



MASTER EN INGENIERÍA DE AUTOMOCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

HERRAMIENTAS DIDÁCTICAS PARA LA FORMACIÓN SOBRE BATERÍAS ELECTROQUÍMICAS

Autor: D. Eduardo Bayón Alonso

Tutor: D. Francisco Tinaut Fluixá

Valladolid, julio de 2020

Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce 59

47011 Valladolid
(España)



Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España





Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce 59

47011 Valladolid
(España)



Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España



HERRAMIENTAS DIDÁCTICAS PARA LA FORMACIÓN SOBRE BATERÍAS ELECTROQUÍMICAS

RESUMEN BREVE

Las baterías electroquímicas son el sistema empleado actualmente para alimentar los vehículos eléctricos, y su caracterización es el objetivo de la realización de este trabajo. Se describen y analizan diferentes parámetros físicos y eléctricos de las baterías, se muestran los distintos tipos de batería existentes según la química principal que las componen, y se desarrollan diversas **herramientas didácticas**. Estas herramientas permiten realizar simulaciones y comparativas para aprender el funcionamiento y los conocimientos básicos y esenciales de las baterías, así como poder discernir la idoneidad de éstas para las diferentes aplicaciones requeridas. El conjunto de herramientas consiste en: un banco de datos de las características de las baterías, un libro de cálculo sobre la influencia de la temperatura en el cableado, un programa para el modelado de temperatura de una batería y una aplicación de simulación de carga y descarga de una batería.

Palabras clave: Baterías electroquímicas, Tensión, Simulación, Vehículo eléctrico, Análisis térmico.

TOOLS FOR TRAINING ON ELECTROCHEMICAL BATTERIES

SHORT ABSTRACT

Electrochemical batteries are the system that currently powers electric vehicles, and their characterization is the objective of this document. Different physical and electric battery parameters are described and analysed, several types of existing batteries are studied, grouped by their main chemical composing, and some **didactic tools** are developed. That tools allow students to carry out simulations and comparisons in order to learn the basics of batteries and their operation, helping them to discern their suitability for different required applications. The tools created are the following: The set of tools consists of: a Database of battery characteristics, a calculation book about the temperature influence on the wiring, a thermal modelling battery application and util to simulate battery charge and discharge processes.

Keywords: Electrochemical Batteries, Voltage, Simulation, Electric Vehicle, Thermal Analysis.

HERRAMIENTAS DIDÁCTICAS PARA LA FORMACIÓN SOBRE BATERÍAS ELECTROQUÍMICAS

RESUMEN EJECUTIVO

Hasta principios del siglo XXI, los vehículos eléctricos no han tenido relevancia, quedando relegados a un segundo plano frente a los vehículos de combustión. En la actualidad, el aumento de los gases de efecto invernadero (CO_2 , NO_x ...) está provocando que las instituciones internacionales elaboren e impongan a los fabricantes de vehículos, normativas para paliar este problema. Por ello, los fabricantes han tenido que virar en su estrategia de fabricación y comercialización hacia la electrificación del vehículo. Esta electrificación hace necesario un sistema de almacenamiento de energía eléctrica que alimente los motores que traccionan el vehículo, y este sistema, actualmente es la batería electroquímica.

El presente trabajo en consecuencia, describe el **estado del arte de las baterías**, y explica las diferencias entre unas y otras, a la vez que presenta unas **herramientas didácticas** para el aprendizaje por parte del alumnado sobre este sistema de almacenamiento. El **objetivo final** es que el alumnado obtenga unas ideas claras sobre funcionamiento de las baterías, dando a conocer las diferentes ventajas que presentan unas frente a otras, permitiendo discernir qué químicas son más o menos apropiadas para sus diferentes usos. Además, estas herramientas pueden ser utilizadas en las prácticas de la asignatura de Sistemas de Propulsión del Máster en Ing^a de Automoción.

Los principales **sistemas de almacenamiento de energía** que se pueden aplicar a un vehículo eléctrico son los volantes de inercia, los supercondensadores, las pilas de combustible de hidrógeno, y las baterías electroquímicas.

Las **baterías electroquímicas** se componen de un electrodo negativo (ánodo), un electrodo positivo (cátodo), un separador, un electrolito, y una envolvente o carcasa que recoge el conjunto. Según la geometría de la envolvente, las celdas o baterías pueden presentar una configuración cilíndrica, prismática o pouch (en una bolsa de aluminio). La **composición** de estos elementos, depende de la química de la batería utilizada, siendo las históricamente más utilizadas, las baterías de plomo ácido, las de níquel-cadmio, las de níquel-metalhidruro y las de **iones de litio**. Estas últimas, por las características que presentan, son las empleadas en los vehículos eléctricos actuales.

Las baterías de litio normalmente presentan un electrodo positivo formado por un compuesto de litio con otros metales (Co, Ni, Al, Mn, Fe), un electrodo negativo en el que la mayoría de los casos contiene una matriz de grafito en la que se aloja el líquido, un separador plástico (PP o PE principalmente) y un electrolito normalmente líquido de sales de litio. Según su composición de material activo principal, las químicas de las baterías de litio son **LCO, LMO, NCA, NMC, LFP, LTO y Li-Po** (con electrolito gelificado). Se observa que las baterías de iones de litio más idóneas y utilizadas en BEV son las baterías NMC y LFP, siendo las primeras las más equilibradas (energía específica, potencia específica, seguridad, ciclo de vida, comportamiento, coste) respecto a características se refiere, y las segundas las más estables y seguras, y con gran ciclo de vida.

Los campos de estudio de **nuevas tecnologías de baterías** se centran en el Litio-azufre (Li-S), metal-aire, baterías redox y electrolito sólido.

En los **procesos de carga y descarga** de la batería, los iones de litio (Li^+) liberados y captados por las reacciones que se producen en los electrodos se mueven de un electrodo a otro a través del electrolito (permite la conducción) y el separador (previene los cortocircuitos), