidad de realizar un cambio energético, reduciendo el uso de las energías no renovables y apoyando, desarrollando e impulsando las energías renovables. Dicho cambio se ve reflejado en casi todos los sectores, entre ellos, la automoción; las compañías invierten e investigan cada vez más en la movilidad eléctrica y sostenible.

Los vehículos eléctricos se basan en un sistema de baterías eléctricas que almacenan la energía, se necesita tener una serie de conocimientos básicos sobre éstas para entender un poco mejor el objetivo de este trabajo. Las baterías están compuestas por asociaciones de celdas en serie y paralelo, dependiendo del voltaje y capacidad necesarios para cada aplicación. Estas celdas son los sistemas electroquímicos que trabajan a un voltaje característico de la reacción química de la celda y que proporcionan corriente eléctrica para alimentar el circuito externo.

Hay diferentes tipos de químicas de celdas. Las más comunes son las de plomo, Niquel-Metal-Hidruro y litio. Este último tipo de celdas es el más extendido actualmente en aplicaciones móviles, y en particular en la automoción, debido a su alta densidad de energía, larga vida, y su permisividad de descarga a altas intensidades. El problema de éstas es que son muy sensibles al punto de operación, es decir, cuando no trabajan en el "Safe Operation Area", pierden cualidades, como, por ejemplo, capacidad o ciclos de vida.

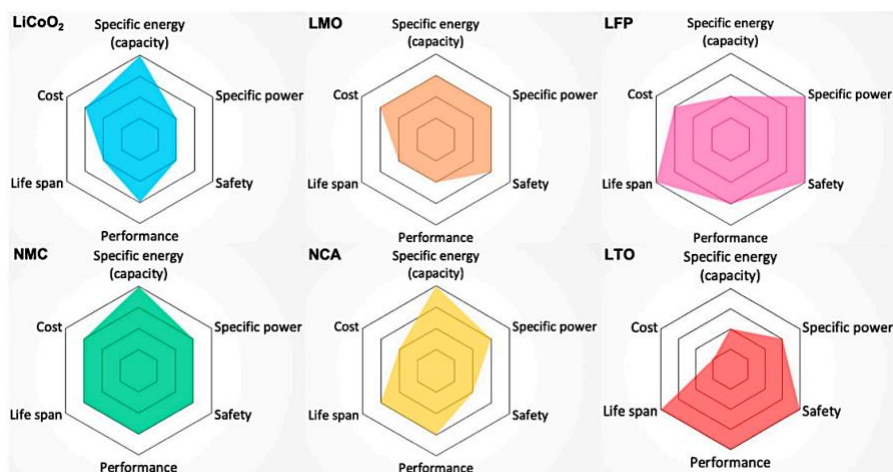


Figura 1. Tecnologías actuales de baterías Li-ion (Fuente: [1])

Es por ello que existe la necesidad de tener un sistema que las controle, el BMS (Battery Management System). Este sistema normalmente también tiene funcionalidades extras a parte de la de monitorizar la batería. La más común es la de permitir el balanceo de las celdas de la batería para evitar desequilibrios de voltaje entre ellas.

Otra de esas funciones es la de comunicarse con el resto de sistemas electrónicos del vehículo y con un ordenador externo. Esto permite que estos sistemas puedan actuar en

función del estado de la batería, y, también permite a una persona visualizar, en tiempo real, dicho estado a través de un ordenador.

Por último, el BMS suele ser capaz de estimar ciertos parámetros de la batería como el State of Charge (SoC), entre otros. Este parámetro es muy importante ya que indica en porcentaje la cantidad de capacidad que le queda a la batería [2]. Además, el BMS debe ser capaz de operar sobre celdas de diferentes tecnologías, por ejemplo, celdas Li-ión de alta potencia y alta energía, como las que se proponen en el proyecto HELIOS.

El proyecto HELIOS (High-pErformance modular battery packs for sustainable urban electrOmobility Services) tiene como objetivo desarrollar un innovador pack de baterías integrando nuevos materiales, diseños, tecnologías y procesos innovadores para crear un nuevo concepto inteligente, modular y escalable para una amplia gama de vehículos eléctricos utilizados en servicios de electromovilidad urbana, desde vehículos completamente eléctricos de tamaño mediano hasta buses eléctricos, con desempeño mejorado, densidad de energía y seguridad.



Figura 2. Logo corporativo del proyecto HELIOS (Fuente:[3])

El proyecto HELIOS pretende contribuir al desarrollo y optimización de baterías de alto voltaje para aplicaciones automotrices con la finalidad de mitigar las emisiones de CO2 derivadas del transporte y hacer frente a la feroz competencia de los fabricantes.

Ahora que se ha presentado en profundidad el marco de trabajo y se conoce la motivación para el desarrollo del estudio, cabe destacar que dicho estudio se centrará únicamente en la parte de balanceo y monitoreo de datos de las. La integración de un buen sistema de balanceo que permita alcanzar los requerimientos fijados es primordial para poder obtener una batería capaz de satisfacer las necesidades planteadas.

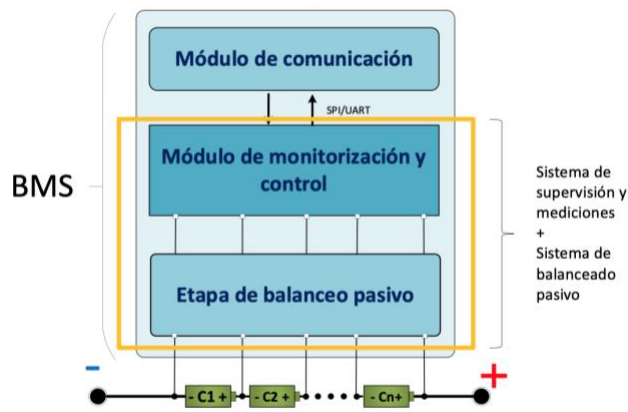


Figura 3. Esquema genérico de una BMS y campo de trabajo.



1.2 Objetivos del trabajo

El principal objetivo del trabajo es el estudio y diseño del sistema de supervisión y balanceado para baterías con celdas Li-Ión, de diferentes tipos y químicas, por ejemplo, de alta potencia y alta energía. Este sistema de supervisión y balanceado de celdas es conocido como BMS y es capaz de controlar la carga y descarga de las celdas de una batería, así como realizar funciones de protección de la misma.

1.3 Metodología

La metodología seguida durante este trabajo tiene como principal objetivo el poder diseñar e implementar un sistema que permita la monitorización y balanceo que se útil para varias tecnologías de celdas. Este sistema optimizar el rendimiento de las baterías mejorando la utilidad de los EV. Los puntos clave a desarrollar serán:

- **Estudio del estado del arte.**

Se estudiarán las tecnologías actuales de baterías de litio y sus diferentes químicas, conjuntamente con el estudio de los sistemas de balanceado activos y pasivos así como sus diferentes modos. Además se profundizará en las funcionalidades básicas que debe presentar un BMS.

- **Definición de requerimientos**

Definición de los requerimientos del sistema de balanceado para obtener unos resultados óptimos en cuanto tiempos de operación se refiere.

- **Análisis del comportamiento de las celdas.**

Modelado y simulación de celdas. Estudio del comportamiento de las baterías en los procesos de carga, descarga y balanceado tanto en simulaciones como en pruebas experimentales.

- **Análisis de BMS**

Definición del prototipo a implementar. Estudio de las opciones existentes en el mercado, así como la selección de la opción conveniente para el objetivo final del presente estudio. Diseño del sistema de balanceo externo.

- **Diseño, modelado y simulación del sistema de balanceo desarrollado.**

Simulación de una batería compuesta por las celdas modeladas y verificadas, para después implementarlas en el sistema de balanceado diseñado, todo ello mediante software de simulación específico como es Matlab y Simulink.

- **Montaje experimental y verificación en el laboratorio**

Montaje experimental del sistema de supervisión y balanceado. Verificación del correcto funcionamiento en el laboratorio de los circuitos de supervisión, balanceado y comunicaciones con la BMS.

A lo largo de todo el documento también se utilizan elementos que ayudan a aclarar cierta información como imágenes, graficas, tablas y ecuaciones.

2 Estado del arte

En el siguiente punto se encuentran explicados los principios básicos a conocer sobre las baterías eléctricas, las diversas propiedades y características. También se explican conceptos primordiales acerca de las baterías, como por ejemplo el estado de carga, la impedancia, la profundidad de descarga, etc. Por último, se realizará una descripción detallada de las diferentes tipologías de BMS así como los diferentes sistemas de equilibrado de celdas.

2.1 Introducción a las celdas electroquímicas

Una batería es un dispositivo que tiene la capacidad de transformar la energía química que almacenan sus componentes en energía eléctrica a través de un seguido de reacciones de reducción y oxidación [4]. El concepto de batería se puede expresar como un conjunto de celdas electrolíticas conectadas en serie o paralelo, aunque podemos definir una batería como una simple celda [3].

Las celdas electroquímicas se pueden clasificar en dos categorías:

- Las celdas primarias no son recargables, lo que quiere decir que sus reacciones electroquímicas son irreversibles.
- Las celdas secundarias pueden recargarse, regenerando sus reactivos y así son capaces de revertir sus reacciones electroquímicas.

Las ventajas más significativas que poseen las celdas primarias son la vida útil, la alta densidad de energía a velocidades de descarga moderadas, el poco o casi nulo mantenimiento que necesitan y su facilidad de uso [4].

Por lo que respecta a las celdas secundarias, tienen la clara ventaja de ser recargables, además de rendir a una alta densidad de potencia, tener altas velocidades de descarga un muy buen rendimiento a baja temperatura.

En la Fig. 4 se puede observar el interior de una batería de manera esquemática. Una celda electrolítica está formada por un electrodo positivo (cátodo), un electrodo negativo (ánodo) y el electrolito. En cada electrodo se produce una reacción de reducción y oxidación respectivamente. Para mantener la carga, los electrones positivos (cationes) migran del ánodo al cátodo y los negativos (aniones) del cátodo al ánodo. El potencial de la celda o voltaje, se genera en el momento que los dos electrodos acumulan sus respectivas cargas, en el ánodo cargas negativas y en el cátodo positivas.

Cuando se desea recargar la celda, se invierte el sentido del flujo de electrones, revirtiendo las reacciones electroquímicas, devolviendo los electrodos al estado inicial. El electrolito es el conductor iónico situado en el centro de la celda entre los dos electrodos, su función aparte de prevenir cortocircuitos en el sistema es dar un correcto paso al flujo de electrones.

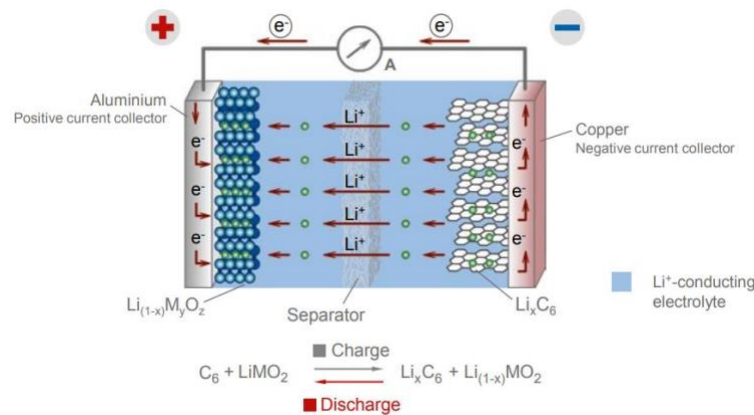


Figura 4. Partes principales y comportamiento esquemático de una célula electroquímica (Fuente:[5])

2.2 Baterías de Litio

El litio es el metal más ligero, con mayor potencial electroquímico y con mayor energía específica por peso. Lo que lleva a pensar que, si se utiliza como electrodo negativo, podría proporcionar densidades de energía extremadamente altas. Pero se descubrió que el ciclo de carga altera el electrodo de litio reduciendo su estabilidad térmica y provocando una potencial fuga térmica. Si esto ocurre la temperatura de la celda aumentaría rápidamente y se acercaría al punto de fusión del litio, provocando un escape térmico conocido como “ventilación con llama”. Debido a la clara inestabilidad que presentaban estas baterías, la investigación y desarrollo de esta tecnología llevó al empleo de una solución no metálica utilizando iones de litio.

En 1991, Sony comercializó la primera batería basada en el Li-ion. Este tipo de batería tiene un bajo mantenimiento, no tiene efecto memoria y no necesita ser descargada completamente para funcionar en perfectas condiciones. El voltaje por celda nominal es de 3.6V, que puede alimentar directamente a teléfonos móviles, tablets y cámaras digitales. El principal inconveniente son los circuitos de protección para evitar el abuso y su alto precio.

El cátodo es de óxido de litio metálico y el ánodo está formado por carbono poroso. Durante la descarga, los iones fluyen desde el ánodo al cátodo a través del electrolito y el separador. En la carga, se invierte la dirección y los iones fluyen desde el cátodo al ánodo. Se puede observar dicho proceso en la siguiente figura:

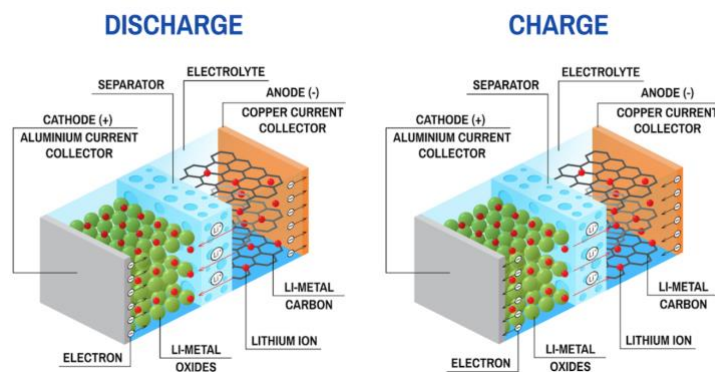


Figura 5. Flujo de iones en la batería de iones de litio (Figura:[6])

Las baterías de litio todas contienen iones de litio como su propio nombre indica, pero existen variedades entre ellas variando su rendimiento y la elección de los materiales activos. Una de las primeras pruebas utilizaba carbón como electrodo positivo, pero posteriormente se cambió a grafito para lograr una curva de descarga más horizontal.

Se han probado distintos aditivos, como aleaciones basadas en silicio, buscando la mejora del ánodo de grafito.

La mayoría de las baterías de iones de litio comparten un diseño similar que consiste en un electrodo positivo de óxido de litio metálico (cátodo) que está recubierto en un colector de corriente de aluminio, un electrodo negativo (ánodo) hecho de carbono / grafito recubierto en un colector de corriente de cobre, un separador y electrolito hecho de sal de litio en un disolvente orgánico. La Tabla 1 muestra las ventajas y limitaciones del Li-ion:

Tabla 1. Ventajas y limitaciones de las baterías de litio

Ventajas	Limitaciones
No tienen efecto memoria	Degradación a altas temperaturas
Ciclo de vida largo y vida útil extensa	Normativas de transporte para moverlas
Mantenimiento nulo	Degradación cuando se almacena a alto voltaje o totalmente cargadas
Baja autodescarga	Requieren un circuito de protección para evitar sobrecargas y descargas profundas
Control de la simple y tiempos de carga cortos.	
Alta energía específica y alta capacidad de carga	

Existen muchas opciones de materiales para los electrodos positivos y negativos. Las limitaciones tecnológicas vienen dadas por el electrolito y el separador. El electrolito debe ofrecer la mayor facilidad al transporte de iones de litio bajo la condiciones de uso. También hay que tener en cuenta las posibles situaciones de uso de la batería y el rango de temperaturas que puede sufrir. Por ejemplo desde un vehículo estacionado en el exterior en invierno, pudiendo alcanzar -30 °C, o bien el sobrecalentamiento, alcanzando hasta +60 °C debido al calentamiento cuando el vehículo está en uso. El separador también debe

ofrecer la mayor conducción de iones de litio posible bajo las mismas condiciones, además de ser capaz de ofrecer un apagado térmico si las condiciones operativas de sobrecalentamiento son significativas. Debe existir una combinación adecuada de materiales de electrodos negativos y positivos que conduzca a una batería rentable y de alta capacidad [1].

La Tabla 2 [1], recoge las principales variaciones químicas de las baterías más significativas que se pueden encontrar dentro de las baterías de litio:

Tabla 2. Diferentes químicas dentro de la tecnología de baterías de Litio

Química	Descripción
Óxido de Cobalto de Litio (LiCoO ₂)	Cátodo de óxido de cobalto y ánodo de carbono de grafito. Vida útil relativamente corta, baja estabilidad térmica y capacidades de carga limitadas debido a su potencia específica. Este tipo de baterías no deben cargarse ni descargarse a una corriente superior a su calificación C, ya que provocan sobrecalentamiento y estrés. Necesitan circuitos electrónicos adicionales
Manganeso de Litio (LiMn ₂ O ₄)	Cátodo de Manganeso de Litio. Permite carga rápida y descarga a alta corriente. Presenta una alta estabilidad térmica y por ello una seguridad de uso mayor. Alta energía específica. Pueden encontrarse en aplicaciones especiales como baterías de herramientas eléctricas, instrumentos médicos y vehículos híbridos o bien eléctricos. La mayoría de las baterías de Li-Mn se mezclan con óxido de cobalto y litio-níquel manganeso (NMC) para mejorar la energía específica y prolongar la vida útil. La mezcla NMC y LMO (Li-manganeso) se elige para la mayoría de los vehículos eléctricos como son <i>Nissan Leaf</i> , <i>Chevy Volt</i> y <i>BMW i3</i> . La parte LMO (30% del total de la batería) proporciona un gran aumento de la aceleración de corriente y la parte NMC aporta el largo rango de conducción.
Óxido de Cobalto, Manganeso y Níquel Litio (LiNiMnAlO ₂)	Cátodo de níquel-manganeso-cobalto. Presentan una densidad de energía elevada, coste bajo de producción y una vida útil larga. Proporcionan alta capacidad de almacenamiento de energía y alta potencia. Se puede encontrar aplicada en e-bikes, motores eléctricos industriales, dispositivos médicos, etc.
Litio Fosfato Hierro (LiFePO ₄)	El cátodo de Li-Fosfato ofrece un buen rendimiento electroquímico con baja resistencia, alta seguridad y tolerancia en caso de abuso operacional. Como en la mayoría de baterías, las bajas temperaturas reducen el rendimiento y las altas temperaturas acortan la vida útil. Esta tipología de batería es comúnmente utilizada para sustituir las baterías de arranque de plomo ácido. Proporcionan alta capacidad de almacenamiento de energía y alta potencia. Están presentes en vehículos eléctricos pequeños, barcos, carritos de golf, ordenadores, autocaravanas, etc.
Óxido de Aluminio de Cobalto y Níquel Litio (LiNiCoAlO ₂)	Ofrece alta energía específica, potencia específica aceptable y una larga vida útil. Tiene menos seguridad que tecnologías anteriores y su precio de fabricación es elevado. Comparte similitudes con el Li-cobalto. Se usan para dispositivos médicos, maquinaria industrial y propulsión eléctrica.

Titanato de Litio (Li4Ti5O12)	Reemplazan al grafito en el ánodo de una batería típica de iones de litio y el material se forma en una estructura de espinela. Cuenta con excelentes características de descarga a baja temperatura. Cuenta con una mejor estabilidad térmica a altas temperaturas que otro tipo de baterías, por ello más seguridad. Utilizadas en UPS, alumbrado público con energía solar, tren de potencia eléctrico (<i>Mitsubishi i-MiEV, Honda Fit EV</i>)
-------------------------------	---

2.3 Parámetros característicos de celdas

En este apartado del trabajo se pretende dar una breve explicación de los parámetros más significativos a la hora de valorar una batería [7].

- a) **Celda:** Es la menor división de una batería y puede ser conectada con diversas celdas en configuración de serie o paralelo con el objetivo de llegar al requerimiento general de la batería deseado.
- b) **Voltaje o diferencial de potencial:** Es el primer parámetro a considerar ya que es la magnitud física encargada de impulsar los electrones y mover las cargas. Los fabricantes de baterías o celdas ofrecen el valor de voltaje nominal.
- c) **Resistencia interna:** Consiste en un concepto que ayuda a modelar en forma de resistencia todas las consecuencias eléctricas de las complejas relaciones químicas que se producen dentro de una batería.
- d) **Capacidad de carga:** Es la cantidad de electricidad que puede almacenar durante la carga y devolver durante la descarga. Mide en amperios la corriente que puede suministrar la batería en una hora en el proceso de descarga, expresados mediante la unidad amperio-hora (Ah). Se puede medir mediante la siguiente ecuación:

$$C = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot \delta t$$

- e) **Tensión en circuito abierto (OCV – Open circuit voltage):** Se define como el voltaje de la batería cuando está en reposo y en circuito abierto, es decir, sin ningún elemento conectado.
- f) **Régimen de carga/descarga:** es la corriente aplicada a la batería para restablecer/extraer la capacidad disponible. Este régimen está generalmente normalizado para la capacidad de la batería. El régimen de carga / descarga puede especificarse directamente al dar la corriente; por ejemplo, una batería se puede cargar / descargar a 10 A. Sin embargo, es más común especificar el régimen de carga / descarga al determinar la cantidad de tiempo que se tarda en descargar la batería. En este caso, el régimen de descarga viene dado por la capacidad de la

batería (en Ah) dividida por el número de horas que se tarda en cargar / descargar. Por ejemplo, una capacidad de la batería de 500 Ah que se descarga teóricamente a su voltaje de corte en 20 horas tendrá una velocidad de descarga de $500 \text{ Ah} / 20 \text{ h} = 25 \text{ A}$. Además, si la batería es una batería de 12 V, entonces la energía el suministro a la carga es de $25 \text{ A} \times 12 \text{ V} = 300 \text{ W}$. Teniendo en cuenta que la batería solo se descarga "teóricamente" a su nivel máximo, ya que la mayoría de las baterías reales no se pueden descargar completamente sin dañar la batería o reducir su vida útil.

Cada tipo de batería tiene un conjunto particular de restricciones y condiciones relacionadas con su régimen de carga y descarga, y muchos tipos de baterías requieren regímenes de carga específicos o controladores de carga. Además, la tensión y la corriente durante el ciclo de carga serán diferentes para cada tipo de batería.

- g) Estado de carga (SoC - State of charge):** Capacidad disponible de la batería respecto a la capacidad nominal de la misma. Se mide en porcentaje. El SOC se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$SOC(\%) = 100\% \cdot \left(1 - \frac{Q_e}{Q_o}\right)$$

Donde Q_e es la carga actual de la batería y Q_o es la capacidad nominal de la misma.

- h) Estado de descarga (SoD – State of discharge):** Es una medida de la carga que se ha sacado de la batería durante la descarga. Se mide en porcentaje.
- i) Profundidad de descarga (DoD – Depth of discharge):** Es la profundidad de la descarga de la batería. Está directamente relacionado con el parámetro presentado en el apartado g).

$$DOD(\%) = 100\% - SOC(\%)$$

- j) Estado de salud (SoH – State of health):** Es una medida en tanto por ciento que indica la vida útil remanente de la batería. Se obtiene del cociente entre la capacidad de la batería en un momento determinado y la capacidad inicial que presenta la batería cuando es nueva.
- k) Energía específica:** se define como la capacidad de energía por unidad de masa, o también como la energía que se puede generar por la unidad de masa total de reactantes en la celda (Wh/kg). Se define como:

$$\text{Densidad de energía} \left[\frac{\text{Wh}}{\text{kg}} \right] = \frac{\text{Energía unitaria [kW]}}{\text{Peso unitario [kg]}}$$

- l) Densidad de energía:** se define como la cantidad de energía que puede suministra un elemento en relación con su volumen (Wh/l).

- m) Densidad de potencia:** relación entre la potencia disponible nominal por unidad de volumen o peso (W/l o bien W/kg).
- n) Eficiencia (%):** se puede definir en cualquier punto de funcionamiento como la relación en porcentaje entre la tensión de operación y la tensión en circuito abierto.
- o) Auto-descarga:** indica la pérdida de capacidad de una batería, cuando la batería no está en uso y se mide en porcentaje la cantidad de carga disipada por unidad de tiempo.
- p) Ciclos de vida de la batería:** son el número de ciclos de carga/descarga que se pueden realizar hasta que la capacidad sea el 90% de su valor nominal. Es altamente recomendable que las baterías tengan más de 500 ciclos de vida para su aplicación en vehículos eléctricos. Un ciclo de descarga / carga se entiende comúnmente como la descarga completa de una batería cargada con una recarga posterior, pero este no es siempre el caso. Las baterías rara vez se descargan por completo, y los fabricantes a menudo usan la fórmula de 80% de profundidad de descarga (DOD) para calificar una batería. Esto significa que solo el 80% de la energía disponible se entrega y el 20% permanece en reserva. El ciclado de una batería con una descarga inferior a la descarga completa aumenta la vida útil, y los fabricantes sostienen que esto se parece más a una representación de campo que a un ciclo completo porque las baterías generalmente se recargan con algo de capacidad de repuesto.
- q) Curvas de carga/descarga:** son los gráficos utilizados para definir el funcionamiento y prestaciones de una batería bajo unos requerimientos concretos. La tasa C es una unidad para declarar un valor actual que se utiliza para estimar y/o designar el tiempo efectivo esperado de la batería en condiciones variables de carga/descarga. La capacidad de una batería normalmente se clasifica en 1C, lo que significa que una batería completamente cargada con una clasificación de 1Ah debería proporcionar 1A durante una hora. La misma batería descargada a 0,5C debería proporcionar 500mA durante dos horas, y a 2C proporciona 2A durante 30 minutos. Las pérdidas en descargas rápidas reducen el tiempo de descarga y estas pérdidas también afectan los tiempos de carga. Una tasa C de 1C también se conoce como descarga de una hora; 0,5C o C/2 es una descarga de dos horas y 0,2C o C/5 es una descarga de 5 horas. Algunas baterías de alto rendimiento pueden cargarse y descargarse por encima de 1C con un estrés moderado. Se puede calcular la tasa de descarga C con la siguiente ecuación:

$$Tasa\ C\ (C) = \frac{Corriente\ de\ carga\ o\ descarga\ (A)}{Capacidad\ nominal\ de\ la\ batería\ (A)}$$

La Fig. 6 muestra la descarga de una batería del fabricante Samsung concretamente el modelo INR18650-25R, que cuenta con una capacidad de 2600mA a la cual se le aplican diferentes tasas C de descarga:

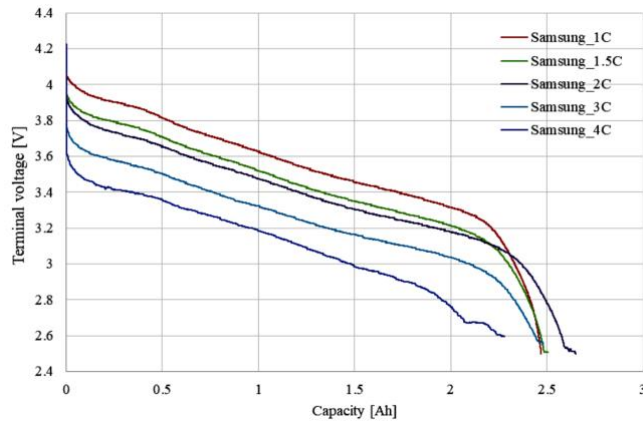


Figura 6. Proceso de descarga de una batería Samsung INR18650-25R (Fuente:[8])

Estos son sólo los factores más relevantes de una batería, existen muchos más y mucho más específicos y centrados en diferentes partes y aplicaciones específicas de la celda.

2.4 Introducción a los sistemas de gestión de baterías

Un sistema de gestión de baterías es el encargado de administrar y asegurar el correcto funcionamiento de una batería. El BMS deberá controlar los procesos de carga y descarga, monitorizar la temperatura de la batería e incluso medir los estados de carga de las diferentes celdas y decidir cuales balancear o cuales no, entre otras funciones. A continuación se encuentra un resumen de las tipologías y las funciones básicas que deben cubrir para asegurar la operabilidad de la batería en un entorno con seguridad.

2.4.1 Funciones principales de un BMS

En este apartado se realiza una revisión de las funciones más básicas que deben realizar los BMS de hoy en día.

En este apartado se realiza una revisión de las funciones que debe cumplir el BMS diseñado para la batería híbrida con celdas de alta potencia y celdas de alta energía.

a) Monitorización de la tensión de las celdas

Una de las principales funciones que debe hacer un sistema de gestión de baterías es la monitorización de los voltajes de celdas para enviar los datos de tensión al microcontrolador para que ordene balancear o no.

Para ello hay que adaptar previamente las tensiones de las celdas para que el microcontrolador pueda leerlas correctamente. Es necesario una etapa de acondicionamiento previa debido a que la tensión de cada celda está referenciada a sus bornes positivo y negativo respectivamente, pero el microcontrolador no medirá lo mismo ya que está referenciado al borne negativo de todo el pack de celdas o borne negativo de la primera celda.

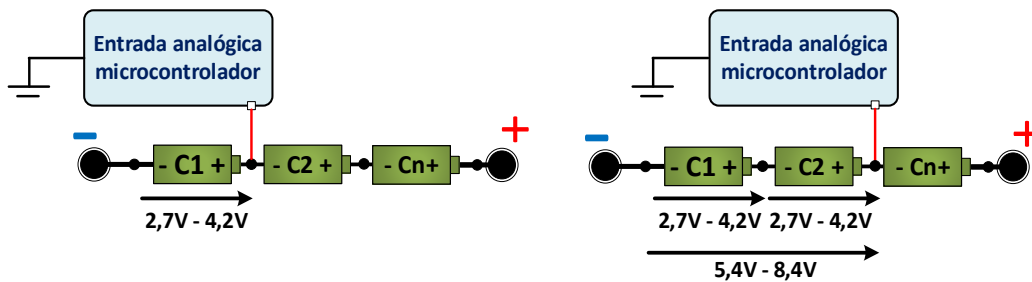


Figura 7. Medición de voltajes de celdas en serie

Esta configuración imposibilita la medición directa de la tensión de las diferentes celdas por el microcontrolador, ya que estos trabajan normalmente a 3,3V o bien 5V y dependiendo del número de celdas que formen la batería el microcontrolador podría medir decenas de voltios dañando el sistema. Por esa razón el voltaje de celdas se realiza de forma diferencial. Es decir, se toma la tensión entre bornes de la celda, y se referencia al mismo punto que el microcontrolador tiene como referencia.

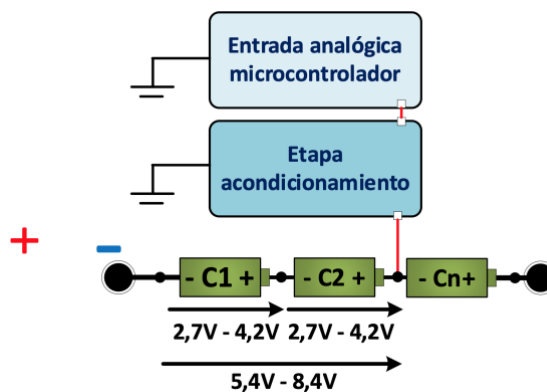


Figura 8. Etapa de acondicionamiento de la lectura de tensiones de celdas

Otro problema que presenta la medición de la tensión de las celdas es el amplio número de celdas que puede presentar una batería. A este problema se presenta una solución electrónica con los multiplexores (también conocidos como *MUX*), son dispositivos que permiten trabajar con un mayor número de señales de entrada que número de señales de salida. Dependiendo del modelo son capaces de agrupar desde 2 a 32 señales de entrada en una única señal de salida [9].

Se pueden utilizar dos tipologías diferentes:

- El primer caso utiliza una etapa de acondicionamiento para cada celda, y una vez que las tensiones están adaptadas se multiplexan hasta la salida analógica del MUX.
- Se coloca un único multiplexor directamente a las celdas y seguidamente la señal de salida del MUX entra en la etapa de acondicionamiento para ser enviada al microcontrolador.

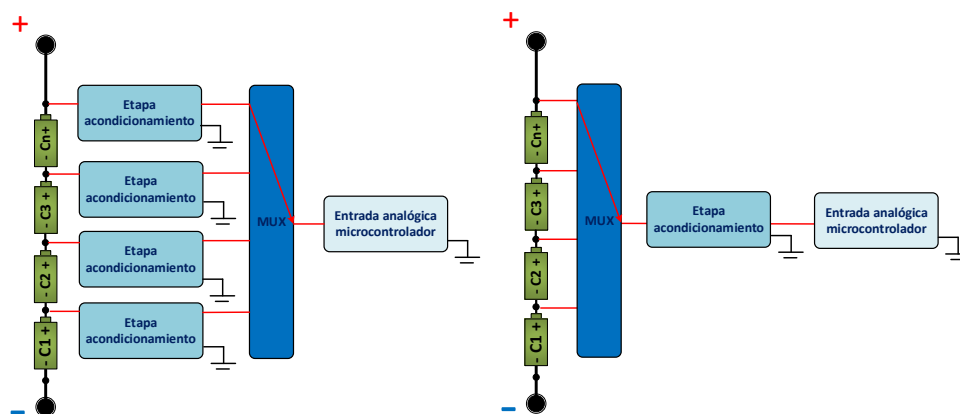


Figura 9. Distintos tipos de etapas de acondicionamiento

Respecto al primer caso, el número de componentes es mayor ya que cada celda cuenta con su propia etapa de acondicionamiento, pero como ventaja presenta que la elección del mux resulta más sencilla ya que las señales que este recibe ya están acondicionadas. Para el segundo caso el número de componentes electrónicos es menor pero los multiplexores deben soportar la tensión total de la batería, ya que pasan por él las señales sin acondicionar. La precisión de medida de estos aparatos suelen estar entorno a los 10mV y 30mV [9].

b) Control de la carga y descarga

Es imprescindible controlar los procesos de carga y descarga ya que son procesos críticos de los que depende la vida útil de las baterías. Cuando las baterías son sometidas a procesos de carga o descarga las reacciones químicas en su interior se aceleran, provocando calor debido a que se tratan de reacciones exotérmicas y por lo tanto aumentar la temperatura de la celda y en consecuencia del *battery pack*.

Para evitar un excesiva temperatura los fabricantes de las celdas indican en sus hojas de datos el rango de temperaturas en el que puede operar de manera segura, valores máximos y mínimos de tensión así como corrientes máximas de carga y descarga sin producir daños irreversibles en la batería. El proceso de carga se realiza con una fuente de alimentación externa que se encarga de introducir energía en la batería.

El método más recomendado y común para cargar baterías de iones de litio en vehículos eléctricos modernos en la actualidad es el método de carga de voltaje constante - corriente constante (CC-CV), derivado de los métodos de carga simples de carga CC y carga CV. Se han desarrollado muchos métodos de carga optimizados sobre la base de un método de carga CC-CV. Se caracteriza por una corriente preestablecida para carga en fase CC, cuando el voltaje de las baterías a cargar aumenta a un nivel preestablecido, cambia a carga CV. Durante la fase CV, cuando la corriente de carga se reduce a la corriente de corte, se completa todo el proceso de carga a voltaje constante. La figura muestra los cambios en la corriente y el voltaje a lo largo de todo el proceso de carga de CC-CV. En general, la carga CC es la parte principal de todo el proceso de carga CC-CV, y representa más del 85 % de la capacidad nominal de las baterías de iones de litio.

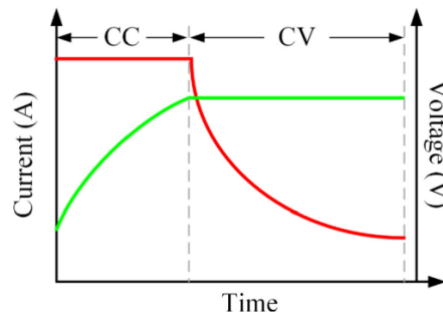


Figura 10. Curva de tensión y corriente del proceso CC-CV (Fuente: 10)

Actualmente, el método de carga CC-CV es un método muy extendido para cargar baterías de iones de litio, ya que no necesita conocer los modelos de batería. El circuito de carga CC-CV también es fácil de diseñar, implementar y operar. Sin embargo, plantea varios problemas: 1, con la disminución de la capacidad de la batería debido al envejecimiento, el voltaje de la batería aumentará a un ritmo relativamente rápido durante la carga, lo que resultará en una polarización notable y un voltaje de polarización más alto. 2, la fase CV consume mucho tiempo, lo que a menudo se considera inadecuado para un proceso de carga rápido. 3, se tiende a adoptar una corriente relativamente alta en la fase de carga CC para reducir el tiempo de carga, lo que aumenta las reacciones secundarias dentro de la batería cargada y afecta su ciclo de vida. 4, el método es independiente de los modelos de batería, por lo que no puede distinguir entre celdas individuales. 5, se desprecia la resistencia interna de las baterías y es probable que un proceso de carga predeterminado provoque un aumento en la temperatura de la batería y una caída en la eficiencia de carga [10].

c) Control del balanceado de celdas

El balanceado de celdas puede realizarse de dos modos distintos:

- **Balanceado por tensión:** El objetivo del balanceo por tensión es equilibrar las tensiones de todas las celdas en un rango de mV. En el balanceo por tensión, es posible que las celdas tengan la misma tensión pero no la misma capacidad o energía almacenada [11].

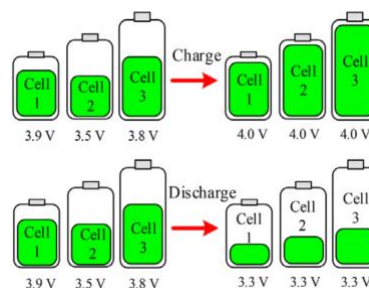


Figura 11. Equilibrado de celdas durante carga / descarga con control basado en voltaje. (Fuente:11)

- **Balanceado por energía:** En el equilibrado por energía el objetivo es equilibrar la carga de todas las celdas. En este modo de operación, la capacidad total de cada celda es la misma pero pueden haber variaciones de tensión. La implementación

de este método es complejo porque es necesario medir y controlar la capacidad de cada una de las celdas, lo que requiere más elementos electrónicos o hardware y muchos más recursos computacionales para procesar los datos [11].

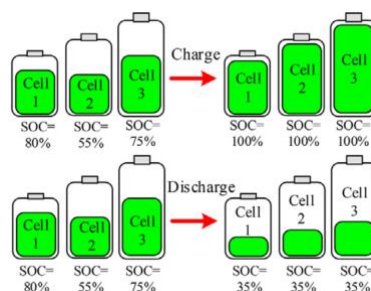


Figura 12. Equilibrado de celdas durante carga / descarga con control basado en energía (Fuente:11)

En la siguiente tabla se recogen las ventajas e inconvenientes de los modos de balanceo. Cabe decir que el método más común es el balanceado por tensión ya que no requiere de modelos matemáticos de estimación del SoC.

Tabla 3. Comparativa entre el balanceado por tensión y energía

	Balanceo por tensión	Balanceo por energía
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> Menos complejidad Menor coste Más utilizado, método controlado. 	<ul style="list-style-type: none"> Más eficiente Más preciso
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none"> Menos eficiente Disparidad de las capacidades 	<ul style="list-style-type: none"> Más complejo Disparidad de voltajes

Para el desarrollo del prototipo se utilizará el balanceado por tensión, esta decisión es debida a que para desarrollar un balanceado por energía, es necesario diseñar y validar un complejo algoritmo para el cálculo del SoC y otros parámetros característicos de las celdas implicados en el equilibrado.

d) Protección de la batería

El BMS debe detener el proceso de carga cuando alguna de las celdas llegue a su máxima tensión (4,2 V). En muchos casos se encuentra que el fabricante del BMS reduce esta máxima tensión a 4,1V con el fin de alargar la vida útil de la batería.

Del mismo modo, si la carga eléctrica conectada a la batería exige energía de la batería y esta se encuentra a niveles bajos de carga, el BMS debe cortar el suministro de energía a esa carga para no provocar una descarga profunda de las celdas. Esto sucede cuando las celdas presentan una tensión de entre 2,7V y 3,3V, dependiendo del margen que deje el fabricante por el bien de la vida útil de las baterías.

También puede suceder que el *battery pack* no se haya dimensionado correctamente para la carga a la cual se va a conectar, por lo que el sistema exige más corriente de lo que las propias celdas son capaces de ofrecer sin provocar daños. En esta ocasión el BMS debe reducir el nivel de corriente o bien cortar el suministro de energía.

Otro aspecto muy importante es la medición de la temperatura. Es el BMS quien comunica la información térmica y decide sobre la situación del pack. Las baterías de litio tienen una temperatura de trabajo segura de -15°C hasta los 65 °C, por lo que el BMS debe asegurar que todo el conjunto de baterías se encuentre en este rango de temperaturas.

La medición de la temperatura normalmente se realiza con un termistor, un sensor que contiene un material semiconductor en el que varía su resistencia en función de la temperatura a la que esté expuesto dicho sensor. Existen dos tipos de termistores: Los NTC, que disminuyen su resistencia al aumentar la temperatura, y los PTC, que aumentan su resistencia juntamente con la temperatura [12].

En secciones de la memoria posteriores se detalla la aplicación de los termistores para el caso.

e) Comunicación

La comunicación del microcontrolador con su entorno es vital para poder recopilar datos y toda la información recibida del *battery pack*. La mayoría de microcontroladores del mercado incluyen la posibilidad de utilizar los protocolos SPI e I2C.

El protocolo SPI es síncrono, Full Dúplex (el maestro puede enviar y recibir datos simultáneamente) y necesita 4 cables para realizar la comunicación. El maestro decide con qué esclavo comunicarse a través de uno de los 4 cables que utiliza. Por cada pulso de la señal de reloj se puede enviar un bit del maestro al esclavo y viceversa. Se pueden mandar secuencias de bit de cualquier tamaño y a velocidades de transmisión de hasta 8MHz. Las desventajas son que necesita hasta 4 cables, funciona para cortas distancias, no tiene mecanismo de control y detección de errores y la longitud de mensajes debe conocerse tanto por los esclavos como por los maestros [13].

El I2C es un protocolo síncrono que solamente necesita 2 cables para realizar la comunicación. Uno para la señal de reloj y otro para el envío de datos. Cada dispositivo tiene una dirección y el maestro accede a los esclavos escribiendo en el propio bus la dirección del esclavo del que quiere obtener datos. Es posible disponer más de un maestro, pero aumenta la complejidad de la comunicación y tampoco es necesario en este proyecto. A diferencia del SPI contiene un bit de validación en la comunicación dándole un grado mayor de fiabilidad. Además, tiene una velocidad de comunicación mucho mayor, de hasta 400MHz [14]. La siguiente tabla 5 recoge las diferencias entre ambos, así como sus ventajas e inconvenientes:

Tabla 4. Comparativa entre comunicación I2C y SPI

	I2C	SPI
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere pocos cables • Dispone de mecanismos para verificar la señal que ha llegado 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta velocidad de transmisión (hasta 8MHz) y Full Dúplex. • Dispositivos sencillos y baratos.

		<ul style="list-style-type: none"> • Secuencias de bit de cualquier tamaño.
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad media-baja • No es Full Dúplex 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere 3 cables • Adecuado para cortas distancias (30cm) • Longitud de trama debe ser conocida por ambos dispositivos. • No disponible verificación de la señal.

2.4.2 Topologías

A continuación se presentan las diferentes estructuras de BMS que existen hoy en día:

a) Centralizado

La tipología de BMS centralizado se basa en una única placa electrónica que se encarga de realizar todas las tareas de medición, gestión y comunicación con el entorno. Es la tipología más compacta y económica ya que todos los componentes se encuentran en una placa, pero como desventaja tiene que si presenta alguna avería, los costes de reparación serían superiores a los de sustituir toda la placa BMS.

Los BMS centralizados son sistemas de gestión de baterías normalmente de bajo precio y bajas prestaciones, para usos donde no es prescindible una alta precisión de medición y gestión de la energía.

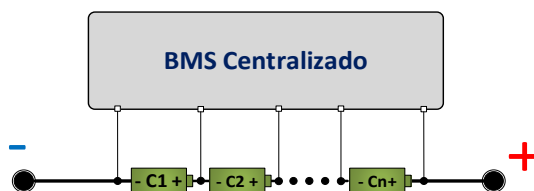


Figura 13. Estructura BMS centralizado

Ya que todos los componentes se encuentran en una sola placa, esta tipología no suele aceptar más de 20 celdas en serie por razón de espacio. Además, por esa misma razón, por la placa PCB debe pasar toda la potencia del pack de celdas, limitando así los usos en los cuales se puede utilizar esta tipología.

b) Modular

Esta tipología comparte diversas similitudes con la anteriormente comentada. En este caso el BMS se encuentra dividido en diferentes módulos, existiendo un módulo denominado normalmente como "maestro", el cual se encarga de gestionar toda la batería, comunicar con todo el sistema además de controlar los demás módulos. El resto de módulos funcionan como dispositivos remotos que siguen las órdenes del módulo maestro. Todos los módulos son capaces de realizar las funciones de balanceo y medición de las celdas.

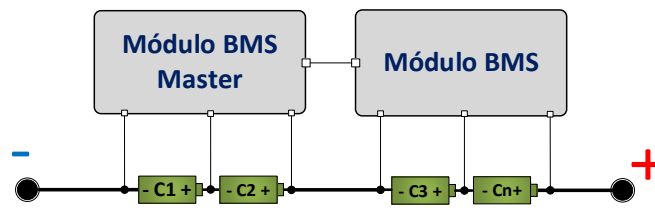


Figura 14. Estructura BMS modular

Electrónicamente tanto el módulo *master* y el resto de módulos son iguales. La mayor diferencia es que en el *master* el puerto de entrada de comunicaciones está conectado al exterior, mientras que, en los módulos “esclavos”, el puerto está conectado al módulo anterior.

Esta tecnología presenta las mismas ventajas que un BMS centralizado, pero se utiliza en casos en los que el número de celdas es grande y con un única placa electrónica no se es capaz de gestionar toda la batería.

c) Master-Slave

En esta tipología se encuentran en un nivel inferior los módulos encargados de realizar las operaciones de medición y balanceo, y en un nivel superior se encuentra el módulo maestro. Las principales tareas del módulo maestro son la interpretación de la información que recibe de los módulos esclavos además de enviar órdenes de balanceo a estos mismos.

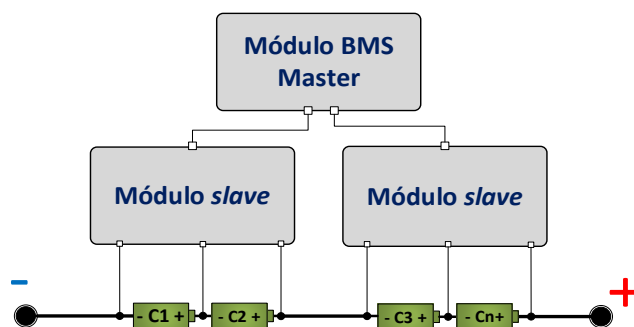


Figura 15. Estructura BMS Master-slave

La tipología Master-Slave presenta las mismas ventajas e inconvenientes que la tipología modular, con el añadido de que los módulos esclavos suelen ser más económicos al ser únicamente dispositivos de medida y balanceo.

Esta distribución sería conveniente para sistemas con gran cantidad de baterías en serie.

d) Distribuido

La tipología de BMS distribuido es la que más se aleja de las opciones anteriores. Existe igualmente un módulo maestro o master encargado de las comunicaciones, y unos esclavos o controladores de celda que son los encargados de la medición y balanceo. La

diferencia con las demás topologías es que el módulo esclavo no se encuentra a cierta distancia y tiene varias celdas a su cargo. En esta distribución cada módulo esclavo tiene una sola celda a su cargo y están acoplados directamente a cada celda.

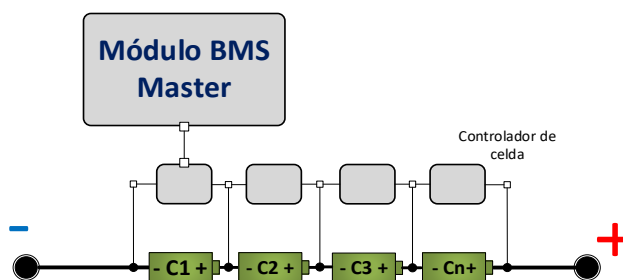


Figura 16. Estructura BMS distribuido

Esta morfología presenta una desventaja respecto los otros tipos de BMS ya que el coste de desarrollo de un BMS distribuido es significativamente mayor, aunque como punto a favor, las posibilidades de fallo se reducen considerablemente.

A continuación a modo de comparativa se encuentran las diferentes tipologías evaluadas con los puntos más significativos a tener en cuenta:

Tabla 5. Comparación entre las distintas tipologías de BMS

	Centralizado	Modular	Master-Slave	Distribuido
Coste desarrollo	4	2	2	1
Coste electrónico	4	2	3	3
Coste ensamblaje	4	3	2	2
Coste mantenimiento	0	3	2	2
Coste reparación	0	3	3	3
Expansibilidad	0	4	3	4
Puntuación global	12	17	15	15

Siendo: 1 el peor y 4 el mejor

La configuración de BMS escogida para el desarrollo del prototipo es la de un BMS Modular. Se ha escogido dicha tipología por dos razones, la primera de ellas es que la placa electrónica con la que se realiza el prototipo está preparada para esta arquitectura. Y la segunda es que la tipología de BMS Modular es escalable a diversos tamaños de baterías, pudiendo agrupar un amplio número de celdas si fuera necesario.

2.4.3 Métodos de balanceado de celdas

Cada celda del paquete de baterías generalmente tiene diferentes capacidades de carga inicial y efectos externos. Además, las celdas conectadas en serie en el paquete de baterías se cargan y descargan repetidamente en varios dispositivos de almacenamiento de energía. Por lo tanto, las diferencias en la velocidad de carga y descarga y la vida útil pueden dar como resultado un estado de carga desigual en las celdas de la batería [15]. Las diferencias de velocidad de carga y descarga en estas celdas desequilibradas dan

como resultado variaciones en el voltaje de la batería y la capacidad de las celdas conectadas en serie en el paquete de baterías. Estas variaciones en el paquete de batería son la fuente principal que reduce la capacidad de la celda y acorta la vida útil de la batería. Para resolver este desequilibrio de la energía de las celdas, se debe utilizar un circuito auxiliar de balanceo de celdas en el sistema de gestión de la batería.

Los métodos de balanceo de celdas generalmente se clasifican en balanceo pasivo y activo. Una metodología pasiva de equilibrado de celdas utiliza resistencias para igualar la energía de celda de un paquete de baterías al consumir una celda de energía más alta que otras. Aunque este circuito de balanceo pasivo de celdas es fácil de implementar, su eficiencia de transmisión de energía suele ser baja debido a las pérdidas de energía generadas por la disipación de calor en las resistencias. Por otro lado, un circuito activo de equilibrio de celdas transfiere energía de la/s celda/s más cargada/s a la/s celda/s que contienen menos energía utilizando una interfaz electrónica de potencia. Aunque este equilibrador de celdas activo tiene mayor eficiencia que un equilibrador de celdas pasivo, su algoritmo de control puede ser complejo y su coste de producción es más elevado [15].

En la Fig. 17 se pueden observar las técnicas de balanceo pasivo y activo existentes [16] :

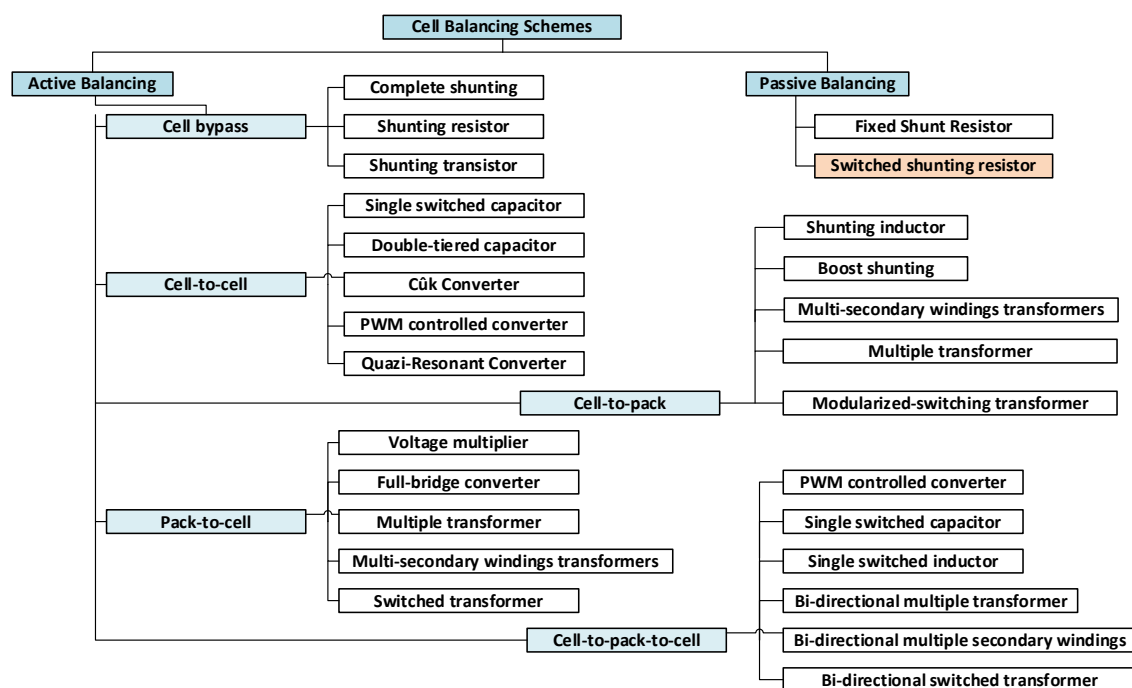


Figura 17. Esquema general de las técnicas de balanceado existentes. (Fuente: [16])

El balanceado de celdas es imprescindible en una batería ya que su fin es igualar el voltaje y el SoC entre las celdas de la batería cuando presenten diferencias en estos factores. Los algoritmos de balanceo de celdas se clasifican en un algoritmo basado en voltaje y un algoritmo basado en energía como se ha resumido en la tabla 4. Los algoritmos dan como resultado métodos de balanceo de celdas activos o pasivos que son aplicables al equilibrado de baterías [16]. En los siguientes puntos de la memoria se encuentran detallados los diferentes métodos de balanceo de celdas:

a) Métodos de balanceado pasivo

El método de balanceo pasivo es relativamente simple en comparación con el método de balanceo activo. En este método, las celdas con exceso de energía se descargan a través de una ruta de derivación disipativa como calor hasta que la carga coincida con la de las celdas inferiores en el paquete o carga de referencia [17] y este afecta directamente el tiempo de funcionamiento de la batería. La naturaleza disipativa del balanceo pasivo significa que no hay distribución de energía entre las celdas ya que la energía de la celda se desperdicia como calor [18], una tarea que se logra mediante el uso de resistencias. Por lo tanto, la carga se pierde o se descarga a través de una resistencia, lo que hace que este método sea menos eficiente y genere mucho calor. Los enfoques convencionales de equilibrio de celdas son pasivos, donde el exceso de carga de las celdas con alto SOC se disipa como calor a través de una resistencia, lo que resulta en una reducción de la eficiencia energética. Sin embargo, este método es bueno para aplicaciones de sistemas de bajo costo en las que no se utiliza un control activo para igualar. En este método, la resistencia se coloca en paralelo con cada celda y el tamaño de la resistencia determina la tasa de equilibrio. El diagrama de flujo y el circuito de equilibrio de celdas de batería pasiva se muestran en la Fig. 18 a) y la Fig. 18 b) respectivamente.

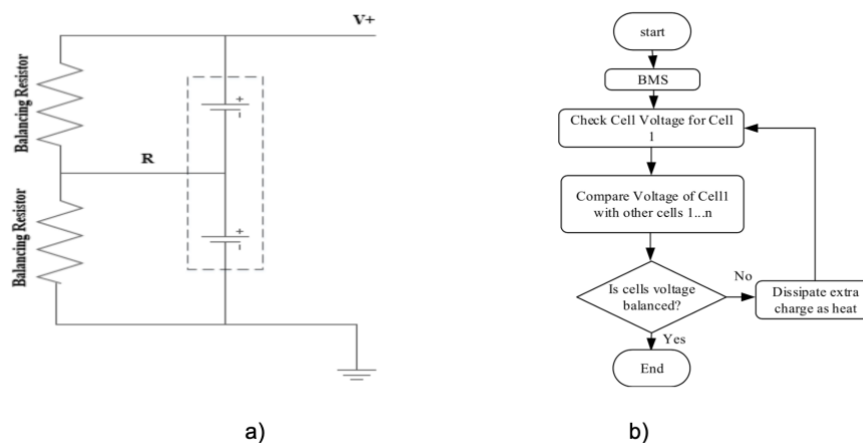


Figura 18. Esquemas de balanceado pasivo. a) Circuito de balanceado pasivo. b) Diagrama de flujo del balanceo pasivo (Fuente: [18])

El balanceo pasivo consiste en una resistencia en paralelo a cada celda, controlada por el chip de monitoreo de voltaje de celda. La intención es simplemente descargar las celdas con un SoC más altos (o carga restante más alta) para igualar el resto de las celdas. El equilibrio pasivo sigue siendo el método dominante en uso hoy en día.

Existen dos topologías de balanceo de celdas pasivo, la resistencia de derivación fija y la resistencia de derivación conmutada.

Como se muestra en la Fig. 19 a), un circuito de resistencia de derivación fija (*fixed shunting resistors*) utiliza un número N de resistencias (es decir, $R_1 \sim R_N$) conectadas en cada celda para evitar que se sobrecargue [19]. Debido a las resistencias, este circuito de equilibrio pasivo permite controlar el valor límite del voltaje de cada celda y no daña las celdas ($B_1 \sim B_N$).

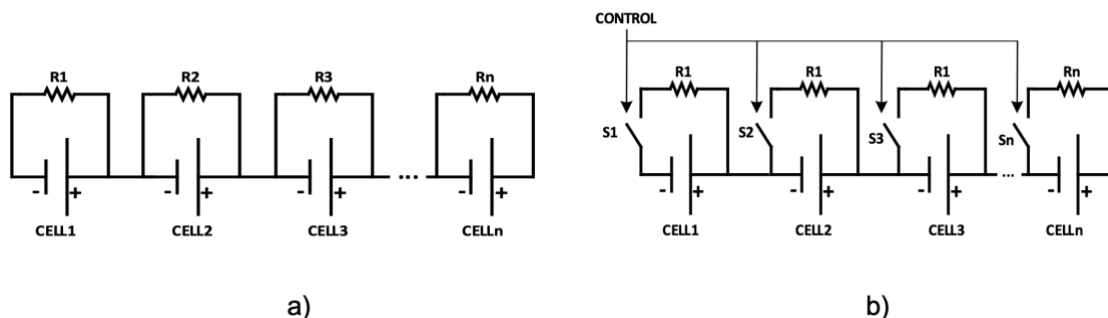


Figura 19. Circuitos de las tipologías de balanceado pasivo. a) Cell balancing with fixed shunting resistors. b) Cell balancing with switching shunting resistors.

Este método de resistencia de derivación fija requiere un bajo costo porque su composición es simple. Sin embargo, la energía consumida por estas resistencias para equilibrar una batería puede provocar pérdidas térmicas en el sistema de gestión de la batería. Por lo tanto, este método de resistencia de derivación fija es un circuito de equilibrado de celda ineficiente.

Como muestra la Fig. 19 b), un circuito de equilibrio de celda de resistencia de derivación conmutada (*switching shunting resistors*) consta de un número N de interruptores (S1 ~ SN) y resistencias (R1 ~ RN) para cada celda. Este circuito de balanceo de celdas es actualmente el método más común en el sistema de balanceado de celdas. Este método se divide en un modo continuo y un modo de detección. En el modo continuo, todos los interruptores se controlan para que se enciendan o apaguen al mismo tiempo. Cuando se selecciona correctamente un valor de resistencia en este modo, es efectivo cargar toda la batería [8]. En el modo de detección, este método requiere un sensor de voltaje en tiempo real para cada celda.

Este circuito de equilibrio de celdas también consume energía a través de una resistencia de disipación. Debido a esta característica, las pérdidas térmicas pueden resultar de corrientes altas a través de interruptores y resistencias de equilibrio. Por lo tanto, también se requiere una gestión térmica de la celda para controlar las pérdidas térmicas. Este circuito de equilibrio de celdas es adecuado para un sistema de batería que requiere una corriente baja cuando está cargada o descargada [20].

En la siguiente tabla se recogen las principales ventajas y desventajas de los dos métodos de balanceo pasivos:

Tabla 3. Pros y Contras de las técnicas de balanceo pasivo

Tipología	Pros.	Cons.	Velocidad de balanceo
Fixed Shunt Resistor	Simple. Bajo coste.	Disipación continua de la energía. Efectivo para un n° pequeño de celdas.	Satisfactoria

			Exceso de calor.	
Switched Resistor	Shunt	Simple. Bajo coste. Más eficiente que el anterior método.	No eficiente. Sólo útil en el proceso de carga.	Buena

b) Métodos de balanceado activo

La técnica de balanceo de celdas activo utiliza la transferencia de carga capacitiva o inductiva para transferir la carga de con una carga más alta a la celda con carga inferior. Esto significa que los métodos de balance activo igualan las inconsistencias entre las celdas en serie al mover la energía eléctrica de las celdas con un SoC más alto a las celdas con un SoC más bajo, con poca pérdida. Si la carga de una celda es más alta que la carga promedia del módulo, la celda no tendrá más opción que ser privada de las cargas adicionales que se trasladan a la celda con menos carga.

Este método es muy eficiente porque el exceso de energía se transfiere a la celda con poca energía en lugar de desperdiciarse como en el balanceo pasivo, pero aumenta la complejidad del circuito. El método de balanceo de celda activo consta de relés, convertidores DC-DC y transductores de corriente. Además, este método consta de cinco subcategorías principales: derivación de celda (*cell bypass*), celda a celda (*cell-to-cell*), celda a paquete (*cell-to-pack*), paquete a celda (*pack-to-cell*) y celda a paquete a celda (*cell-to-pack-to-cell*).

En el método de **cell bypass** idealmente, cada celda individual en un paquete de batería tiene características idénticas para que todas reaccionen de manera idéntica a varios parámetros característicos. Sin embargo, en la práctica, los parámetros característicos de las celdas individuales varían de una celda a otra debido a diferencias de fabricación [21], condiciones ambientales como la temperatura localizada en el paquete o un estado de daño en evolución de la celda, etc. Algunas celdas tendrán mayores tasas de autodescarga. Algunas tendrán voltajes más altos debido a su temperatura. Algunas tendrán resistencias internas más altas que causan variación de voltaje y calentamiento. En casi todos los paquetes de baterías, las características de las celdas individuales difieren de las de las otras celdas en su paquete. Los métodos de equalización de derivación de celdas desvían la corriente de aquellas celdas que alcanzan su voltaje máximo/mínimo, esperando que las celdas restantes también alcancen el voltaje máximo/mínimo.

Los circuitos basados en el *cell bypass* son fáciles de implementar, fáciles de modularizar y su coste es bajo; sin embargo, las estrategias de control existentes solo permiten que sean utilizados al final del proceso de carga/descarga cuando su eficiencia es baja.

En el **cell-to-cell** las variaciones de celda a celda son importantes en las condiciones del paquete porque pueden dar como resultado diferentes capacidades para las celdas de la batería o una degradación local en el paquete. Por lo tanto, las variaciones de celda a celda afectan la estimación de SOC y SOH y disminuyen el rendimiento del control de BMS, y también hay gradientes térmicos a través de un paquete de baterías porque los paquetes

de baterías reales apilan muchas celdas. Los métodos de celda a celda pasan la energía adicional que se almacena en las celdas a las adyacentes con menor energía almacenada. Pueden presentar mayor eficiencia, pero si su velocidad es lenta o su complejidad de control es alta.

En los métodos **cell-to-pack**, la energía se extrae de la celda más cargada del paquete y se entrega por igual a todas las celdas a través de los terminales del paquete. Este método es seguro en el sentido de que no se pierde energía en forma de calor, ya que la carga adicional que provocaría el calentamiento se libera igualmente de la celda a otras celdas del paquete. Los métodos de **pack-to-cell** transfieren energía del paquete a la celda menos cargada. Este método garantiza que se mantenga la carga en equilibrio durante todo el proceso de carga y que no se pierda carga.

Los métodos **cell-to-pack-to-cell** transfieren energía mediante la implementación de métodos de celda a paquete y de paquete a celda. En los métodos de celda a celda, de celda a paquete, de paquete a celda y de celda a paquete a celda, las topologías convencionales basadas en convertidores DC/DC tienden a ser complejas y costosas, y su eficiencia puede ser baja. Estas topologías son generalmente efectivas para prevenir la sobrecarga o descarga excesiva de celdas de batería individuales, lo cual es importante para la seguridad y longevidad del paquete. Por lo general, estas arquitecturas de equilibrio emplean un transformador de retorno o un transformador de devanados múltiples. Esto crea limitaciones de espacio: un hecho que restringe el número de celdas conectadas en serie que se pueden equilibrar utilizando estas arquitecturas.

El objetivo principal de la técnica de balanceado activo es mantener una distribución uniforme de la carga entre las celdas de una batería conectadas en serie a lo largo del tiempo [22], idealmente sin pérdidas de energía para el proceso de ecualización.

Esto se combina con el hecho de que la idea principal detrás de todos los esquemas de balanceo activo es transferir la carga de las celdas que tienen un SoC más alto a las celdas que tienen un SoC más bajo a través de capacitores conmutados que actúan como bancos de almacenamiento intermedio. La técnica de balanceo activo de celdas maximiza la capacidad utilizable de la batería asegurando que explota toda la energía almacenada en la batería y se desperdicia muy poca energía en comparación con el método de balanceo pasivo.

Tabla 4. Comparativa de los métodos de balanceado activo

Técnica de balanceo	Pros	Cons	Coste	Velocidad de balanceo / eficiencia
Cell bypass	Alta eficiencia en el balanceo. Fácil de implementar. Simple de modificar.	Utilizado para aplicaciones de baja potencia. Estrés causado por altas corrientes. Normalmente utilizado al final de la carga.	Bajo	Velocidad alta. Moderada.

Cell to cell	Eficiencia moderada. Según la tipología no se pueden controlar las corrientes de balanceo (Switched capacitors e inductores).	Control complejo. Voluminoso	Moderado	Moderadas
Cell to pack	Seguro Buena eficiencia	Velocidad de balanceo baja para celdas con bajo voltaje. Complejo. Alto coste	Alto	Vel. baja. Media
Pack to cell	Relativamente simple. Rápido Buena eficiencia	Velocidad de balanceo baja para celdas con alto voltaje. Complejo. Necesidad de un DC/DC aislado.	Alto	Vel. baja. Media
Cell to pack to cell	Más rápido que cell-to-pack y pack-to-cell pero igualmente velocidad baja de balanceo	Voluminoso Tipologías basadas en convertidores son complejas y costosas. Baja eficiencia	Alto	Vel. media. Media

A continuación se presentan algunos de los métodos de balanceo activo de celdas más utilizados así como su esquemático eléctrico:

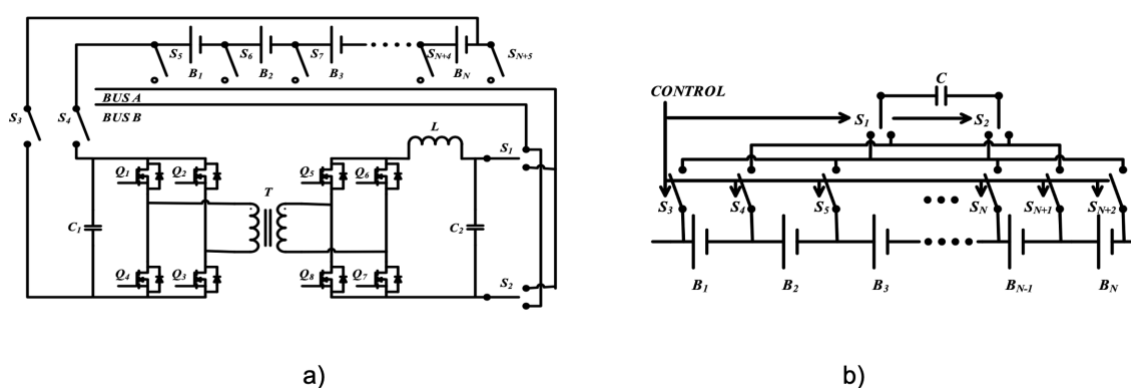


Figura 20. Circuitos de balanceo activo. a) Balanceo activo Full-Bridge Converter. b) Balanceo activo Single Capacitor (Fuente: [23])

En el anexo se encuentran detalladas todas las tipologías pero básicamente se pueden agrupar en tres, en función de sus componentes electrónicos. Así pues serán:

- a) Circuitos de balanceo activos basados en capacitores
- b) Circuitos de balanceo activos basados en inductores o transformadores
- c) Circuitos de balanceo activos basados en Convertidores DC/DC

2.4.4 Comparación entre métodos

Ahora que se conocen en profundidad las características de los métodos de balanceo de celdas, se realiza una comparación breve de los métodos de equilibrado pasivo y los métodos de equilibrado activo en función de sus ventajas y desventajas.

Un método de balanceo de celda pasivo normalmente usa una corriente baja. Por lo tanto, su eficiencia de transmisión de energía es baja debido a la disipación de calor en las resistencias y además, requiere un largo tiempo de equilibrio. Un método pasivo es una técnica adecuada para herramientas portátiles y sistemas de baja potencia.

El balanceo activo tiene una mayor eficiencia de transmisión de energía y un tiempo de balanceo menor que un balanceador de celdas pasivo.

En la siguiente tabla se presentan las ventajas y desventajas más destacadas de cada método.

Tabla 5. Tabla resumen de ventajas, desventajas y aplicaciones de balanceo activo y pasivo.

Tipología	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Balanceo Pasivo	Tamaño reducido Bajo Coste	Pérdidas energéticas Peor comportamiento térmico	Dispositivos portátiles Sistemas de baja potencia
Balanceo Activo	Alta eficiencia Balanceado rápido	Coste elevado Control complicado Pérdidas magnéticas	EV, UPS, HEV

El método seleccionado para el caso de estudio se basa en un balanceado pasivo. Los motivos de esta decisión son básicamente el control del balanceado y el coste económico. Más adelante, en el apartado 3.3 de la memoria se encuentra detallada la justificación.

2.5 Opciones comerciales disponibles de BMS

Existen diferentes soluciones comerciales para balancear celdas tanto pasivas como activas de diferentes fabricantes como Texas Instruments, Analog Devices y otros. No todos los sistemas de balanceo de celdas son para aplicaciones automotrices ya que no cuentan con certificación ASILD (Automotive Safety Integrity Level), pero son aplicables a sistemas generales, por ejemplo, equipos portátiles, baterías de respaldo, sistemas de almacenamiento de energía y almacenamiento de energía en la red. Algunas soluciones se pueden aplicar a bicicletas eléctricas, motocicletas, scooters y vehículos eléctricos e híbridos eléctricos. Las siguientes subsecciones presentan soluciones de balanceo de celdas disponibles comercialmente que se enfocan en aplicaciones EV.

ASIL-D es una clasificación de riesgo automotriz que forma parte de un estándar ISO, concretamente el ISO 26262, que analiza los requisitos de seguridad funcional para todos

los diferentes sistemas eléctricos y electrónicos de un vehículo. ASIL-D representa el nivel más alto de gestión de riesgos, por lo que los componentes o sistemas que se desarrollan para ASIL-D se hacen con los requisitos de seguridad más estrictos [24].

2.5.1 Circuitos comerciales de balanceado pasivo

El balanceo pasivo de celdas se usa ampliamente en la industria y muchos circuitos integrados de monitoreo tienen funciones para aplicar el balanceo pasivo o brindan la opción de construir balanceadores con componentes externos. La Tabla 9 muestra diferentes modelos de circuitos integrados con posibilidades de balanceo de celdas internas o externas.

Tabla 6. Monitor de celdas comerciales con posibilidad de balanceado

Fabricante	Modelo	Características
Texas Instruments	BQ76PL455A-Q1 BQ76PL536A-Q1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pines para un balanceo externo pasivo o activo con N-FETs ▪ Cuenta con AEC-Q100
	BQ796XX Family	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Balanceo interno con FETs y resistencias de disipación externas. ▪ Corrientes de balanceo de hasta 240 mA ▪ Cuenta con ASIL-D y AEC-Q100
	BQ75614-Q1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Balanceo interno con FETs y resistencias de disipación externas. ▪ Corrientes de balanceo de hasta 240 mA ▪ Cuenta con ASIL-D y AEC-Q100
	BQ79606A-Q1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Balanceo interno con FETs y resistencias de disipación externas. ▪ Corrientes de balanceo de hasta 150 mA ▪ Cuenta con ASIL-D y AEC-Q100
Analog Devices	ADBMS6815 ADBMS6817	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Balanceo interno con FETs y resistencias de disipación externas. ▪ Posibilidad de balanceo externo ▪ Corriente de balanceo de 300 mA ▪ Cuenta con ASIL-D y AEC-Q100
	LTC6811-1 LTC6811-2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Balanceo interno con FETs y resistencias de disipación externas. ▪ Posibilidad de balanceo externo ▪ Corriente de balanceo de 60 mA (utilizando los MOSFETs internos) ▪ Cuenta AEC-Q100
	LTC6813-1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Balanceo interno con FETs y resistencias de disipación externas. ▪ Posibilidad de balanceo externo con MOSFETs ▪ Corriente de balanceo de 200 mA (con PWM) ▪ Cuenta AEC-Q100

Infineon	TLE9012AQU	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Balanceo interno con FETs y resistencias de disipación externas. ▪ Corriente de balanceo de 150 mA (utilizando los MOSFETs internos) ▪ Cuenta con ASIL-D
STMicroelectronics	L9963E	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Balanceo interno con FETs y resistencias de disipación externas. ▪ Posibilidad de balanceo externo con MOSFETs ▪ Corriente de balanceo de 200 mA (utilizando los MOSFETs internos) ▪ Cuenta con ASIL-D y AEC-Q100
NXP	MC33771C	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Balanceo interno con FETs y resistencias de disipación externas. ▪ Corriente de balanceo de 300 mA (utilizando los MOSFETs internos) ▪ Cuenta con ASIL-D y AEC-Q100
Maxim IC	MAXREFDES1277	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Balanceo interno con FETs y resistencias de disipación externas. ▪ Corriente de balanceo de 200 mA (utilizando los MOSFETs internos) ▪ Cuenta con ASIL-D

Observando la Tabla 9, se puede ver que la mayoría de las opciones comerciales tienen interruptores internos y componentes externos extendidos para el balanceo de celdas, como se muestra en la Fig. 21 a). Además, algunas opciones, por ejemplo, el ADBM6817 de Analog Devices, ofrecen pines dedicados para controlar N-FET externos para el equilibrio de celdas, como se muestra en la Fig. 21 b).

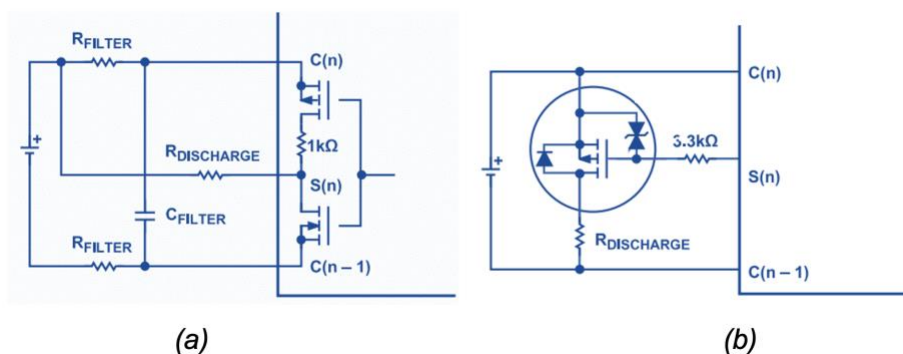


Figura 21. Configuración de los balanceadores pasivos comerciales. a) Circuito con transistor de descarga interno b) Circuito con transistor de descarga externo. (Fuente: [25])

Una resistencia de derivación conmutada es la técnica común aplicada por los fabricantes en los modelos con corrientes de equilibrio de hasta 300 mA con interruptores internos. El coste medio de las soluciones presentadas en la Tabla 9 es de unos 17,00 € considerando únicamente el chip. Sin embargo, para configurar el sistema de balanceo de celdas, los componentes externos como resistencias, MOSFET y la electrónica adecuada para el sistema aumentan los costos finales. Fabricantes como Texas Instruments proporcionan

módulos para equilibrar celdas con todas las interfaces de protección y comunicación. La Fig. 13 muestra un ejemplo de un módulo BQ79616EVM-021 basado en el BatMonIC BQ79616 que integra un sistema de balanceo de celdas pasivo mediante el uso de MOSFET internos y resistencias de derivación externas. El costo de este módulo es de alrededor de 400 € por módulo, pesa alrededor de 0,25 kg y tiene 140x110x20 mm (LxWxH).

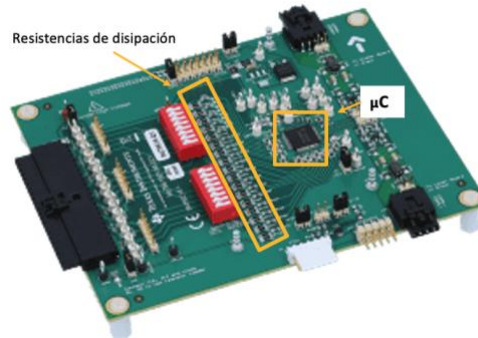


Figura 22. Módulo basado en el microcontrolador BQ79616 con balanceado pasivo del fabricante Texas Instruments

Este módulo se analizará más adelante detalladamente ya que presenta las características necesarias para el objetivo final del proyecto.

2.5.2 Circuitos comerciales de balanceado activo

Como se comenta en la sección anterior, existen numerosos circuitos de monitoreo que permiten la creación de funciones pasivas de balanceo de celdas pero con limitaciones de corriente de balanceo. Alternativamente, compañías como Analog Devices y Texas Instruments ofrecen sistemas de balanceo activo que pueden lograr corrientes de balanceo más altas y pueden optimizar la operación de balanceo de celdas. Analog Devices proporciona dos topologías de equilibrio de celdas activas mediante el uso de diferentes circuitos de monitoreo de celdas y controladores MOSFET integrados adicionales. La Fig. 26 muestra dos soluciones de sistema de equilibrado activo basadas en convertidores de potencia.

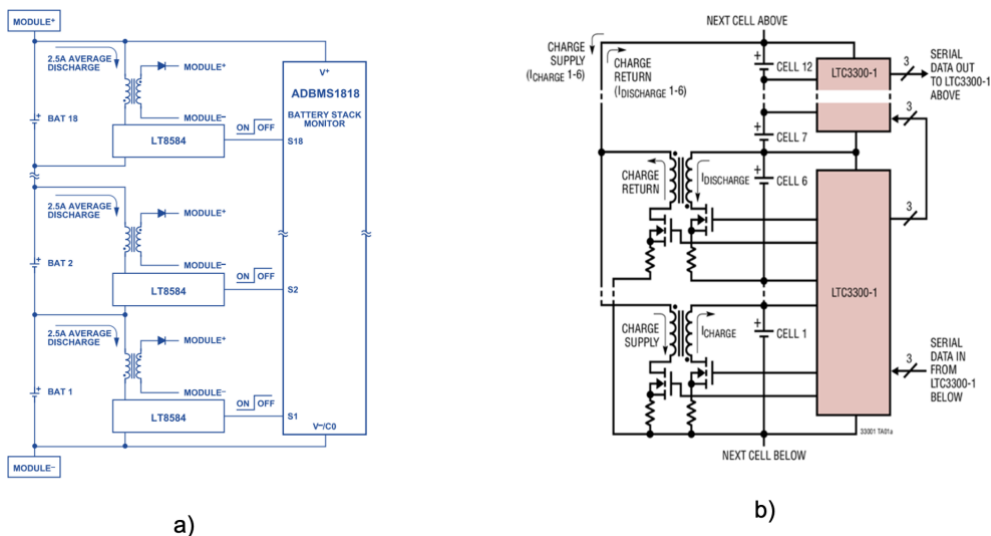


Figura 23. Topologías comerciales de balanceado activo. a) Balanceado activo basado en un convertidor. b) Balanceador activo basado en un full-bridge converter. (Fuente: [25])

La Fig. 26 (a) es un circuito de balanceado activo basado en un convertidor flyback que se usa junto con los monitores de celdas de Analog Devices. Este circuito de equilibrio activo puede funcionar como celda a módulo, módulo a celda o celda a celda. La corriente de descarga máxima es de hasta 2,5 A y está limitada por los controladores MOSFET LT8584; se requiere un controlador o driver para cada MOSFET para esta configuración.

Además, la figura 26 (b) muestra una topología flyback bidireccional aislado que proporciona hasta 10 A de corriente de equilibrio y una eficiencia de transferencia de carga de hasta el 92 %. Para esta topología, Analog Devices ofrece un módulo, que se muestra en la Fig. 27 (a), que se puede encontrar en el mercado, el precio ronda los 1500€ y pesa 0,88 kg.

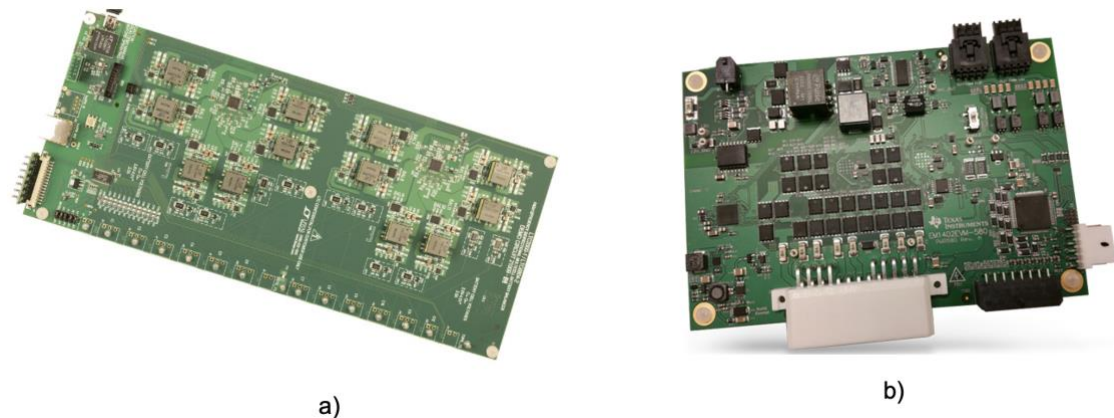


Figura 24. Módulos comerciales con balanceado. a) Módulo de Analog Devices con hasta 10 A de corriente de balanceo y peso de 0.88 kg. b) Módulo de Texas Instrument con hasta 5 A de corriente de balanceo y peso de 1 kg. (Fuente: [25], [26])

Como alternativa, Texas Instruments también ofrece un sistema de balanceado de celdas activo basado en un convertidor de potencia. Está actualmente disponible en el mercado y se muestra en la Fig. 27 (b). La figura 27 presenta la topología de equilibrio de celdas en la que se requieren componentes integrados adicionales, como controladores MOSFET, convertidor DC/DC, controladores de compuerta y circuitos controladores PWM. El equilibrio de celda activo se basa en un convertidor DC/DC y puede funcionar como módulo a celda y celda a módulo. Este sistema puede alcanzar hasta 5 A de corriente de equilibrio, pesa alrededor de 1 kg y tiene unas dimensiones de (LxAnxAI) 5500x3700x18 mm, con un coste de alrededor de 3.500 €.

De acuerdo con el análisis desarrollado, existen pocas opciones de balanceo de celdas activo para su aplicación en EV. Las topologías de equilibrio de celdas encontradas se basan en convertidores de potencia y pueden lograr una corriente de equilibrio de hasta 10 A. Sin embargo, este sistema de equilibrio activo requiere muchos componentes electrónicos que aumentan el costo, el volumen y el peso. Teniendo en cuenta las placas de módulos descritas, está claro que el costo del balanceo de celdas activo frente al balanceo de celdas pasivo podría ser de tres a siete veces mayor y el peso podría ser al menos 2,5 veces mayor. Por lo tanto, como la optimización del sistema, el peso, el volumen y el costo son factores claramente importantes a considerar al diseñar un paquete de baterías, además de la eficiencia energética que presenta cada sistema, muchas

soluciones se inclinan por el balanceado pasivo de las celdas, que es que se aborda en este proyecto.

2.6 Descripción de los casos de uso de una batería

La aplicación de balanceo de celdas dependerá de los casos de uso que pueda presentar el vehículo durante su uso. En general, las aplicaciones EV pueden definir cuatro casos de uso presentados en la Tabla 10 donde podría ser necesario el balanceado de celdas. En cada caso de uso, existen funciones relacionadas con el control del proceso de carga y descarga, compensando el desequilibrio del SoC, evitando la sobrecarga y descarga profunda de las celdas y protegiendo la batería.

Tabla 7. Casos de uso para el sistema de balanceo

Caso de uso / modo	Descripción	Funciones
Modo carga de la batería	Sucede cuando la batería está siendo cargada	<ul style="list-style-type: none"> • Controlar el proceso de carga • Lectura de tensiones de las celdas • Cálculo y control del SoC medio de todas las celdas • Balanceado de celdas durante la carga • Evitar la sobrecarga de celdas • Controlar la temperatura de celda/módulo
Modo descarga de la batería	Opera cuando la batería está trabajando en entrega de potencia al motor del EV	<ul style="list-style-type: none"> • Limitar la corriente máxima que puede ofrecer el pack de baterías • Lectura de tensiones de las celdas • Evitar descarga profunda de las celdas • Cálculo del SoC medio de todas las celdas • Balanceado de celdas durante la carga (en caso de balanceado activo) • Controlar la temperatura de celda/módulo
Modo inactivo de la batería o reposo (idle)	El modo inactivo se refiere a aquel tiempo en el que la batería no se está cargando ni descargando pero está preparada para hacerlo.	<ul style="list-style-type: none"> • Lectura de tensiones de las celdas • Cálculo del SoC medio de todas las celdas • Balancear celdas respecto a un SoC definido • Controlar la temperatura de celda/módulo
Modo frenado o regenerativo	La batería recupera energía gracias a la de energía cinética durante los procesos de frenado	<ul style="list-style-type: none"> • Limitar la corriente máxima de regeneración • Lectura de tensiones de las celdas • Cálculo del SoC medio de todas las celdas • Balanceo de celdas • Evitar la sobrecarga de celdas • Controlar la temperatura de celda/módulo

El balanceo de celdas puede ser innecesario para todos los casos de uso. La aplicación del equilibrado de celdas en cada caso de uso dependerá de los requisitos y necesidades de la operación del EV. Como se ha explicado detalladamente en el estado del arte, existen dos técnicas de balanceo de celdas, balanceo de celdas pasivo y activo, que se pueden

aplicar en casos de uso específicos considerando sus ventajas y desventajas. La disipación de energía, la complejidad, el costo y la implementación pueden limitar la aplicación de estos métodos de balanceo de celdas en todos los casos de uso. La Tabla 11 y la Tabla 12 muestran los casos de uso aplicados a cada técnica de balanceo de celdas y la razón principal de su aplicación.

Tabla 8. Evaluación de los casos de uso para el balanceo pasivo

Caso de uso / modo	¿Útil?	Razones
Modo carga de la batería	Si	<ul style="list-style-type: none"> • Descarga las celdas con mayor energía y permite la carga de otras con menor carga para mantener el pack de baterías equilibrado. • Limita la máxima tensión de cada celda
Modo descarga de la batería	No	<ul style="list-style-type: none"> • En el balanceo pasivo descarga las celdas con mayor energía, por lo que el pack no llegaría a balancearse. Además, el sistema de balanceo añadiría más calor al pack
Modo inactivo de la batería o reposo (idle)	Si	<ul style="list-style-type: none"> • Descarga las celdas con mayor energía y permite la carga de otras con menor carga para mantener el pack de baterías equilibrado.
Modo frenado o regenerativo	Si	<ul style="list-style-type: none"> • It discharges the cells with higher energy and allows the full charge of other cells for keeping the battery pack balanced. • It limits the maximum cell voltages in case of a charging peak.

Tabla 9. Evaluación de los casos de uso para el balanceo activo

Caso de uso / modo	¿Útil?	Razones
Modo carga de la batería	Si	<ul style="list-style-type: none"> • En el balanceo activo se transfiere energía desde las celdas con más carga o tensión hasta las otras con menos carga con el fin de equilibrar la carga de todas las celdas. • Limita la tensión máxima de celdas
Modo descarga de la batería	Si	<ul style="list-style-type: none"> • En el balanceo activo se transfiere energía desde las celdas con más carga o tensión hasta las otras con menos carga con el fin de equilibrar la carga de todas las celdas. Esto permite incrementar la energía utilizable del <i>battery pack</i>.
Modo inactivo de la batería o reposo (idle)	Si	<ul style="list-style-type: none"> • En el balanceo activo se transfiere energía desde las celdas con más carga o tensión hasta las otras con menos carga con el fin de equilibrar la carga de todas las celdas. Esto permite incrementar la energía utilizable del <i>battery pack</i>.
Modo frenado o regenerativo	Si	<ul style="list-style-type: none"> • En el balanceo activo se transfiere energía desde las celdas con más carga o tensión hasta las otras con menos carga con el fin de equilibrar la carga de todas las celdas. • Limita la tensión máxima de celdas

Si se compara la aplicación de los dos métodos de balanceo, activo y pasivo, se verifica que el balanceo activo podría funcionar en más casos de uso que el método pasivo, incluso aumentando la utilización de energía general y, por lo tanto, la autonomía de conducción. Sin embargo, los principales inconvenientes son la complejidad técnica para el desarrollo, la menor densidad de potencia y el coste económico claramente superior, además de la menor fiabilidad debido al aumento del número de componentes electrónicos. Además, el balanceo activo se basa la mayoría de veces en inductores o capacitores de grandes dimensiones, aumentando considerablemente el volumen y peso final del conjunto y dando ventaja en este aspecto al balanceo pasivo.

3 Diseño de la batería y BMS

En esta sección se encuentra la fase de desarrollo del prototipo, que como se ha comentado anteriormente, se centra en la parte de monitorización y balanceado de celdas.

El sistema de supervisión y balanceado que se pretende diseñar debe ser capaz de ser utilizado en diferentes tecnologías de celdas, por ejemplo, en celdas de HP y HE. Como se verá en esta sección con los cálculos eléctricos, los componentes del circuito serán los mismos salvando las diferencias de tensiones de operación de ambas celdas que solo afectaría a efectos de programación.

3.1 Diseño e hibridación de la batería

Las baterías de iones de litio (Li-ion) están diseñadas principalmente para entregar alta energía o alta potencia según el tipo de aplicación. Las baterías de alta energía (HE) se fabrican con electrodos gruesos para almacenar una gran cantidad de material activo, lo que, en consecuencia, aumenta el contenido de energía y la autonomía. Por el contrario, las celdas de alta potencia (HP) utilizan electrodos delgados para reducir la resistencia interna, mejorando así la capacidad de potencia y la aceleración.

Es difícil lograr simultáneamente altas densidades de energía y potencia dentro de una sola batería. Por lo tanto, para cumplir con los requisitos simultáneos de energía y potencia para diferentes EV y condiciones de conducción, el paquete de baterías del EV debe diseñarse en términos de potencia (cuando solo se usan celdas HP) o energía (en el caso de HE) [27].

Esto da como resultado un diseño no óptimo y un sobredimensionamiento del paquete de baterías, lo que genera peso, volumen y costo adicionales. Para abordar este problema y mejorar el rendimiento general del paquete, una solución eficaz es utilizar un sistema de almacenamiento de energía (Energy Storage System - ESS) híbrido que combine los beneficios de las baterías HE y HP. El concepto de hibridación de baterías tiene diferentes ventajas [28], entre las que se incluyen las siguientes:

- La "energía" y la "potencia" se pueden desacoplar en el proceso de diseño, lo que significa que el paquete se puede dimensionar de manera flexible en función de los requisitos explícitos de potencia y energía del vehículo eléctrico sin tener que diseñar en exceso. También será más fácil cumplir con una gama más amplia de requisitos de diseño, como la necesidad simultánea de un reabastecimiento de

combustible más rápido (alta potencia) y un rango de manejo más largo (alta energía) debido al uso de características complementarias de baterías individuales.

- Altas tasas C (corrientes de carga o descarga con respecto a la capacidad nominal) en las celdas HE pueden reducirse o cambiarse hacia las celdas HP. En otras palabras, las celdas HP pueden actuar como amortiguadores que mitigan las tensiones eléctricas en las celdas HE, lo que mejorará la vida útil general. Esto también significa una tensión térmica reducida en las celdas HE, lo que puede reducir el costo total del Sistema de Gestión Térmica [29].
- La profundidad de descarga determina el número de ciclos de la batería. Para parte de la energía consumida, la celda HE tiene una tasa de descarga más baja que la celda HP, y al reducir la descarga de las celdas HE, más durará la batería.

La hibridación no es un concepto nuevo y sus beneficios para diseñar sistemas de almacenamiento óptimos, y también para mejorar varios aspectos críticos en el uso de baterías en EV, por ejemplo, mejorar la vida útil o aumentar la eficiencia del frenado regenerativo [29]. Como punto en contra, las baterías híbridas presentan un coste más elevado por su amplia tecnología, lo cual puede ser justificado si se consideran los beneficios en el ciclo de vida de la batería.

En la Fig. 25, han sido consideradas tres posibles construcciones de batería, siendo 1 la peor opción y 3 la mejor.

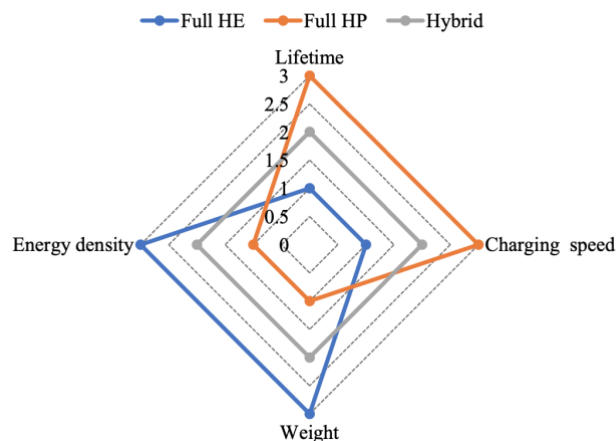


Figura 25. Gráfico radar comparativo considerando el tiempo útil de vida, velocidad de carga, peso y densidad de energía. (Fuente: [30])

La figura sugiere intuitivamente que se logra una mejor compensación entre los cuatro objetivos de diseño utilizando paquetes híbridos de HP y HE. Por ejemplo, una configuración posible para obtener una potencia de descarga continua de 50 kW hasta 250kW y una densidad de energía de 240 Wh/kg hasta 500 Wh/kg, es la de la figura 27.

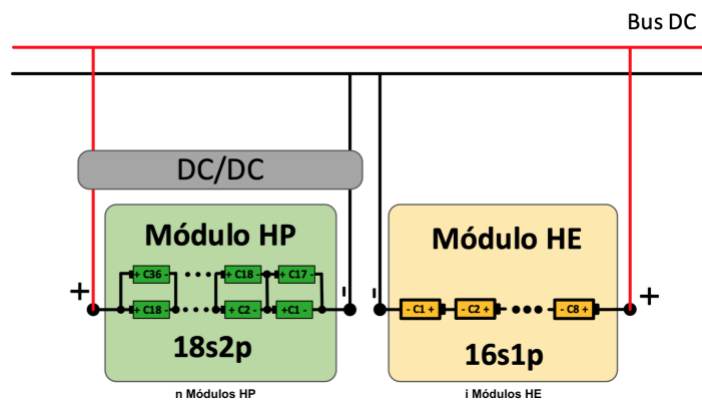


Figura 26. Esquema de la configuración de la batería híbrida.

La configuración de la Fig. 26 permite diversas posibilidades de configuraciones y variando el número módulos de celdas de HE y HP conectados, se consigue una batería escalable para diferentes vehículos y necesidades.

Los parámetros más importantes en los sistemas de balanceado son el rango de voltaje de la celda, el rango de voltaje de los diferentes módulos y el rango de corriente de carga y descarga. Estos parámetros definen las condiciones límite de trabajo de los sistemas de equilibrado, ya que el sistema de equilibrado será el mismo para cada módulo (como se demuestra en secciones posteriores de la memoria).

La parte de interés para el sistema de balanceo es la configuración interna de los diferentes módulos. Cada módulo estará formado por una agrupación de celdas concreta y de diferentes características dependiendo si son para el módulo de alta potencia o bien para alta energía.

Siguiendo la configuración de la Fig. 26 y comprobando que tiene una aplicación real, se buscan posibles celdas de alta potencia y alta energía para el desarrollo del sistema de supervisión y balanceado de celdas. Las celdas presentadas en la tabla 13 han sido seleccionadas porque actualmente son instaladas en baterías de EV, y además los respectivos fabricantes tienen disponibilidad de entrega a corto plazo de las mismas. La información referida a los módulos de la Tabla 13 se refiere a la configuración anterior dada como ejemplo en la Fig. 26.

Tabla 10. Datos eléctricos de las celdas y módulos.

Tipología de celda	Módulo Alta Potencia	Módulo de celdas genéricas	Módulo Alta Energía
Tipo de celda	Toshiba SCIB 20Ah	Samsung INR18650-25R	Farasis IMP14294100P73
Voltaje máximo de celda (V)	2,7	4,2	4,2
Voltaje mínimo de celda (V)	1,5	2,75	2,75
Voltaje nominal de celda (V)	2,3	3,65	3,65
Capacidad de celda(Ah)	20	2,6	73

Ratio de carga (C)	14	0,5	1,8
Ratio de descarga (C)	14	1,6	2
Nº celdas en serie por módulo	18	16	16
Nº celdas en paralelo por módulo	2	1	1
Voltaje máximo de módulo (V)	48,6	67,2	67,2
Voltaje mínimo de módulo (V)	27	42,4	42,4
Voltaje nominal de módulo (V)	41,4	58,4	58,4

Como se puede ver en la Tabla 13, el sistema de balanceo de celdas diseñado para el presente estudio debe ser capaz de trabajar en un rango de voltaje muy amplio. Esto dificulta el proceso de diseño ya que no se puede optimizar para un tipo módulo específico.

Para el desarrollo del prototipo se trabajará con celdas Samsung INR18650-25R.

3.2 Requerimientos del proceso de balanceado

El BMS a desarrollar debe servir para baterías híbridas, que constan de dos celdas diferentes, celdas de alta potencia (HP) y celdas de alta energía (HE). Dependiendo de la química de la batería utilizada, las células HE y HP podrían tener diferentes características en términos de comportamiento, atributos térmicos, etc.

Para un correcto funcionamiento de la batería es imprescindible contar con un sistema de balanceo óptimo para poder obtener el máximo rendimiento de todas las celdas de la batería y satisfacer las necesidades del EV donde se instale la misma.

El rendimiento del balanceo de celdas depende de los siguientes parámetros:

- **Diferencia de voltaje de celda para dejar de equilibrar:** Es la diferencia de voltaje entre el voltaje de referencia y el voltaje de celda. Cuando la diferencia está por debajo de este parámetro, el sistema de balanceo se detiene.
- **Corriente de balanceo de celdas:** Es la corriente de descarga y ecualización de las celdas (y carga en el sistema de balanceo activo).
- **Tiempo de balanceado:** Es el tiempo que transcurre antes de que se equilibre todo el paquete de baterías.
- **Tensión mínima de balanceado:** La mínima tensión de cierre permitida para equilibrar el sistema, cuando se alcanzan estos valores, la descarga y el equilibrado deben detenerse.
- **Voltaje máximo de balanceo:** El voltaje máximo de celda permitido para balancear el sistema, cuando se alcanza este valor, la carga debe detenerse.

Los criterios a ser considerados para el correcto balanceado se encuentran descritos en la Tabla 14 [31]:

Tabla 11. Requisitos a cumplir por el sistema de balanceo.

Parámetro	Criterio
<i>Soc Imbalance</i>	El balanceo de celdas debe mantener el SoC de las diferentes celdas entre un 0% y un 5%
Diferencia de tensión entre celdas para arrancar/detener el balanceo	El balanceo de celdas comienza cuando la diferencia entre celdas es de 10 mV y para de equilibrar cuando la diferencia es menor que 3mV
Corriente de balanceo	La corriente máxima de balanceo debería ser el 10% de la corriente nominal de la celda, con un límite de 5A máximo por celda.
Tiempo de balanceo	El tiempo máximo de operación del sistema de balanceo depende de la corriente de balanceo y de la diferencia de SoC entre celdas. Para la batería donde debe implementarse el sistema de balanceo debe tardar menos de 5 horas para corregir el 5% de desequilibrio del SoC de las celdas con corrientes de balanceo inferiores a 5A.
Voltaje mínimo de balanceo	Tensión mínima de balanceo ajustada para prevenir la sobre-descarga de las celdas corresponde a 1,5 V para las celdas de HP, y 2,75 V para las celdas de HE. Estos valores son dados normalmente por el propio fabricante de las celdas. Por debajo de estas tensiones, el sistema de balanceo se detiene para no dañar a las celdas.
Voltaje máximo de balanceo	Voltaje máximo de balanceo ajustado para prevenir las celdas de sobrecarga corresponde a 2,7 V para las celdas de HP y 4,2 V para las celdas de HE. Estos valores también son dados normalmente por el propio fabricante de las celdas. Por encima de estas tensiones, el sistema de balanceo se detiene para no dañar a las celdas.
Potencia máxima en la resistencia de disipación	Se establece una potencia máxima de 10W para la resistencia de disipación con el fin de evitar un exceso de calor en la misma y poder llegar a fundir la resistencia, además de aumentar la temperatura de todo el conjunto de componentes electrónicos que estén alrededor.

3.3 Diseño final del BMS

Considerando toda la información recogida en el estado del arte y las soluciones comerciales disponibles en el mercado, elegir un monitor y balanceador de celdas adecuado es un desafío.

Los sistemas pasivos de balanceo de celdas se utilizan ampliamente en la industria de los vehículos eléctricos, y se pueden encontrar numerosas opciones comerciales siendo opciones de mercado con un bajo costo. El equilibrado de celdas se integra comúnmente junto con el circuito de monitoreo de celdas, en la mayoría de los casos mediante el uso de FET internos, como se muestra en la Fig. 21 (a). Por lo tanto, la corriente de equilibrio máxima vista por las opciones comerciales es de hasta 300 mA.

Teniendo en cuenta la descripción general de los métodos de balanceo activo, para una alta corriente de balanceo y una alta eficiencia, las mejores soluciones son usar un balanceo activo basado en inductores o convertidores DC/DC. Sin embargo, aumenta la complejidad del control, disminuye la densidad de potencia y aumenta el costo. Por otro lado, en cuanto a soluciones comerciales, los sistemas de equilibrado activo tienen poca disponibilidad en el mercado y tienen un coste muy elevado debido a la gran cantidad de componentes. Por ejemplo, se pueden encontrar sistemas basados en convertidores DC/DC con balanceo de corriente de hasta 10 A con una eficiencia de transferencia de potencia del 92 %.

La selección de un sistema de balanceo de celdas para utilizar en los módulos de la batería híbrida es un reto debido a los objetivos y limitaciones definidas en el proyecto. Por lo tanto, se exponen las siguientes consideraciones relacionadas con los objetivos del proyecto para facilitar la selección del balanceo de celdas:

- El balanceo de celdas debe cumplir con los criterios definidos en la Tabla 14.
- El sistema de balanceo de celdas será el mismo para los módulos HP y HE. Por lo tanto, el balanceo de celdas debe ser modular y versátil.
- El peso de la placa electrónica debe ser lo más bajo posible para no aumentar el peso de la batería.
- Para reducir el consumo de recursos del BMS, el balanceo de celdas debe tener un control simple.

Idealmente, el balanceo activo basado en convertidores de potencia es la mejor solución para lograr un balanceo rápido. Sin embargo, el equilibrado activo de celdas es la solución menos factible debido a que este método podría abrumar los recursos del BMS y podrían requerirse dispositivos digitales adicionales para su control.

Como conclusión, a pesar de sus desventajas, el balanceo pasivo de celdas usando interruptores externos para aumentar la corriente de balanceo, como en la Fig. 21 (b), es una buena opción para operar con celdas de HE y HP .

Por lo tanto, se propone el diseño, optimización y desarrollo de los sistemas de balanceo pasivo de celdas para su integración en el prototipo de paquete de baterías del proyecto.

3.3.1 Selección de placa electrónica comercial para el caso

Después de haber seleccionado un método de balanceo pasivo por los intereses anteriormente mencionados, la opción comercial que más se acerca al propósito final del presente trabajo es la del fabricante Texas Instruments (TI's), concretamente la BMS021.

El BMS021 se utilizará para corroborar el funcionamiento del balanceado pasivo de celdas, y posteriormente, comparar los resultados con el sistema de balanceado de celdas diseñado. Además cuenta con un circuito monitor capaz de leer las 16 tensiones de las celdas conectadas en serie, y lleva integrada la interfaz necesaria para la de medición de temperatura y protección. De esta manera, la parte de supervisión de la batería (medición de tensiones de celdas y temperatura) se realizará con el BMS021, y la parte de balanceado de celdas se llevará a cabo con el sistema de balanceado pasivo desarrollado.

El BMS021 es una placa de evaluación (su traducción en inglés Evaluation Module – EVM) de la familia de microchips BQ7961x-Q1 para usar en aplicaciones de paquetes de baterías de iones de litio y otras químicas de gran formato para proporcionar monitoreo, protección, equilibrio y comunicaciones.



Figura 27. Módulo de Texas Instruments EVM BQ79616-Q1. (Fuente:[32])

El BQ79616 EVM puede administrar hasta 16 celdas (80V máx.). Se pueden apilar hasta 35 módulos BQ79616EVM, para llegar a controlar packs de baterías de hasta 560 celdas en serie.

Cada EVM está equipado con medición de precisión y comunicación síncrona para permitir que un controlador maestro realice la estimación del estado de carga (SoC) y el estado de salud (SoH). La lectura de los voltajes de celda de alta precisión permiten una operación más eficiente de los módulos de batería y cálculos más precisos de SoC y SoH. La comunicación con los BQ79616EVM apilados se realiza a través de un bus diferencial en cadena, es decir con este modelo se establecería una tipología de BMS modular, con su módulo maestro y los demás como “esclavos”.

La comunicación entre el PC y el dispositivo maestro en una pila BQ79616EVM se realiza a través de una interfaz USB2ANY-UART.

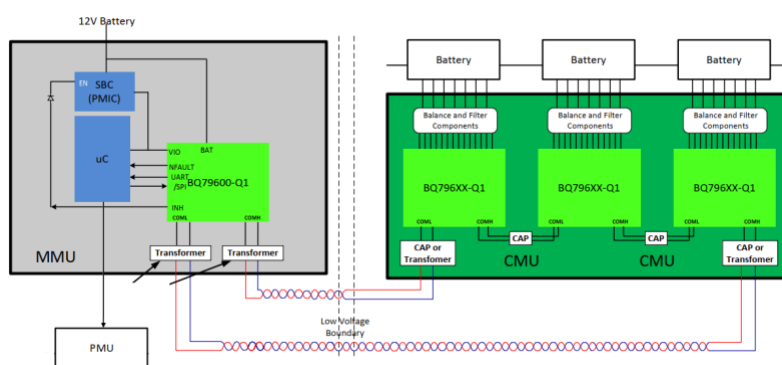


Figura 28. Configuración de BMS modular con el módulo de Texas Instruments EVM BQ79616-Q1. (Fuente:[32])

Características clave:

- El EVM utilizado incluye las siguientes características:
- Equilibrio celular pasivo interno
- Arquitectura flexible para aplicaciones de 6 a 16 celdas
- Interfaz UART

- Medición de voltaje de celda de alta precisión
- 8 GPIO (General Purpose Input/Output) multipropósito.
- Admite conexión/medición de barra colectora de tensión de la batería

Un aspecto importante a comentar es que la corriente de balanceo de celdas de la EVM es demasiado baja para la batería diseñada, por lo tanto, se necesitará más corriente de balanceo de celdas de acuerdo con los requerimientos establecidos para el sistema de balanceo en la tabla 15.

El dispositivo cumple con ASIL-D en mediciones de voltaje y temperatura, y comunicación. Los ADC en los dispositivos conectados en cadena que se pueden configurar para alinear el inicio de las mediciones de voltaje de celda y todos los voltajes de celda se pueden medir en 128 μ s. Cada canal de detección de celda incluye un filtro de paso bajo (LPF) digital posterior al ADC para la reducción de ruido, así como para proporcionar resultados de medición promedios. El dispositivo tiene 8 GPIOs, los cuales son configurables para conexiones de termistor NTC o se usan como entrada o salida de señal de propósito general. Los 8 GPIO pueden tomar mediciones en 1,6 ms.

El dispositivo admite el balanceo pasivo a través de un MOSFET interno (CBFET) para cada celda. La función de equilibrado se puede ejecutar de forma autónoma sin la interacción del microcontrolador (MCU). Incluye una opción para pausar y luego reanudar el balanceo en función de un umbral programable detectado por el termistor externo o si la temperatura es demasiado alta.

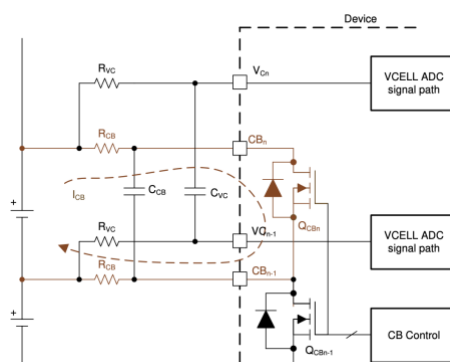


Figura 29. Circuito de balanceo del módulo de Texas Instruments EVM BQ79616-Q1.
(Fuente:[32])

3.3.2 Monitorización de voltajes de las celdas

La monitorización del voltaje de las celdas se realizará a través del microcontrolador de Texas Instruments, el BQ79616-Q1.

Las mediciones de voltaje de celda del ADC principal se toman de los pines VC0 a VC16. El dispositivo permite medir un mínimo de 6 celdas hasta un máximo de 16 celdas. Los pines VC0 a VC16 están conectados al extremo frontal analógico que consta de un filtro BCI, un cambiador de nivel y un filtro anti solapamiento (AAF) en cada canal de entrada VC. El filtro BCI tiene una frecuencia de corte (f_{cutoff}) de 100 kHz y el AAF tiene una f_{cutoff} de 1,6 kHz. Esto filtra el ruido de alta frecuencia en la entrada de VC antes de ir al multiplexor de alto voltaje y medido por el ADC principal.

Cada canal de detección de celda incluye un filtro de paso bajo (LPF) digital posterior al ADC para la reducción de ruido, así como para proporcionar resultados de medición promedios.

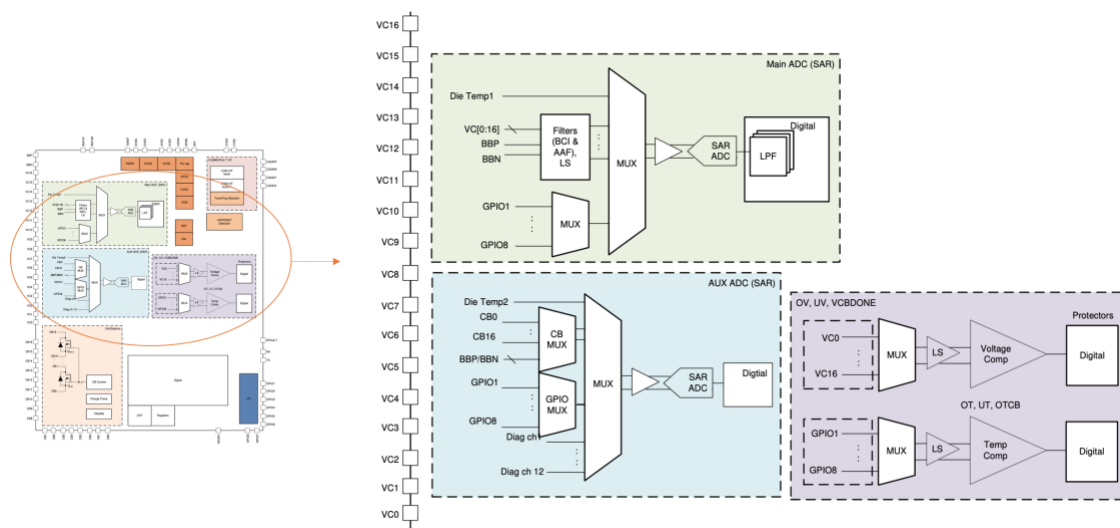


Figura 30. Configuración interna del microcontrolador BQ79616-Q1, sección de mediciones. (Fuente:[32])

El dispositivo incluye un comparador OVUV con umbrales configurables por el usuario. Estos pueden usarse como un protector de segundo nivel para detecciones de sobrevoltaje y subvoltaje de celda, independientemente de las mediciones de ADC.

3.3.3 Implementación de la medición de la temperatura de celdas

La medición de la temperatura de las celdas es necesaria para garantizar el funcionamiento seguro y correcto del paquete de baterías. Hoy en día las principales baterías existentes miden la temperatura a través de uno o más termistores situados a lo largo de la batería.

Para el caso que concierne el presente trabajo se utilizarán termistores del tipo NTC, sensores que disminuyen su resistencia con el aumento de la temperatura.

Los sensores de temperatura NTC están hechos de una mezcla de óxidos metálicos que se someten a un proceso de sinterización que les da una relación negativa de resistencia eléctrica frente a temperatura (R/T) como la que se muestra en la siguiente figura:

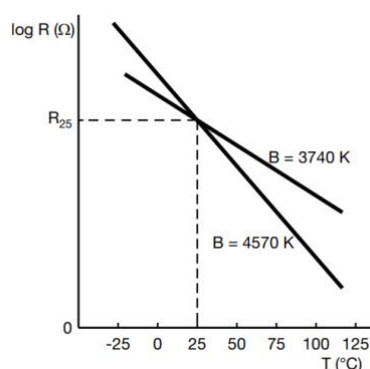


Figura 31. Curva característica del NTC. (Fuente:[33])

La pendiente negativa relativamente grande significa que incluso pequeños cambios de temperatura provocan un cambio significativo en la resistencia eléctrica, lo que hace que el sensor NTC sea ideal para medir y controlar la temperatura con precisión. Las principales características eléctricas de un sensor de temperatura cerámico NTC se expresan mediante tres parámetros importantes y sus tolerancias (ver Tabla 15).

Tabla 12. Constantes para el cálculo del comportamiento de los NTC. (Fuente:[33])

Parámetro	Descripción
R25	Resistencia del sensor en Ω a temperatura de 25 °C
B-valor	Constante del material del sensor, expresada en Kelvin
α	Coefficiente de temperatura de la resistencia expresado en %/K o en %/°C

La resistencia a 25 °C (temperatura ambiente) proporciona un punto de referencia conveniente para los termistores. Las tolerancias en R25 se deben principalmente a variaciones en la fabricación del material cerámico y tolerancias en las dimensiones. Mediante el uso de composiciones de materiales altamente homogéneas y técnicas patentadas permiten un control preciso de las dimensiones de las virutas, haciendo posibles tolerancias en R25 inferiores al 1 %.

B es una constante material que controla la pendiente de la característica RT que puede, al menos en una primera aproximación, ser representada por la siguiente fórmula donde T es la temperatura absoluta del sensor [33]:

$$R_T = R_{25} \exp \left\{ B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15} \right) \right\}$$

En la aplicación de la medición de la temperatura, se utilizará la EVM de Texas Instruments. El NTC LE213E3 del fabricante Vishay, se conecta al microcontrolador por sus GPIOs El diagrama que se muestra a continuación es el circuito para el NTC, donde el TSREF (5V) es la fuente de alimentación para los conectores GPIO.

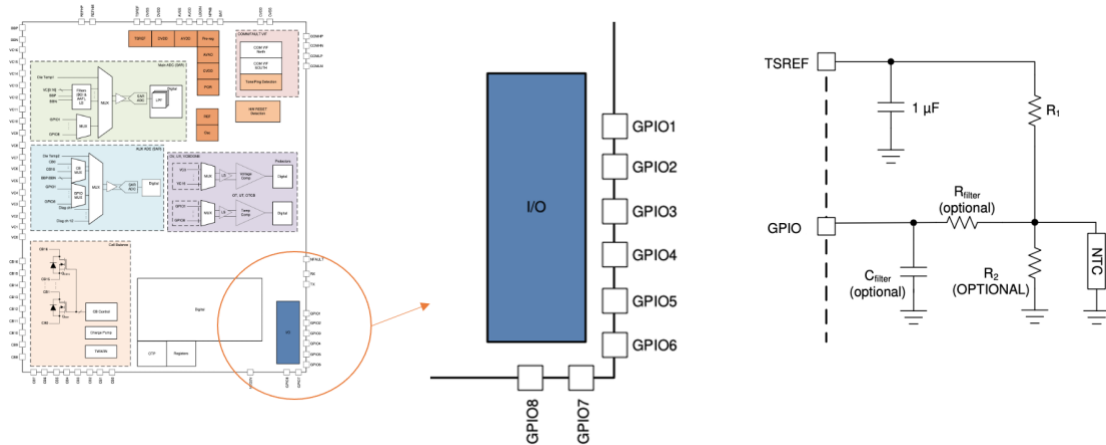


Figura 32. Configuración interna del microcontrolador BQ79616-Q1, sección de los GPIOs. (Fuente:[32])

El dispositivo incluye un comparador OTUT con umbrales configurables por el usuario. Estos pueden usarse como un protector de segundo nivel para detecciones de sobretemperatura y subtemperatura del termistor, independientemente de las mediciones de ADC.

Para la aplicación final no se utilizarán las resistencias ni capacitor de filtrado opcionales. Como se puede observar, el NTC forma un divisor de tensión con R1 (10 kΩ). Esto significa que la señal que recibe el micro (GPIO1 según la figura) es un voltaje que varía con el valor de la segunda resistencia, en este caso el NTC. La resistencia del NTC utilizada para la evaluación de la temperatura de las baterías del proyecto HELIOS a temperatura ambiente es de 10 kΩ. Como se puede observar en las siguientes gráficas el divisor de tensión estará regido por los valores de la NTC.

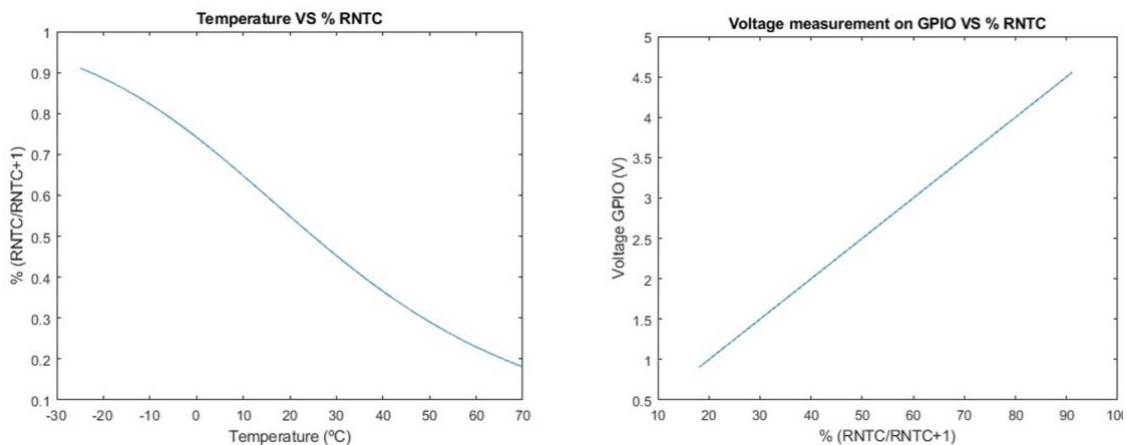


Figura 33. Comportamiento del NTC en función del valor de la resistencia del propio sensor y del voltaje de alimentación.

La medición de la temperatura en la placa de evaluación de TI's se realiza en % en función de la caída de tensión de TSREF de 5V. A partir de la relación del divisor de tensión se obtiene la temperatura para cada caso con los diferentes valores de la resistencia del NTC.

4 Sistema de balanceo para celdas de Alta Potencia y Alta Energía

Una vez definido el circuito de monitorización y supervisión de la batería, como se ha analizado anteriormente, la EVM de TI's cuenta con un corriente de balanceo de sólo 240mA. Con una corriente de balanceo tan baja los requerimientos establecidos en la tabla 15 quedarían fuera de alcance. Por esta razón, se diseñará un sistema de balanceo que sea capaz de operar con corrientes superiores independientemente de las diferentes tecnologías de celdas que se puedan conectar.

El funcionamiento del sistema de balanceado desarrollado es muy sencillo. Todas las baterías tienen un circuito en paralelo como el que se muestra en la Fig. 35. Cuando el MOSFET (Q1) está en conducción cierra el circuito y la celda se descarga sobre la resistencia de disipación (R1), y la resistencia interna que presenta el transistor entre los terminales *drain-source*, aunque sea de muy bajo valor.

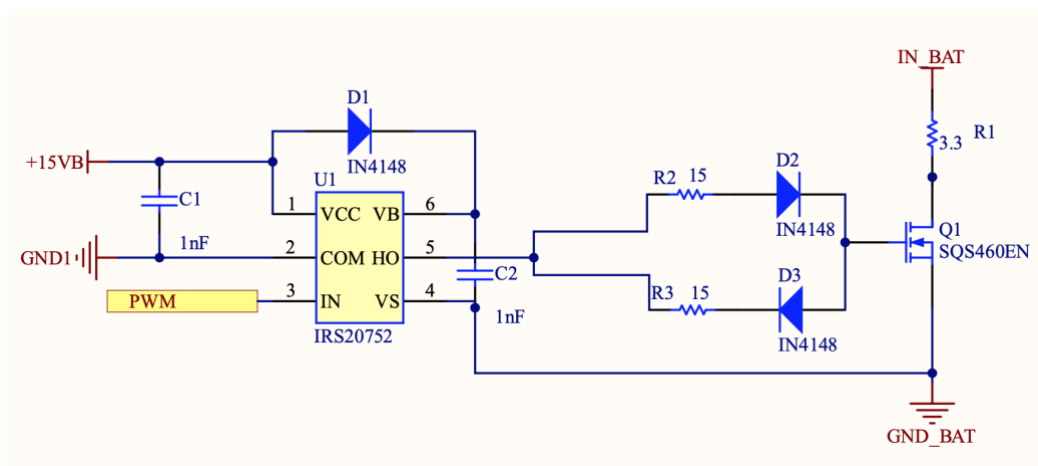


Figura 34. Circuito de descarga de las celdas diseñado.

La configuración de las resistencias R2 y R3 junto con los diodos D2 y D3 respectivamente, se usa para controlar la carga y descarga de las capacitancias internas de entrada y salida en los MOSFETs de potencia, en consecuencia se controla el encendido y el apagado del transistor. Controlar el encendido y apagado ayuda a controlar el ruido y los sobre picos del transistor.

La activación del MOSFET se realiza gracias al controlador de puerta (*gate driver*) IRS20752. El IRS20752 es un circuito integrado de controlador de puerta de un solo canal de lado alto con capacidad de bloqueo y cambio de nivel de 200 V. Esto permite que el controlador de compuerta se conecte directamente a la compuerta de un MOSFET del lado izquierdo, mientras es controlado por el circuito de lado derecho. El IRS20752 incluye un amplio rango de suministro de VCC, protección a sobretensiones y excelente inmunidad a entornos de conmutación. La tecnología HVIC de IR permite que estas funciones y características se realicen en un paquete SOT-23 de 6 pines [34].

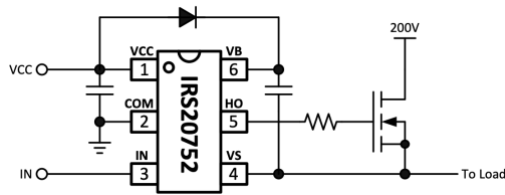


Figura 35. Controlador de puerta de los transistores IRS20752. (Fuente:[34])

Los capacitores C1 y C2 vienen definidos por la hoja de datos (veáse figura 35) del propio controlador de puerta y sirven para absorber sobretensiones en caso de haberlas. Respecto los elementos del propio circuito de descarga de la celda, se detallarán en la próxima sección, la 4.1, que trata sobre el dimensionado de los componentes del circuito de balanceo.

La placa de balanceo diseñada se controlará a partir de la información recogida por la EVM y su microcontrolador BQ79616-Q1, ya que el funcionamiento del mismo es conocido y permite un rápido monitoreo de las tensiones de las celdas y de la temperatura del pack de celdas. El sistema de balanceo de alta potencia será controlado por un STM32 F446.

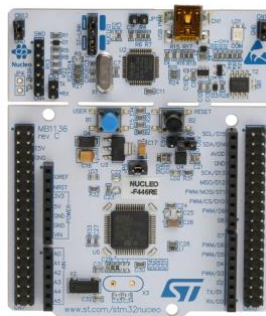


Figura 36. Placa de desarrollo con microcontrolador STM32F446. (Fuente:[35])

Con el STM32 se generan las señales de control PWM para la conmutación de los MOSFETs y descargar las celdas que convenga para el equilibrio del pack de baterías. De esta manera el control del sistema de balanceo desarrollado se realiza de forma paralela a la monitorización de datos. Es decir, a partir de los valores de las tensiones de celdas, se decide cuales es necesario equilibrar.

El control se realiza con un PWM porque con este tipo de señal se puede modificar la corriente media que llega a las celdas mediante la frecuencia y el ancho de pulso generado. También existe la posibilidad de, teniendo en cuenta los casos de uso que presenta una batería de un EV (carga, descarga, frenado/regenerativo y estacionamiento), establecer un valor determinado de corriente de equilibrio adecuada para cada caso. La figura 38 presenta la arquitectura final del prototipo, integrando el sistema de monitorización y el sistema de balanceo diseñado.

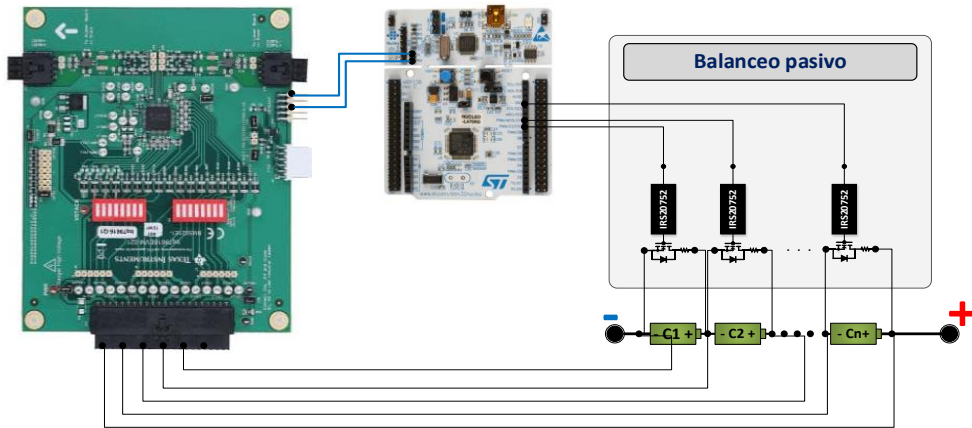


Figura 37. Configuración del BMS diseñado para el proyecto

La programación del PWM con el STM32 se realiza con el IDE (interfaz de desarrollo) STM32CubeMX. El STM32Cube es un conjunto de herramientas gratuito que permite la implementación rápida de proyectos en la plataforma STM32. Este programa posee una interfaz gráfica que permite generar el código para inicializar los componentes necesarios. Además, una vez seleccionados los componentes que se quieren habilitar, genera el código automático necesario para la configuración elegida ya sea en lenguaje C o C++ [36].

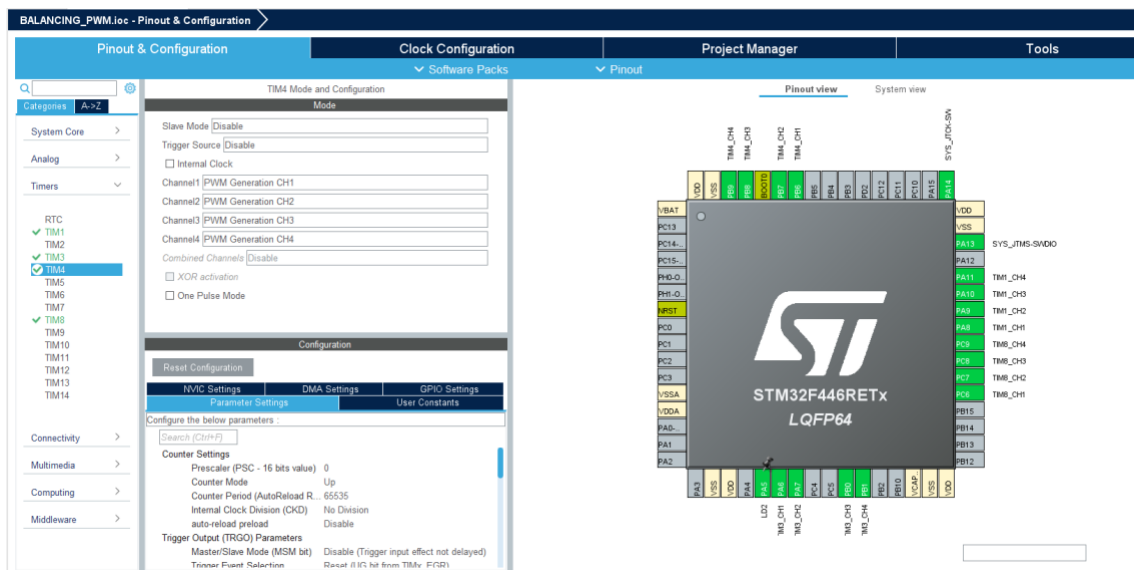


Figura 38. Pantalla de inicio STM32CubeMX

Para la configuración de la señal PWM se utiliza la función de temporizador (TIMER). Para la aplicación se utilizará el TIMER3, el cual posee un *prescaler* y un *counter period*. Para calcular la frecuencia de la señal PWM y ajustar el período de conmutación del transistor se puede calcular la frecuencia con la siguiente ecuación:

$$f = \frac{Clock}{(prescaler + 1) * (counter + 1)}$$

Donde f es la frecuencia de la señal PWM, y clock es la frecuencia del reloj del microcontrolador. Se ha escogido un valor de clock de 90MHz, el máximo que ofrece el microcontrolador para obtener todas las configuraciones de frecuencia posibles.

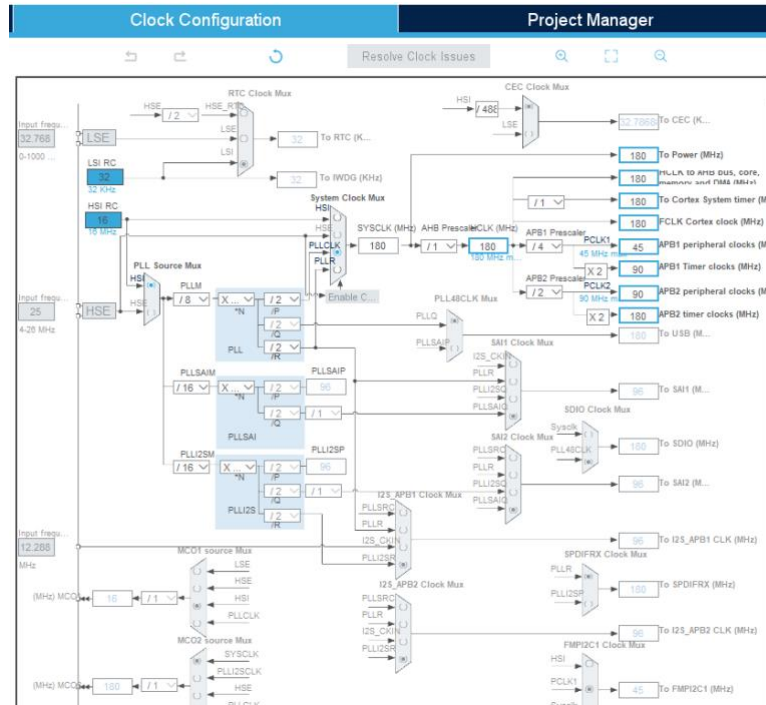


Figura 39. Configuración del reloj del microcontrolador

La configuración de las 16 señales PWM necesarias para el control de los MOSFET se realiza con los TIMER 1, TIMER 3, TIMER 4, TIMER 8. Cada uno de ellos cuenta con 4 canales, los cuales ofrecen diversas configuraciones, pero para la aplicación que interesa en el prototipo se configuran como *PWM Generation Channel*, tal y como muestra la Fig. 39.

4.1 Modelado y simulación

El sistema de balanceo de celdas pasivas descrito anteriormente ha sido diseñado y probado a través de simulaciones para observar el comportamiento del sistema considerando las condiciones del proyecto HELIOS. Previamente para poder simular el sistema de balanceado se ha desarrollado también la simulación de las celdas con el fin de obtener una simulación del proceso de balanceado con un comportamiento de celdas lo más realista posible. Esta sección muestra los resultados preliminares obtenidos de las simulaciones de este método pasivo desarrollado en MATLAB/Simulink/Simscape.

4.1.1 Modelo de celdas

En el diseño del sistema de balanceo de celdas es importante contar con un modelo de celda para definir la función y operación de estos sistemas.

El modelado de baterías tiene un impacto significativo en el logro de un valor de SoC preciso, debido al complejo entorno electroquímico y dinámico, la definición de un modelo de batería está sujeta varios parámetros. Es ampliamente conocido que cada celda tiene sus propias características específicas y depende del proceso de fabricación. Aunque todas las celdas tienen características diferentes, las celdas siguen un patrón que podría describirse a través de un modelo. Por lo tanto, a continuación se explican los modelos de aproximación que pueden ser utilizados para la implementación del balanceo de celdas.

Se pueden definir tres tipos de modelos de celdas de litio: modelos electroquímicos, modelos empíricos y modelos de circuitos equivalentes [37]. Por un lado, los modelos electroquímicos son ideales para describir las reacciones internas de las células y el proceso de envejecimiento mediante el uso de ecuaciones diferenciales. Por otro lado, los modelos empíricos describen las características de las células en base a múltiples fórmulas. Este tipo de modelos suelen tener menos precisión. Además, existen modelos equivalentes que utilizan circuitos eléctricos para simular el comportamiento de la celda. Un modelo de celda con una serie de fuentes de voltaje constante conectadas con una resistencia interna es el modelo de celda más simple. Sin embargo, este modelo es menos efectivo para analizar el desempeño dinámico de cualquier celda. Por lo tanto, se pueden completar modelos de circuitos equivalentes de 2 RC o 3 RC, como se muestra en la Fig. 43, para simular los efectos dinámicos y lograr una mejor aproximación del comportamiento de la celda [38].

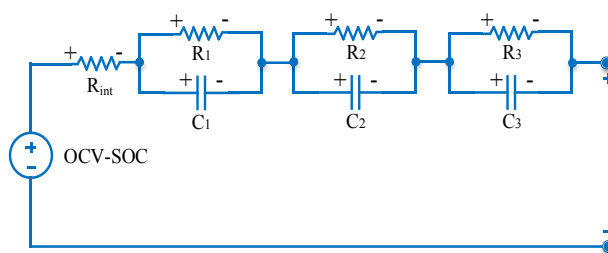


Figura 40. Modelo eléctrico de celda basado en OCV-SoC como fuente de tensión y resistencia interna.

El modelo eléctrico de celda equivalente de la Fig. 40 está definido por los siguientes componentes:

- Fuente de voltaje: esta es la fuente de voltaje continuo que representa el voltaje OCV basado en SoC.
- R_{int} : representa la resistencia interna de las celdas.
- R y C paralelos: los circuitos R y C paralelos se utilizan para modelar las etapas transitorias de la celda. Se pueden conectar N veces un circuito paralelo de R y C para caracterizar todos los efectos transitorios requeridos.

El uso de un modelo complejo que tenga en cuenta las etapas transitorias podría aumentar la dificultad en el análisis de técnicas de balanceo de celdas a través de simulaciones. Por lo tanto, el circuito eléctrico equivalente simplificado a la fuente de voltaje y la resistencia interna del OCV-SoC, como se muestra en la Fig. 41 (a), se usa para el análisis de las técnicas de balanceo de celdas.

Para las simulaciones de las diferentes celdas se han escogido las celdas Toshiba SCIB 20Ah para HP, Samsung 18560-25R y Farasis P73 para HE debido a la disponibilidad de información incluso posibilidad de suministro. El rango de voltajes de trabajo respectivamente son 2,7V – 1,5V y 4,2V – 2,7V como se detalla en la Tabla 14.

En esta primera etapa de diseño del sistema de balanceo de celdas se obtienen las curvas características OCV-SoC a partir de las fichas técnicas de las celdas. La fuente de voltaje OCV-SoC y la resistencia interna se implementaron en MATLAB/Simulink/Simscape, como se muestra en la Fig. 42 (b), para comenzar el estudio de diferentes técnicas de balanceo de celdas.

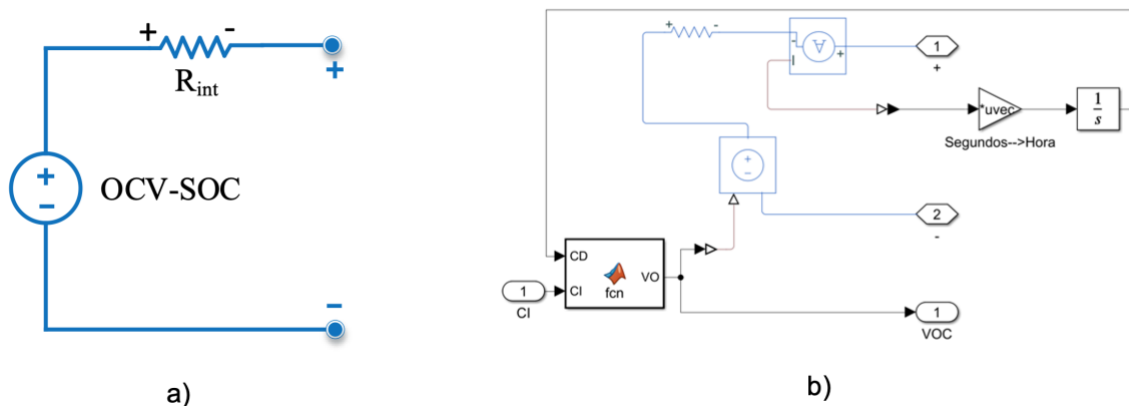


Figura 41. Modelo de ejemplo utilizado para el diseño y simulaciones del sistema de balanceo. a) Modelo de celda simplificado. b) Modelo de celda simplificado implementado en Simscape.

Para validar el modelo simplificado, se introdujeron los parámetros de datos de la curva característica OCV-SoC de celdas. Las simulaciones se realizaron considerando una resistencia interna constante para todos los valores de SoC. Los resultados se muestran en la Fig. 42, la Fig. 43 y Fig. 44.

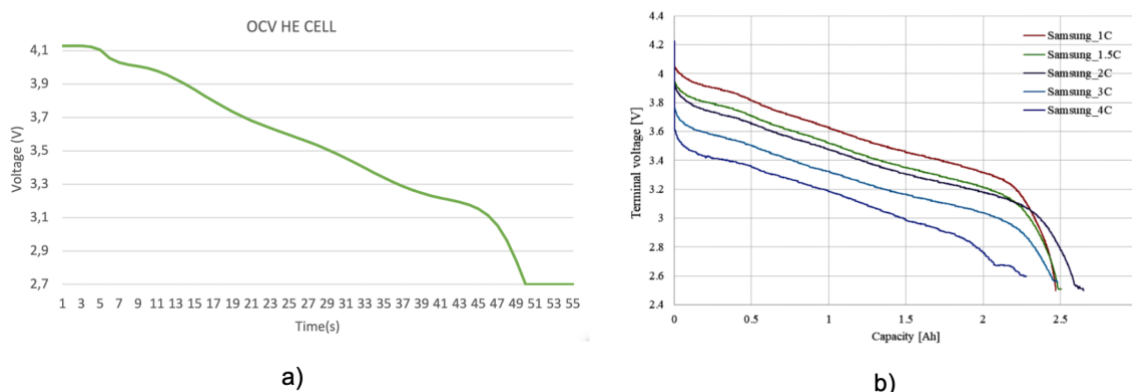


Figura 42. Curva OCV para las celdas Samsung 18650-25R a 1C y 25 °C (Celda de alta energía). a) Modelo de simulación. b) Curva característica de la hoja de datos del fabricante.

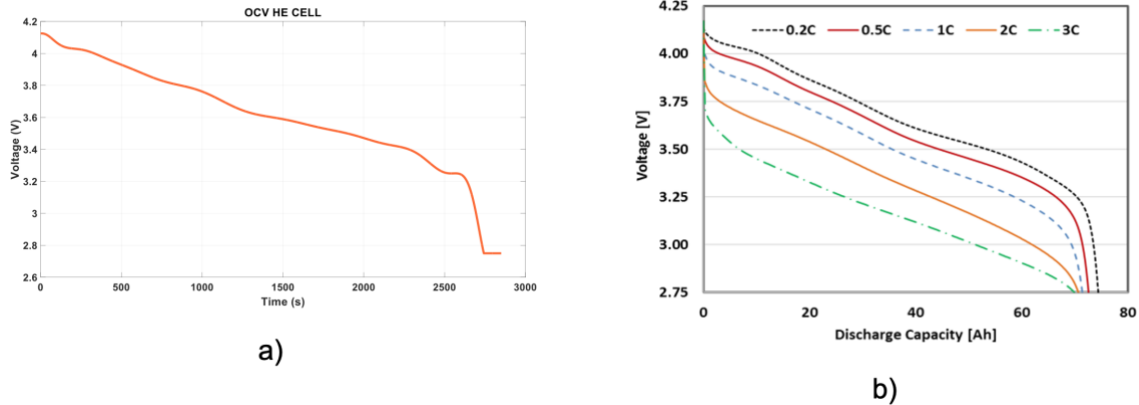


Figura 43. Curva OCV para las celdas Farasis P73 a 1C y 25 °C (Celda de alta energía). a) Modelo de simulación. b) Curva característica de la hoja de datos del fabricante.

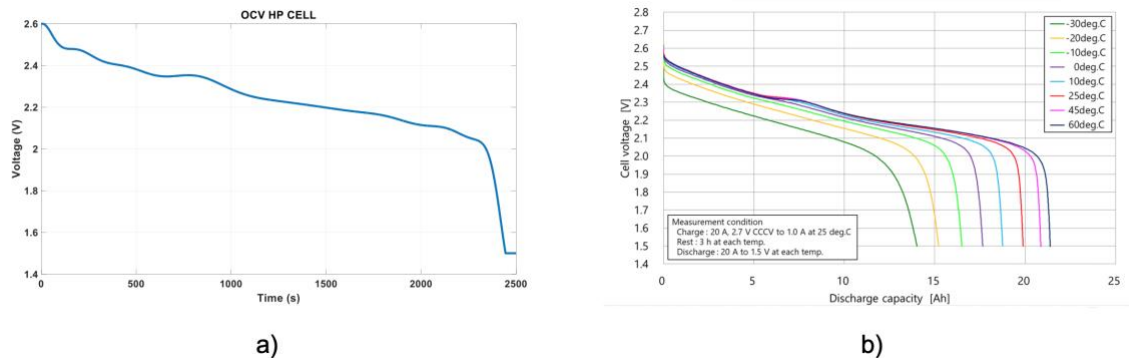


Figura 44. Curva OCV para las celdas Toshiba SCIB 20Ah a 1C y 25 °C (Celda de alta potencia). a) Modelo de simulación. b) Curva característica de la hoja de datos del fabricante.

En la Fig. 42, Fig. 43 y la Fig. 44, el modelo de celda propuesto tiene una buena aproximación entre las curvas OCV obtenidas de las simulaciones y las hojas de datos de la celda. Esta aproximación es suficiente para proceder a analizar el comportamiento del sistema de balanceado de celdas diseñado.

4.1.2 Simulación del sistema de balanceo desarrollado

La sección anterior presenta el modelo de celda básico utilizado para simular las curvas de operación de la celda. El modelo permite la conexión de celdas en serie/paralelo para diseñar un paquete de baterías. El software Simscape permite realizar bloques para organizar los componentes del sistema, lo que permite diseñar sistemas complejos; esta opción de software y lenguaje se utilizó para desarrollar los modelos de equilibrado de celdas.

La simulación presentada en este documento se desarrolló utilizando un modelo que conecta celdas en una configuración 6s1p, como se muestra en la Fig. 45. El primer paso fue caracterizar el modelo de balanceo pasivo y diseñar el control general para evaluar el balanceo de celdas.

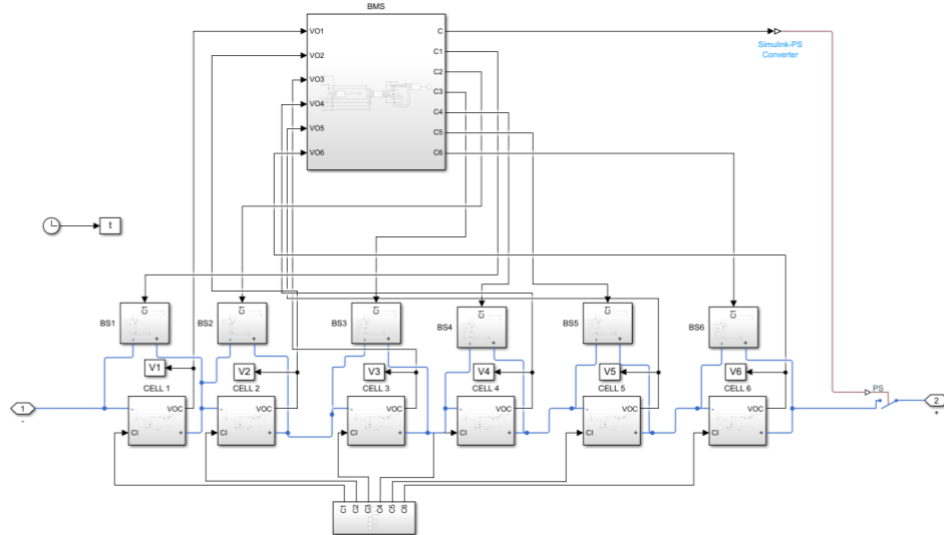


Figura 45. Balanceado pasivo implementado en Simscape con batería 6s1p.

En el circuito de balanceo implementado, que se muestra en la Fig. 45, solo se estudiaron seis celdas porque el rendimiento del balanceo pasivo no depende del número de celdas en serie. El bloque BMS tiene funciones lógicas para activar/desactivar el sistema de equilibrado. Este bloque lee los voltajes de las celdas y activa cada circuito de equilibrio cuando es necesario. Además, este bloque también detiene la operación cuando todas las celdas están balanceadas. El bloque de equilibrio consta de una resistencia y una conexión de interruptor para cada celda.

Para desarrollar el análisis y control de los interruptores se establecieron unos algoritmos básicos. La Fig. 46 muestra un ejemplo del algoritmo diseñado para probar la configuración del modelo 6s1p y 6s2p .

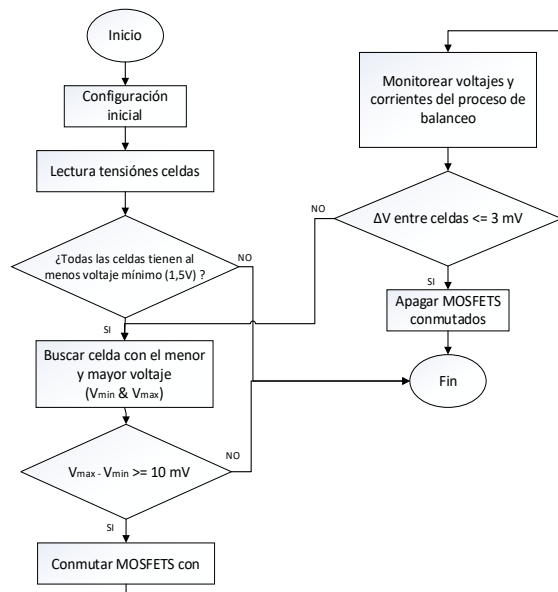


Figura 46. Algoritmo de control básico para el balanceo pasivo diseñado

Se definió un modelo adicional para estudiar la configuración 6s2p con el fin de analizar el comportamiento de celdas conectada en paralelo. La Fig. 47 muestra el modelo desarrollado para la evaluación de 6s2p.

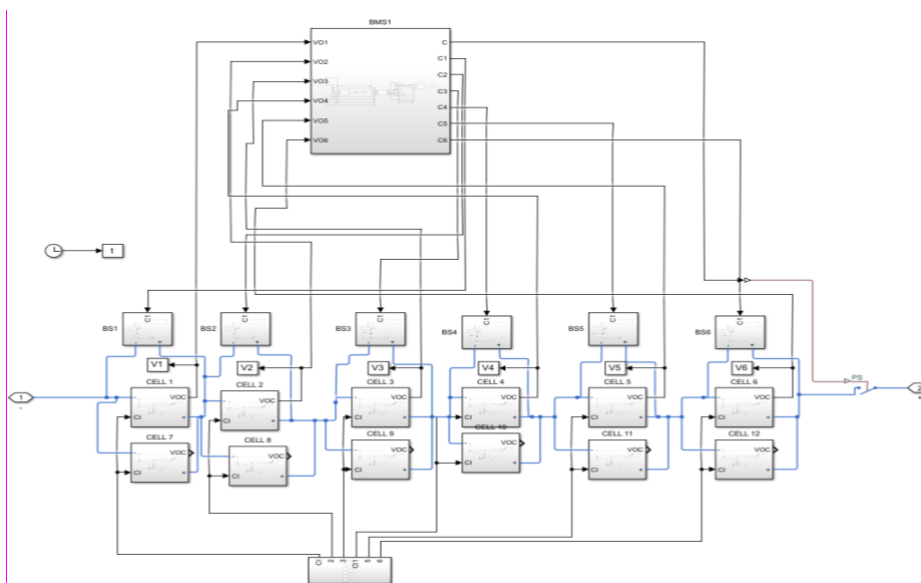


Figura 47. Balanceado pasivo implementado en Simscape con batería 6s2p.

Se ajustó el modelo de balanceo pasivo y se realizaron simulaciones para evaluar diferentes valores de resistencias de disipación y analizar la corriente y tiempo de balanceo. Estas simulaciones utilizaron interruptores ideales, y se desarrolló una función de *live script* de MATLAB para crear los controles de señal obtenidos de la aplicación del algoritmo propuesto en la Fig. 46. Finalmente, esta simulación consideró una diferencia en SoC del 5% para que el balanceo se detuviera. La Fig. 48 a) y la Fig. 48 b) muestran las tendencias de equilibrio para las configuraciones 6s1p y 6s2p.

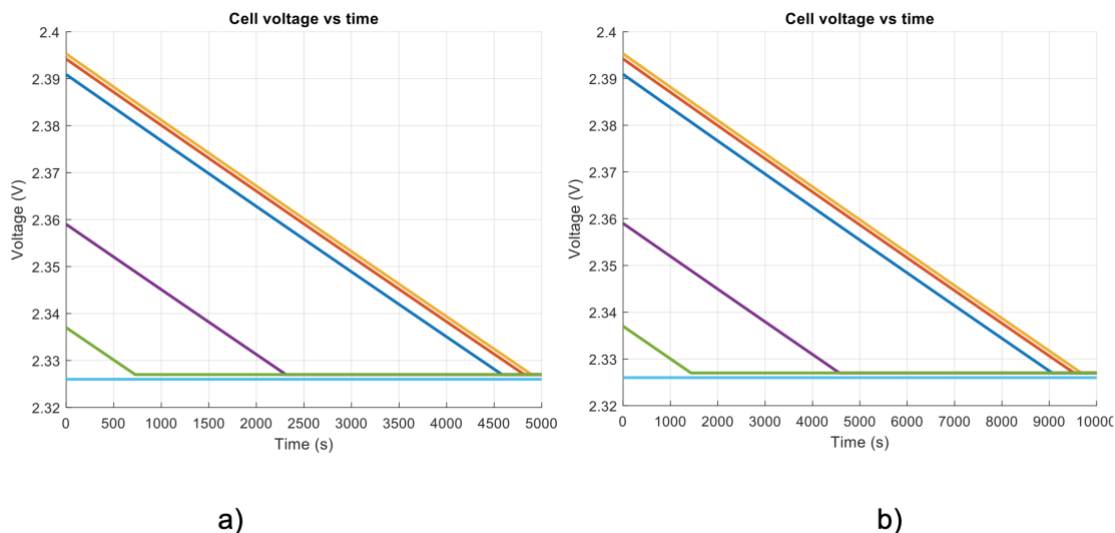


Figura 48. Resultados de las simulaciones del sistema de balanceado con celdas Samsung 18650-25R. a) Resultados con configuración 6s1p b) Resultados con configuración 6s2p

Como se muestra en estas figuras, todas las celdas alcanzan el voltaje de referencia (línea azul claro) en 1,3 horas para la configuración 6s1P y 2,7 horas para la configuración 6s2P. Como era de esperar, el tiempo de equilibrio para dos celdas en paralelo es aproximadamente el doble que para una celda. Para analizar mejor este efecto, la Fig. 49 (a) muestra la corriente de equilibrio y la Fig. 49 (b) la potencia respecto a la resistencia utilizada.

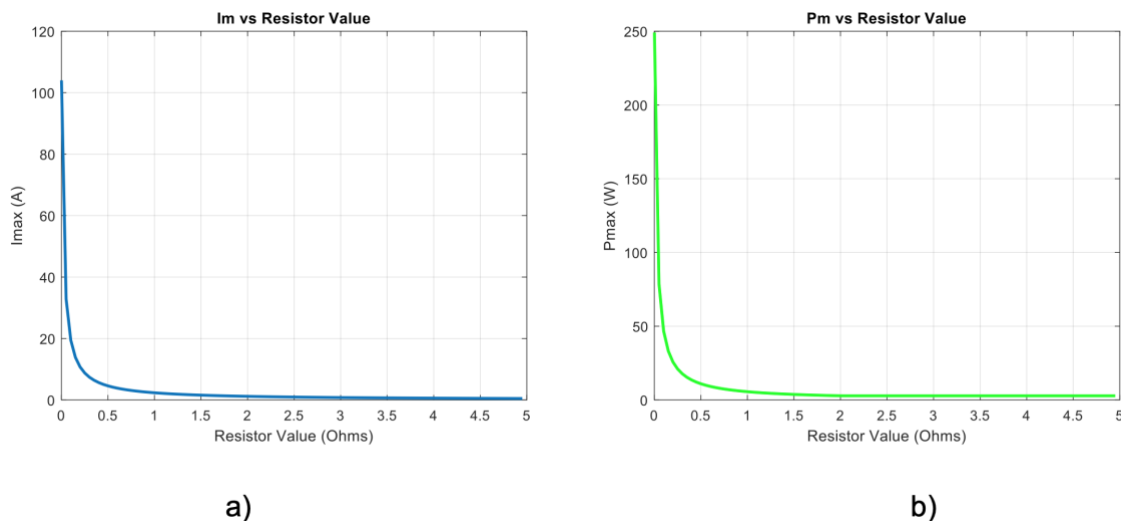


Figura 49. Variaciones del valor de resistencia en función de la potencia. a) Corriente versus resistencia. b) Potencia versus resistencia.

Como se muestra en la Fig. 49 a), los valores de corriente y potencia disipada tienen un comportamiento exponencial para valores bajos de resistencia. Además, la resistencia de derivación puede considerarse irrelevante a partir de un valor específico (2,5 Ω para este caso), ya que a partir de este valor la potencia disipada puede considerarse constante.

4.2 Dimensionado y elección de componentes del circuito de equilibrado diseñado

A continuación se encuentra el dimensionado de los componentes y la selección a partir de los cálculos realizados. El parámetro clave en el balanceado pasivo es el valor de la resistencia de disipación ya que en consecuencia de este valor, varía la corriente de equilibrado así como la potencia y calor generado en la misma resistencia.

Para estudiar los valores de resistencia posibles, será necesario previamente asegurar que se cumplan los criterios de balanceo establecidos anteriormente en la sección 3.2. El rango de valores de la resistencia se determinará teniendo en cuenta los casos límite que se dan cuando las celdas están cargadas al máximo y cuando llegan al voltaje mínimo de trabajo con el fin de no dañarlas. Si se estudia el peor de los casos posibles, el mayor porcentaje de SoC a balancear en el paquete de baterías es del 5%. También se tendrá en cuenta el criterio de la máxima potencia para la resistencia de disipación (10W).

Para el cálculo de la resistencia se tendrá en cuenta los casos límite de trabajo de las celdas. La Tabla 16 muestra las cuatro posibles opciones que presentan los valores máximos y mínimos de tensión de las celdas:

Tabla 13. Tensiones máximas y mínimas de las celdas.

	Celdas Alta Energía	Celdas Alta Potencia
Vmax (V)	4,2	2,75
Vmin (V)	2,7	1,5

Por lo tanto, el sistema de balanceo diseñado debe ser capaz de equilibrar celdas en un rango de voltajes de 1,5 V hasta 4,2 V.

A continuación se realizan los cálculos para las celdas de alta potencia Toshiba SCIB 20Ah. Los mismos cálculos se aplican también para las celdas de HE, Farasis IMP14294100P73 y Samsung INR18650-25R, ya que ambas celdas cuentan con los mismos valores de tensión frontera.

- **Valor máximo de la resistencia de descarga de celdas**

El valor máximo de la resistencia está definido por el criterio del tiempo máximo de balanceado de 5 horas (véase Tabla 14). Considerando que los módulos de H.P tienen una configuración de 2 celdas en paralelo según la Fig. 26, el 5% del SoC significa que se debe corregir 2Ah [(20A+20A) * 0,05], considerando esto, la corriente mínima de balanceado se puede definir como:

$$I_{min} (A) = \frac{2Ah}{5h} = 0,4A$$

Para lograr la corriente de equilibrio mínima en cualquier rango de voltaje de la celda, los valores mínimos de voltaje presentan el caso más desfavorable, con este valor se puede definir el valor máximo de resistencia

$$\text{Valor máximo de resistencia } (\Omega) = \frac{1,5V}{0,4A} = 3,75\Omega$$

Para las celdas de HE, considerando que los módulos de H.E tienen una configuración de una celda en paralelo el 5% del SOC significa que se debe corregir 3,65Ah (73A * 0,05), para las celdas de Farasis. Y 0,13 Ah (2,6A*0,05) para las celdas de Samsung, considerando esto, la corriente mínima de equilibrio se puede definir:

$$I_{min_{Farasis\ P73}}(A) = \frac{3,65Ah}{5h} = 0,73A \quad I_{min_{Samsung\ 18650-25R}}(A) = \frac{0,13Ah}{5h} = 0,026A$$

$$\text{Valor máx. res. Farasis P73 y Samsung 18650-25R } (\Omega) = \frac{2,7V}{0,73A} = 3,699\Omega$$

- **Valor mínimo de la resistencia de descarga de celdas**

El valor mínimo de la resistencia está definido por el criterio de la máxima potencia disipada de 10W. El peor caso posible es cuando la celda está completamente cargada, el voltaje de la celda en ese punto es máximo, en consecuencia, si la potencia disipada es limitada, la resistencia tiene un valor mínimo.

$$\text{Valor mínimo de resistencia } (\Omega) = \frac{(2,7V)^2}{10W} = 0,729\Omega$$

Se aplica el mismo cálculo para las celdas de alta energía:

$$\text{Valor mínimo de resistencia } (\Omega) = \frac{(4,2V)^2}{10W} = 1,764\Omega$$

El rango de valores de resistencia adecuados para las celdas de HE y HP entra en una horquilla que tiene como límites 3,699 Ω y 1,764 Ω .

Tabla 14. Tabla resumen de los resultados de los cálculos eléctricos.

	Celdas HP	Celdas HE
I_{min} (A)	0,4	0,026 - 0,73
R_{max} (Ω)	3,75	3,699
R_{min} (Ω)	0,729	1,764

Como se puede observar los valores de resistencia son muy similares por lo que es posible utilizar el mismo circuito de balanceado para las diferentes tecnologías de batería (alta potencia y alta energía), salvando las diferencias de rangos de voltajes.

La parte relacionada con el control de la puerta del MOSFET se ha comentado anteriormente en el apartado 4, y en este capítulo de la memoria se detallan los componentes implicados directamente en la descarga de la celda, que son la resistencia de disipación y el MOSFET.

El MOSFET seleccionado a partir de los cálculos anteriores es el SQS460EN de Vishay. Este transistor es de canal N y soporta hasta 60V y 175 °C. Cuenta con la certificación AEC-Q101 y está diseñado para ser utilizado en la automoción [39]. La resistencia que presenta entre D-S (*Drain-Source*) es de tan sólo 0,036 Ω , lo cual significa que prácticamente no modifica el valor de la resistencia global del circuito de descarga de las

celdas. La resistencia de disipación escogida es de tipo SMD y tiene un valor resistivo de $3,3 \Omega$ y soporta hasta 20W [40].

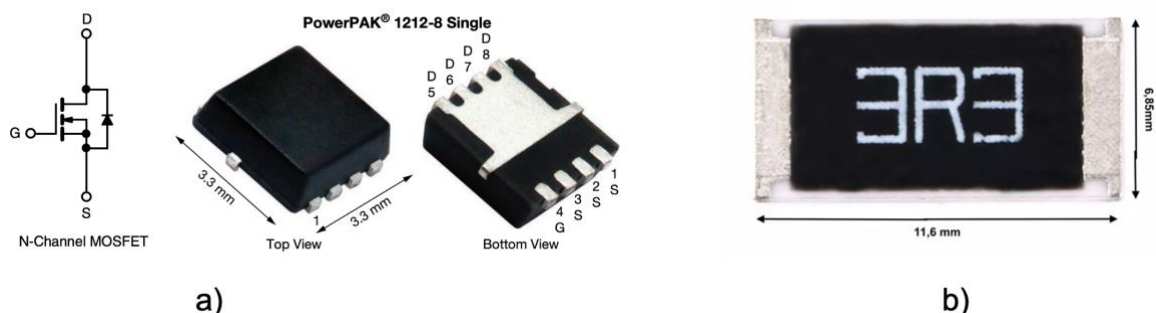


Figura 50. MOSFET y resistencia para el sistema de balanceado diseñado. a) MOSFET SQS460EN de Vishay. b) Resistencia de disipación de 3,3 Ohmios. (Fuentes: [39],[40])

Para el desarrollo del prototipo de laboratorio se utilizará la resistencia presentada anteriormente ya que se cuenta con ella en el laboratorio de MCI, pero el MOSFET será un modelo distinto al SQS460EN debido a problemas logísticos. El transistor utilizado para el prototipo será el IRFBG20 de Vishay. Se caracteriza por ofrecer una conmutación rápida, diseño de dispositivo resistente y baja resistencia.

El paquete TO-220AB se prefiere universalmente para todas las aplicaciones comerciales e industriales a niveles de disipación de energía de hasta aproximadamente 50 W.

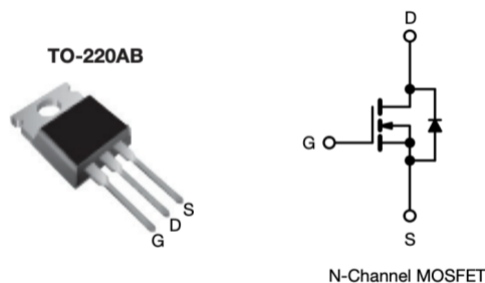


Figura 51. MOSFET utilizado para el prototipo de laboratorio. (Fuente: [41])

A continuación se encuentra el esquema eléctrico del circuito final de balanceado así como el diseño 3D realizados con el software *Altium Designer* :

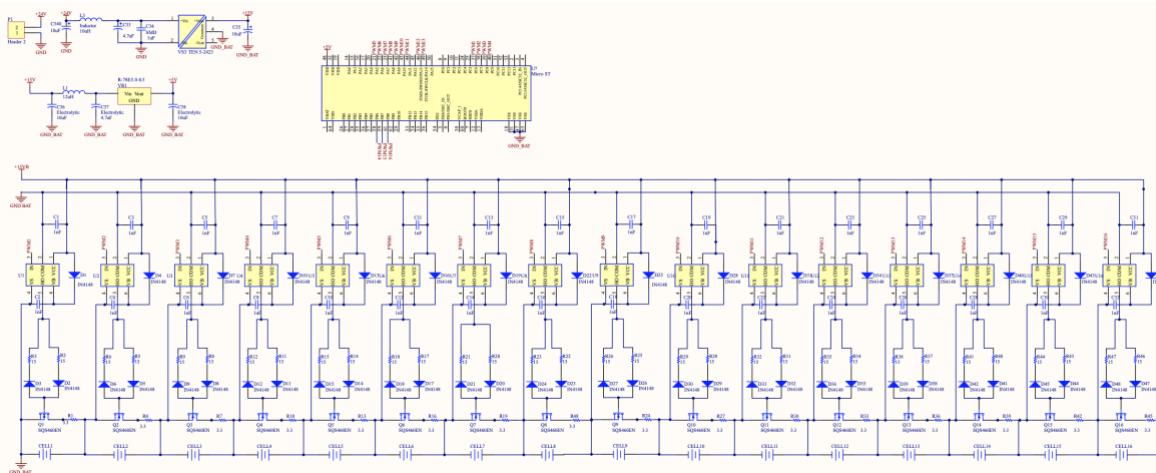


Figura 52. Esquemático del circuito de balanceado diseñado.

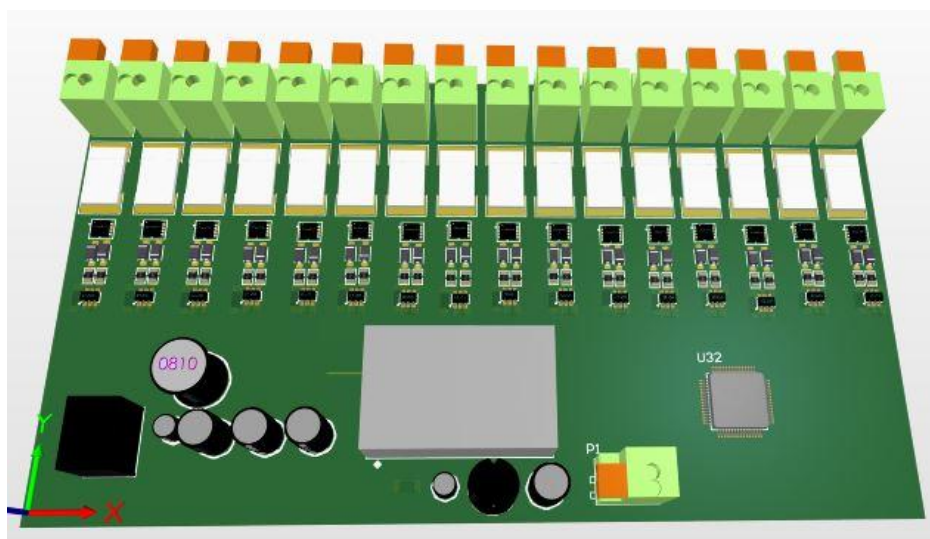


Figura 53. Visualización 3D de la PCB del sistema de balanceado desarrollado.

Después del diseño del circuito de balanceado se procede su simulación para corroborar el correcto funcionamiento de los componentes y que el sistema cumpla con los criterios de balanceado establecidos anteriormente en la Tabla 14.

4.3 Montaje experimental y verificación en laboratorio

En esta sección se detalla la explicación del sistema de supervisión, monitorización y balanceado de la batería desarrollado en el laboratorio. El primer punto a realizar es la lectura de tensiones de celdas y temperatura para posteriormente implementar el balanceo de celdas correctamente y de forma segura.

Como se muestra en la Fig. 54, los componentes empleados para este primer paso es la placa de evaluación de Texas Instruments, la EVM con el microcontrolador BQ79616-Q1. Esta placa como se ha comentado anteriormente, permite la monitorización de la batería y con el software específico que provee el fabricante, la supervisión de todos los datos de las celdas rápidamente.

Además de las pruebas de medición de voltajes y de temperatura, se han realizado diversas pruebas con la EVM y su balanceado mediante los FETs internos de su microcontrolador. Posteriormente se ha comparado con el sistema de balanceado diseñado. En la Fig. 55 se encuentra el montaje experimental del sistema:

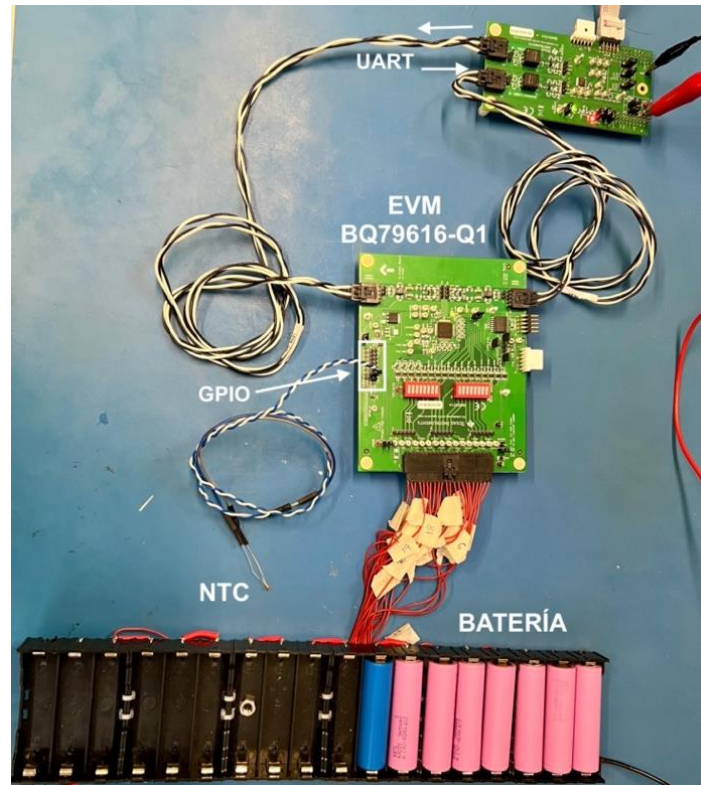


Figura 54. Prototipo de laboratorio con la EVM BQ79616-Q1.

Para el caso de la figura 55 se conectó una celda con menos capacidad que las demás (celda de color azul, CELL 1 en el gráfico), que tan sólo es capaz de almacenar 1500 mA mientras que las Samsung INR1865-25R cuentan con una capacidad de 2500 mA. Los límites de trabajo que se establecieron para la prueba fueron de 4,250 V (*Over Voltage – OV*) y 3,1 V (*Under Voltage – UV*). Como era de esperar la celda 1 se descargó más rápido que las demás y llegó más rápido que las demás a la tensión final de equilibrado. La tensión objetivo para todas las celdas se estableció en 3,5 V. En la siguiente imagen se puede observar cómo se detiene el proceso de balanceado:

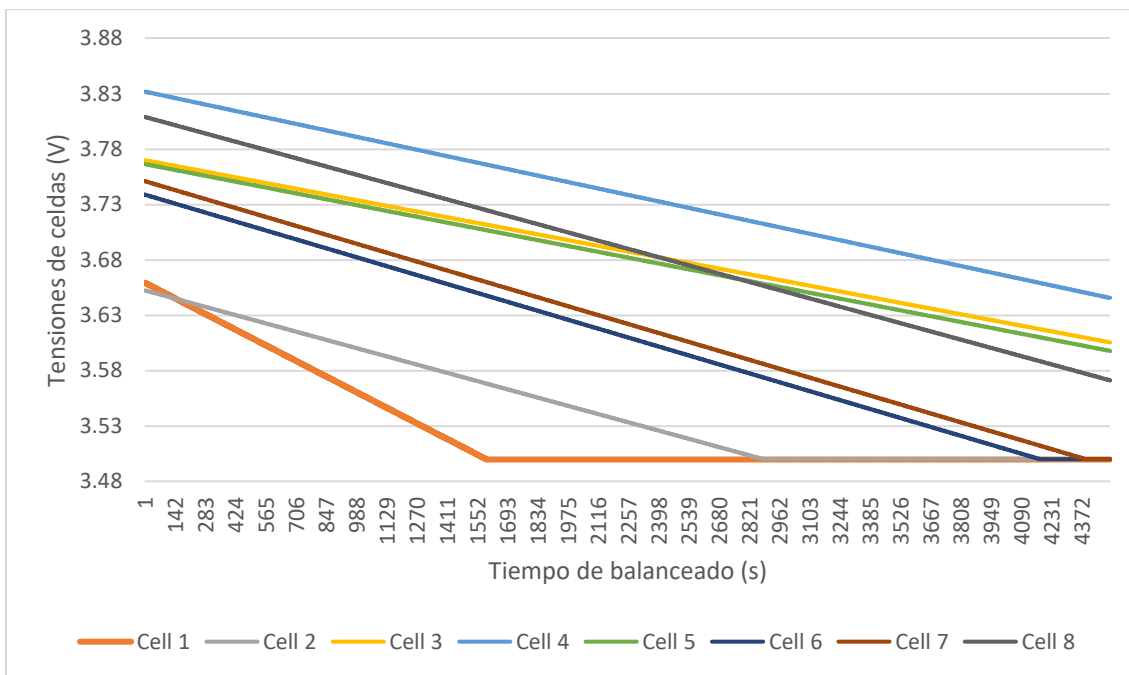


Figura 55. Primera prueba de laboratorio con el balanceado integrado de la EVM BQ79616-Q1.

Se realizaron diversas pruebas con la EVM para comprobar el funcionamiento de su monitorización. Por ejemplo en el caso de la Fig. 56, la celda que presenta mayor carga es la número 3, inicialmente a 3,685 V. La tensión objetivo de equilibrado de todas las celdas para esta prueba se estableció en 3,6V.

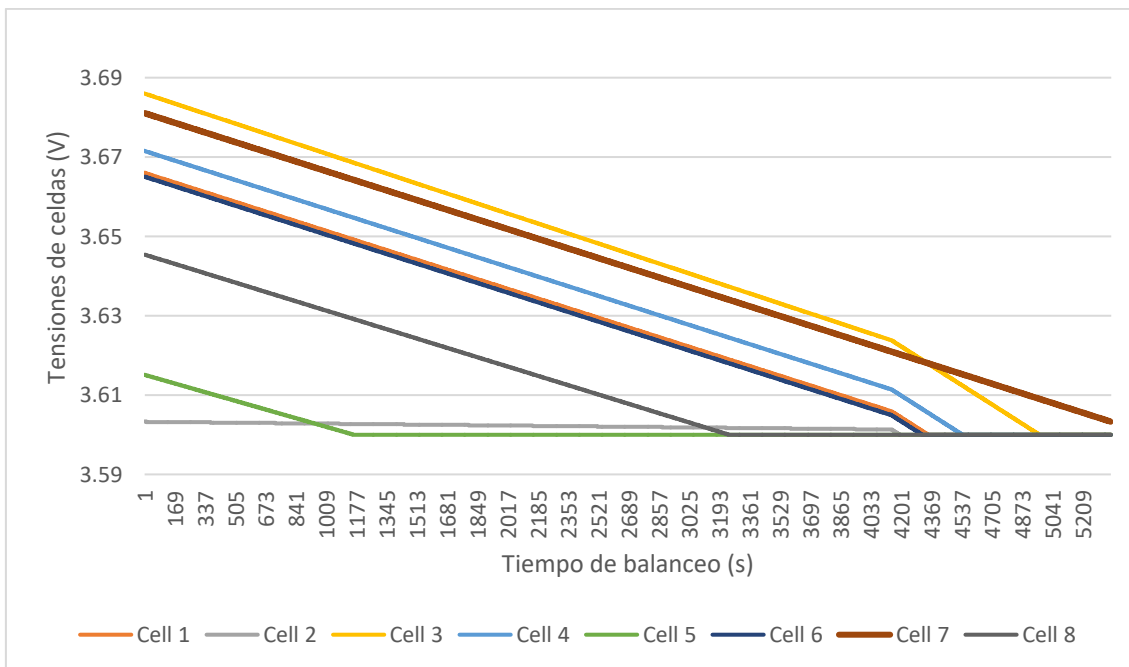


Figura 56. Segunda prueba de laboratorio con el balanceado integrado de la EVM BQ79616-Q1.

Como muestra la gráfica de tensiones, la celda 3 se descarga y pasa de los 3,685 V iniciales a tan sólo 3,6 V en aproximadamente 4900 segundos, lo que equivale a 81,7 minutos. En ese tiempo tan sólo es capaz de descargar la celda y obtener finalmente una diferencia de tensión de sólo 0,085 V.

Debido a la baja corriente de balanceo que proporciona el sistema de balanceado interno del BQ79616-Q1, los tiempos de balanceado de celdas pueden ser extremadamente largos, por este motivo se realiza el sistema de balanceado capaz de equilibrar las celdas con mayor potencia y reducir los tiempos de balanceado.

En la Fig. 58 se puede observar el montaje del prototipo de laboratorio con el sistema de balanceado controlado con el STM32, y un único bloque de balanceado de celda:

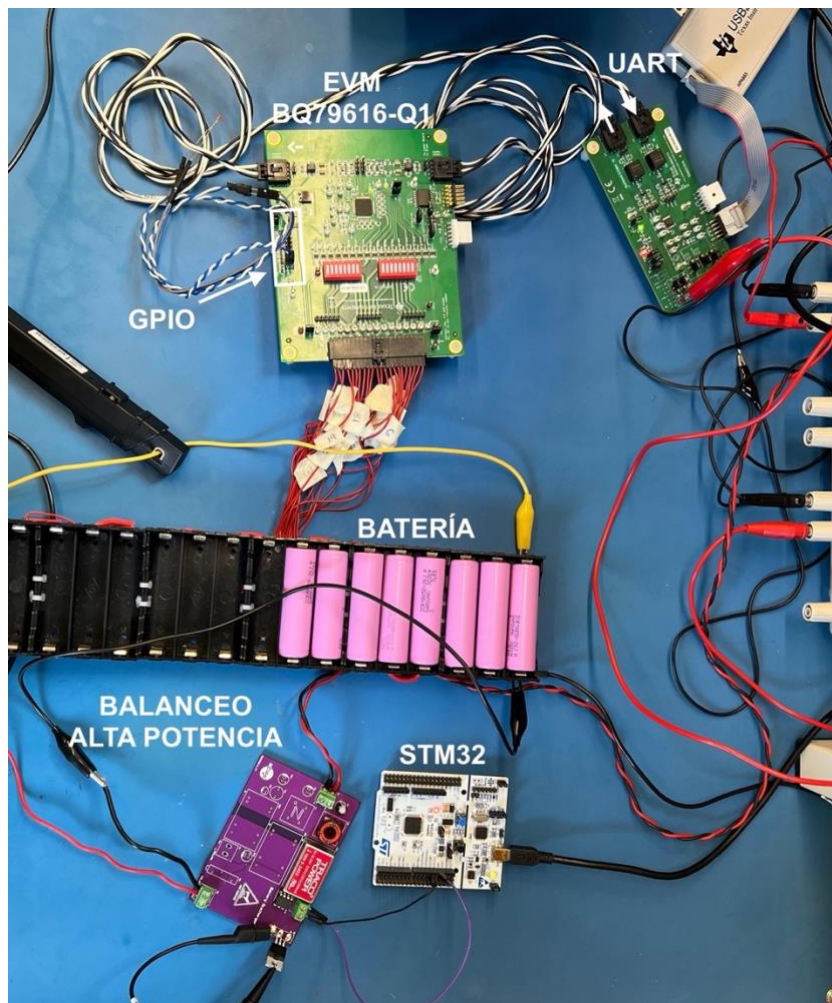


Figura 57. Montaje del prototipo final de laboratorio con el sistema de balanceo diseñado y la EVM BQ79616-Q1 como circuito monitor.

La finalidad del circuito de balanceado diseñado es que sea útil tanto para celdas de alta energía como para celdas de alta potencia. Como se ha visto en la sección 3.1, los parámetros significativos para el control del sistema de balanceo, son las tensiones de trabajo que presentan las dos tecnologías de celdas, estas tensiones se recogen en la Tabla 16, mostrada anteriormente.

Las siguientes pruebas se realizaron con una fuente de tensión continua en lugar de una celda con el fin de evitar sobrecalentamientos con las celdas y su química interna. Una vez

se comprueba el correcto funcionamiento del sistema, se procede a verificar el comportamiento con el pack de baterías.

En las siguientes formas de onda, la señal verde corresponde a la forma de onda de la corriente de balanceo, mientras que la señal de color azul, corresponde a la tensión tomando como referencias el *source* y el *drain* del MOSFET, es decir la señal de control PWM.

La Fig. 58 muestra las tres pruebas que se realizaron en el laboratorio para las tensiones de celdas de 4,2 V, 2,7 V y 1,5V:

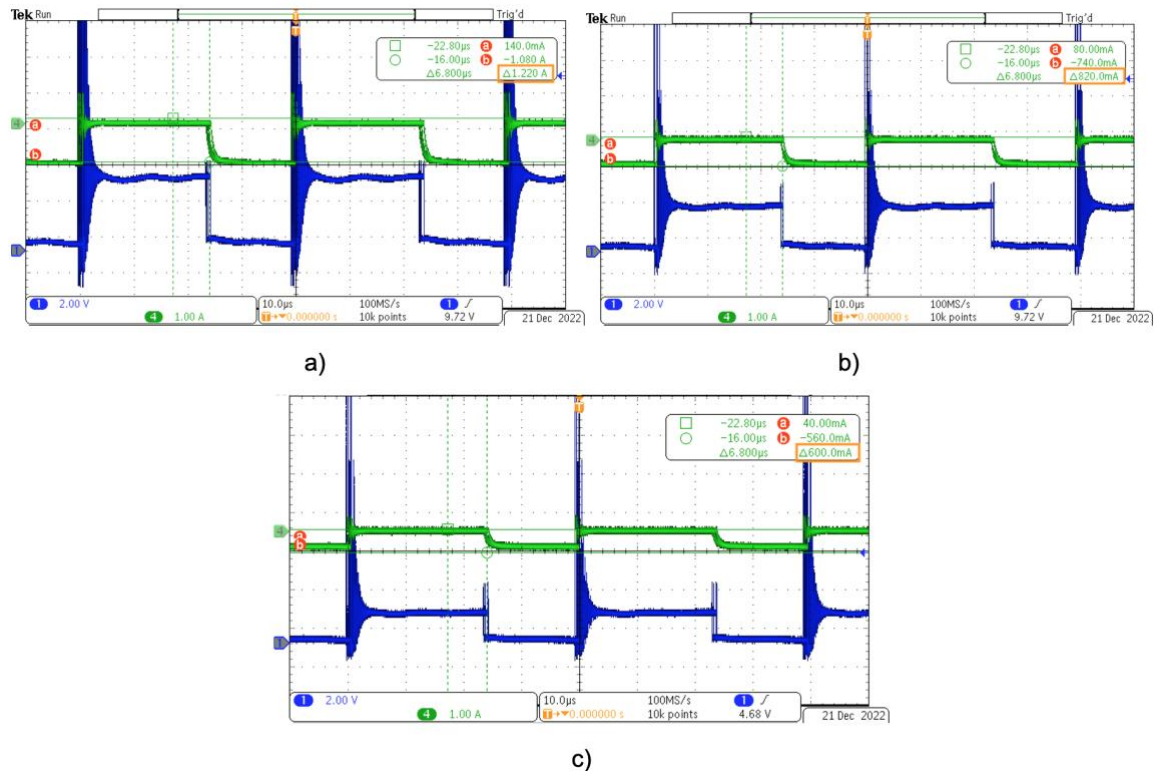


Figura 58. Pruebas con el circuito de balanceo diseñado con la fuente de tensión continua a 4,2 V, 2,7 V y 1,5V. a) Prueba del circuito con 4,2 V. b) Prueba del circuito con 2,7 V. c) Prueba del circuito con 1,5 V.

La Fig. 58 a), muestra los resultados obtenidos de la primera prueba con una tensión de celda de 4,2 V. En esta primera ocasión se obtienen corrientes de pico hasta de 1,22 A (incremento entre los cursores a y b del gráfico) con un período de conmutación por pulso del 60% y una frecuencia de 25 kHz.

En la Fig. 58 b), se muestra la prueba del circuito de balanceo con un voltaje de 2,7 V. Este caso se puede dar en las dos tecnologías de celdas, cuando las celdas de HE están totalmente descargadas, y a la vez, es el voltaje máximo que ofrecen las celdas de HP, como refleja la Tabla 16.

Para esta segunda prueba en el laboratorio, se obtienen 820 mA como corriente pico de balanceo, con un período de conmutación por pulso del 60%.

Por último, para la tercera comprobación del sistema, Fig. 58 c), el caso de trabajo con menor voltaje (cuando las celdas de HP están descargadas, que corresponde a 1,5 V), se

obtienen 600 mA como corriente pico de balanceo, con un período de conmutación por pulso del 60%.

Como primera observación, la amplitud de la onda de corriente disminuye conforme disminuye la tensión debido a la menor potencia que ofrece la celda para descargar. Este hecho se justifica con la ley de Ohm. La resistencia se obtiene con el cociente entre la tensión y la intensidad, por lo que para un valor de resistencia fijo, si el voltaje disminuye la intensidad también lo hará.

Como era de esperar por los cálculos de la sección 4.1, las corrientes de balanceo son muy superiores a los 240 mAh que ofrece la EVM de TI's con su balanceo interno. En el caso de mayor voltaje se obtienen 1,22 Ah como corriente máxima de balanceo, y en el caso de menor potencia, con la celda a 1,5 V se obtienen 600 mAh. Con estas corrientes de equilibrado se puede asegurar que se cumplirán los criterios de balanceado establecidos anteriormente.

Cabe destacar las irregularidades de las formas de onda que se muestran anteriormente, debidas prácticamente a la resistencia parásita que pueda presentar el circuito diseñado.

Una vez se ha verificado el correcto funcionamiento del circuito de balanceo diseñado con la fuente de tensión continua, se procede a analizar el sistema con celdas reales.

A continuación, se encuentra la verificación del circuito de balanceado diseñado con el pack de celdas reales tal y como muestra la Fig. 57. Como se observa en la Fig. 59, la celda 3 (la que mayor tensión presenta), se balancea con el sistema diseñado hasta alcanzar la tensión objetivo de equilibrado final de 3,6 V. Las demás celdas se balancean con el BQ79616-Q1.

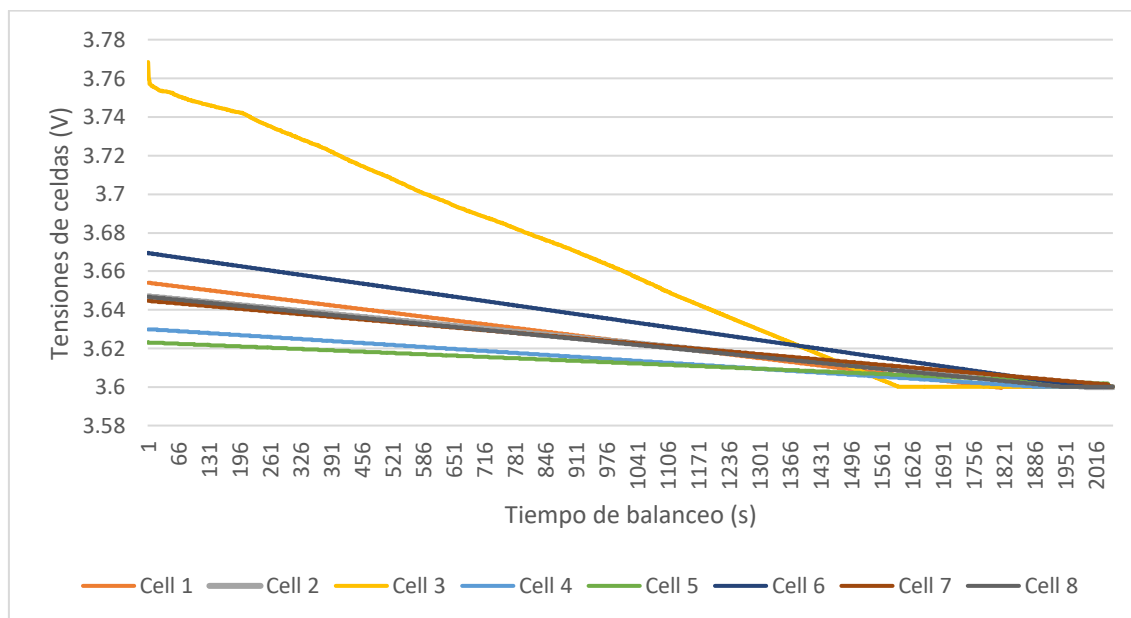


Figura 59. Pruebas con el circuito de balanceado diseñado con celdas Samsung 18650-25R.

En la Fig. 59, se puede observar como con el sistema de balanceado diseñado, se consigue un balanceo mucho más rápido que con el balanceado que ofrece la placa de evaluación de TI's. Con el balanceo de la EVM se consigue corregir una diferencia de potencial 0,085V

en 81,7 minutos, mientras que con el circuito de balanceado diseñado, se consigue llegar a corregir una diferencia de tensión 0,16 V en aproximadamente 1600 s, lo que equivale a 26,7 minutos.

Como se demuestra, el tiempo de balanceado de celdas se reduce significativamente debido a la mayor corriente de balanceo de celdas, por lo que se consigue corregir rápidamente las diferencias de carga entre celdas y aportar a autonomía del pack de baterías así como prolongar su vida útil.

5 Resumen del presupuesto

A continuación se encuentra una tabla a modo de resumen general del presupuesto con los principales ítems a tener en cuenta para estimar el coste global del estudio.

Para este cálculo se ha contabilizado los honorarios del trabajo de ingeniería y desarrollo, la ejecución material, que engloba todo el material necesario para el diseño del prototipo, y por último las licencias de software específico necesarias para simulaciones y diseño de PCB.

Tabla 15. Tabla resumen del presupuesto global del estudio.

Concepto	Coste (€)
Costes Directos	
Honorarios trabajo de ingeniería	6429,60
Ejecución material	993,19
Software	137,69
Total Costes Directos	7560,48
Costes Indirectos	
15% del Total Costes Directos	1134,07
Coste final del estudio sin IVA	8694,55
Coste final del estudio con IVA	10520,41

6 Análisis y valoración de las implicaciones ambientales y sociales.

Los recursos para almacenar energía tienen el objetivo de utilizarse como fuente de energía de todos los instrumentos electrónicos portátiles que utilizamos hoy en día (por ejemplo), dicha energía puede adquirirse de diferentes maneras, ya sea renovable o no renovable. Por ese motivo, cada año la producción de baterías de litio se ve aumentada drásticamente. En 2016 llego a ser de 7.8 billones, un 40% más que en 2015 con un total de 5.6 billones [42]. Por ende, el reciclaje de las baterías de litio gastadas ha ganado una atención notable en los últimos años debido al rápido aumento de la demanda de metales críticos y al impacto negativo en el medio ambiente del desguace y eliminación de residuos sólidos peligrosos. Estas baterías gastadas no solo contienen cantidades significativas de

materiales valiosos, sino que también contienen los materiales peligrosos mencionados anteriormente. La liberación y el destino (es decir, el transporte y la transformación) de los metales en estas baterías o las baterías como tales en el sistema ambiental es un tema muy importante de discusión. La eliminación incontrolada de estas baterías crea un riesgo importante para la salud, el medio ambiente y un desperdicio significativo de recursos valiosos.

Los metales de la batería como el litio, el níquel, el cobalto y el manganeso, así como los electrolitos, pueden tener efectos adversos para la salud humana y el medio ambiente. La cantidad y la forma en que el componente está presente en la batería puede determinar la cantidad de riesgo asociado con las baterías. La eliminación en vertederos o por incineración se prefiere a menudo durante la eliminación gradual de las baterías, pero el reciclaje verde es unánimemente la mejor opción, ya que puede disminuir el efecto adverso (si lo hubiera) sobre el medio ambiente y el propio vertedero [99]. Además, durante el proceso de fabricación de baterías se desprenden gases de producción como el CO₂, entre otros, que producen efecto invernadero y la contaminación actual de la atmósfera [43].

Con el fin de disminuir el impacto ambiental de las baterías de ion litio [44], propone que el desarrollo de tecnologías de baterías debe tener como objetivo aumentar su vida útil, disminuyendo la producción anual, el reciclaje de materiales y la obtención de mayores densidades de energía. Por otra parte, para minimizar el impacto ambiental derivado del uso de metales en los sistemas de baterías, plantean que los futuros diseños de batería deberían emplearse metales con una ocurrencia natural relativamente alta y se deberían implementar regulaciones para disminuir la necesidad de metales vírgenes. Por último, muchos investigadores sugieren que, para aumentar la eficiencia energética general de las baterías, los esfuerzos deben centrarse principalmente en mejorar la eficiencia de carga y descarga.

7 Conclusiones y futuros estudios

Como se ha podido observar el campo de supervisión y balanceado de celdas es muy amplio. Después de la revisión del estado del arte realizada, se obtiene la conclusión que el método más eficiente para el balanceado de celdas es el activo, pero como se ha visto presenta una serie de inconvenientes que lo convierten en un método mucho más complejo de implementar.

El sistema de supervisión de celdas con el que se ha trabajado para el prototipo de laboratorio cumple satisfactoriamente con su propósito, aunque cabe destacar que Texas Instruments ofrece un entorno de programación muy limitado para realizar nuevas configuraciones en su microcontrolador BQ79616-Q1.

Respecto al sistema de balanceado desarrollado, se cumple con el objetivo inicial planteado, crear un sistema de balanceado para celdas de diferentes tecnologías, en este caso para un rango de tensiones de entre 1,5 V y 4,2V. Las diferencias con el balanceado de celdas que ofrece la EVM de TI's es notable y reduce los tiempos de dicho proceso significativamente.

El control del sistema de balanceado de celdas desarrollado funciona con la simple lectura de tensión de celdas en lugar de por energía o carga de las celdas, siendo este segundo método mucho más preciso pero también más complejo de implementar por la estimación de parámetros de celda necesarios. También como futuro estudio, cabría la opción de adaptar la corriente de balanceo según el caso de uso que presente la batería.

8 Referencias

- [1]: Miao, Y., Hynan, P., von Jouanne, A., & Yokochi, A. (2019). "Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements". *Energies*, 12(6), 1074. [Consultado el 7 de Octubre de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en12061074>
- [2]: BOUZÓN POUSA, L. Battery Management System (BMS) para un coche de Formula Student [en línea]. Trabajo final de grado, UPC, Escola d'Enginyeria Barcelona Est. Departament d'Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica. [Consultado el de Octubre de 2022]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/115287>
- [3]: HELIOS PROJECT, [Consultado el 7 de Octubre de 2022] Disponible online: <https://www.helios-h2020project.eu/project>
- [4]: Linden, David, B. R. (2002). Basics Concepts. In *Neutrons in Soft Matter*. [Consultado el 17 de Noviembre de 2022]. Disponible online: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470933886.ch1>
- [5]: Korthauer, Reiner. Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications. (2018). [Consultado el 17 de Noviembre de 2022]. Disponible online: https://www.researchgate.net/publication/326922249_LithiumIon_Batteries_Basics_and_Applications
- [6]: Qué son y cómo funcionan las baterías de litio. EcoInventos. [en línea]. [Consultado el de Octubre de 2022]. Disponible en: <https://ecoinventos.com/baterias-de-litio/>
- [7]: Parámetros de las baterías.1Library.co. [Consultado el 7 de Octubre de 2022] Disponible online: <https://1library.co/article/parámetros-bater%C3%ADas-sistemas-almacenamiento-energ%C3%ADa.yr3v3l7y>
- [8]: Kopczynski, Artur & Liu, Zhiyin & Krawczyk, Paweł. (2018). Parametric analysis of Li-ion battery based on laboratory tests. *E3S Web of Conferences*. [Consultado el 7 de Octubre de 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/326152183_Parametric_analysis_of_Liion_battery_based_on_laboratory_tests
- [9]: Circuito multiplexor y cómo funciona, tipos y aplicaciones. Descubrearduino.com. [en línea]. [Consultado el de Octubre de 2022]. Disponible en: <https://descubrearduino.com/multiplexor/>
- [10]: Qian Lin, Jun Wang, Rui Xiong, Weixiang Shen, Hongwen He, Towards a smarter battery management system: A critical review on optimal charging methods of lithium ion batteries, *Energy*, Volume 183, 2019, ISSN 0360-5442, [Consultado el de Octubre de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.128>
- [11]: M.S. Hossain Lipu, M.A. Hannan, Tahia F. Karim, Aini Hussain, Mohamad Hanif Md Saad, Afida Ayob, Md. Sazal Miah, T.M. Indra Mahlia, Intelligent algorithms and control strategies for battery management system in electric vehicles: Progress, challenges and future outlook, *Journal of Cleaner Production*, Volume 292, 2021, 126044, ISSN 0959-6526, [Consultado el de Octubre de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126044>
- [12]: ¿Qué es un termistor? Es.omega.com. [en línea]. [Consultado el de Octubre de 2022]. Disponible en: <https://es.omega.com/prodinfo/termistores.html>

[13]: El bus SPI en Arduino. LuisLlamas.es. [en línea]. [Consultado el de Octubre de 2022]. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/arduino-spi/>

[14]: El bus I2C en Arduino. LuisLlamas.es. [en línea]. [Consultado el de Octubre de 2022]. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/arduino-i2c/>

[15]: Lee, Youngchul & Jeon, Seonwoo & Bae, Sungwoo. (2016). Comparison on Cell Balancing Methods for Energy Storage Applications. Indian Journal of Science and Technology. 9. 10.17485/ijst/2016/v9i17/92316. [Consultado el de Octubre de 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/303553553_Comparison_on_Cell_Balancing_Methods_for_Energy_Storage_Applications

[16]: Omariba, Zachary & Zhang, Lijun & Sun, Dongbai. (2019). Review of Battery Cell Balancing Methodologies for Optimizing Battery Pack Performance in Electric Vehicles. IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2019.2940090. [Consultado el de Octubre de 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/335780151_Review_of_Battery_Cell_Balancing_Methodologies_for_Optimizing_Battery_Pack_Performance_in_Electric_Vehicles

[17]: Bowkett, Mark & Thanapalan, Kary & Stockley, Thomas & Hathway, Mark & Williams, J.. (2013). Design and implementation of an optimal battery management system for hybrid electric vehicles. ICAC 2013 - Proceedings of the 19th International Conference on Automation and Computing: Future Energy and Automation. 1-5. [Consultado el de Octubre de 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/261460537_Design_and_implementation_of_an_optimal_battery_management_system_for_hybrid_electric_vehicles

[18]: Bruen, Thomas & Marco, James & Gama, Miguel. (2015). Model Based Design of Balancing Systems for Electric Vehicle Battery Packs. IFAC-PapersOnLine. 48. 395-402. 10.1016/j.ifacol.2015.10.057. [Consultado el de Octubre de 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/284068160_Model_Based_Design_of_Balancing_Systems_for_Electric_Vehicle_Battery_Packs

[19]: Lindemark, B.. (1991). Individual Cell voltage Equalizers (ICE) For Reliable Battery Performance. 196 - 201. 10.1109/INTLEC.1991.172396. [Consultado el de Octubre de 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/3521284_Individual_Cell_voltage_Equalizers_IC_E_For_Reliable_Battery_Performance

[20]: Cadar, Dorin & Petreus, Dorin & Patarau, Toma. (2010). An energy converter method for battery cell balancing. 10.1109/ISSE.2010.5547305. [Consultado el de Octubre de 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/251946308_An_energy_converter_method_for_battery_cell_balancing

[21]: Feng, Ran & Xu, Hao & Ji, Yuan & Qin, Jiaqi & Li, Wenhui. (2015). An active balancing circuit for lithium battery management system with optoelectronic switches. 1-5. 10.1109/TENCON.2015.7373096. [Consultado el de Octubre de 2022]. Disponible en:

<https://www.researchgate.net/publication/304288899> An active balancing circuit for lithium battery management system with optoelectronic switches

[22]: Baronti, Federico & Fantechi, G. & Roncella, Roberto & Saletti, Roberto & Pede, Giovanni & Vellucci, F.. (2013). Design of the battery management system of LiFePO₄ batteries for electric off-road vehicles. IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 1-6. 10.1109/ISIE.2013.6563858. [Consultado el de Octubre de 2022]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/261311729> Design of the battery management system of LiFePO₄ batteries for electric off-road vehicles

[23]: Moore, S. y Schneider, P., "A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems", [en línea] Documento técnico de SAE 2001-01-0959, 2001. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: <https://doi.org/10.4271/2001-01-0959>

[24]: ¿Qué es el ASIL-D? aptiv.com. [en línea]. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: <https://www.aptiv.com/es/tendencias/art%C3%ADculo/qu%C3%A9-es-asil-d#:~:text=ASIL%2D%20es%20una%20clasificaci%C3%B3n,y%20electr%C3%B3nicos%20de%20un%20veh%C3%ADculo>.

[25]: Active and Passive Cell Balancing. Analog Devices. [en línea]. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: <https://www.analog.com/en/technical-articles/active-battery-cell-balancing.html>

[26]: Cell balancing buys extra run time and battery life. Texas Instruments. [en línea]. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: https://www.ti.com/lit/an/slyt322/slyt322.pdf?ts=1673030974642&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

[27]: Mohammad Kamrul Hasan, Md Mahmud, A.K.M. Ahasan Habib, S.M.A. Motakabber, Shayla Islam, Review of electric vehicle energy storage and management system: Standards, issues, and challenges, Journal of Energy Storage, Volume 41, 2021,102940,ISSN 2352-152X, Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102940>.

[28]: Döge, Volker & Kurtulus, Can & Hennige, Volker & Wegmann, Raphael. (2016). Scalable Energy Storage Systems for Effective Electrified Mobility Concepts. Transportation Research Procedia. 14. 3621-3630. 10.1016/j.trpro.2016.05.430. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/304538531> Scalable Energy Storage Systems for Effective Electrified Mobility Concepts

[29]: Li, Xinke & Zhao, Jiawei & Duan, Jiabin & Panchal, Satyam & Yuan, Jinliang & Fraser, Roydon & Fowler, Michael & Chen, Ming. (2022). Simulation of cooling plate effect on a battery module with different channel arrangement. Journal of Energy Storage. 49. 104113. 10.1016/j.est.2022.104113. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/358295730_Simulation_of_cooling_plate_effect_on_a_battery_module_with_different_channel_arrangement?_sg=Xk0y5nmeW7Jzu19MLp1fyZKRjT-61Gi-os-Fy0w9GFkbpoarQP5N7DZ0WoM0f9e0X8LasuyTn-omZq0

[30]: F. Naseri, C. Barbu, T. Sarikurt, Optimal sizing of hybrid high-energy/high-power battery energy storage systems to improve battery cycle life and charging power in electric vehicle applications, Journal of Energy Storage, Volume 55, Part D, 2022, 105768, ISSN 2352-152X, Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105768>.

[31]: Shuzhi Zhang, Nian Peng, Haibin Lu, Rui Li, Xiongwen Zhang, A systematic and low-complexity multi-state estimation framework for series-connected lithium-ion battery pack under passive balance control, Journal of Energy Storage, Volume 48, 2022, 103989, ISSN 2352-152X, Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.103989>.

[32]: BQ79616EVM-021. Monitor de batería de alta precisión automotriz 16-S, balanceador y módulo de evaluación de protector integrado. Texas Instruments. [en línea]. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: <https://www.ti.com/tool/BQ79616EVM-021>

[33]: NTCLE213E3. Vishay.com. [en línea]. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: <https://www.vishay.com/product/29154/>

[34]: IRS20752. Infineon.com. [en línea]. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRS20752L-DS-v01_02-EN.pdf?fileId=5546d462533600a401535675e709278e

[35]: STMicroelectronics STM32 NUCELO-F441RE. Mouser Electronics.com. [en línea]. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: https://www.mouser.es/ProductDetail/STMicroelectronics/NUCLEOF411RE?qs=Zt3UNFD9mQidEJq18RwZ2q%3D%3D&mgh=1&vip=1&qclid=Cj0KCQiAoqdBhDfARIsAO0TrGGpVbzyRHHw58zNYvyVopmjuzBustjc6qzzTj7eqIC0p8FnDQvusW0aAtMdEALw_wcB

[36]: STM32CubeMX. ST.com. [en línea]. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>

[37]: Daowd, M., Omar, N., Van Den Bossche, P. y Van Mierlo, J. (2011). Comparación de equilibrio de batería pasiva y activa basada en simulación MATLAB. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Passive-and-active-battery-balancing-comparison-on-Daowd-Omar/211a0954a35ffb5c47aea9ce2aa3d5c332d682d1>

[38]: Nawaz, Mena & Ahmed, Jameel & Abbas, Ghulam. (2022). Energy-efficient battery management system for healthcare devices. Journal of Energy Storage. 51. 104358. 10.1016/j.est.2022.104358. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/359100557_Energyefficient_battery_management_system_for_healthcare_devices

[39]: Automotive N-Channel 60V MOSFET. Mouser Electronics.com. [en línea]. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: <https://www.mouser.es/datasheet/2/427/sqs460en-1766237.pdf>

[40]: SMD High Power Resistors. Mouser Electronics.com. [en línea]. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: https://www.mouser.es/datasheet/2/418/8/NG_DS_1773204_7_A-1533418.pdf

[41]: IRFBG20 Power MOSFET. Mouser Electronics.com. [en línea]. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: <https://www.mouser.es/datasheet/2/427/sihbg20-1768418.pdf>

[42]: Meshram, P., Mishra, A., Abhilash, & Sahu, R. (2020). Environmental impact of spent lithium ion batteries and green recycling perspectives by organic acids – A review. *Chemosphere*. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125291>

[43]: Casals, L. C., García, B. A., Aguesse, F., & Iturrondobeitia, A. (2017). Second life of electric vehicle batteries: relation between materials degradation and environmental impact. *International Journal of Life Cycle Assessment*. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0918-3>

[44]: Ahmadi, P., Torabi, S. H., Afsaneh, H., Sadegheih, Y., Ganjehsarabi, H., & Ashjaee, M. (2020). The effects of driving patterns and PEM fuel cell degradation on the lifecycle assessment of hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(5), 3595–3608. Consultado el 2 de Enero de 2023. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.165>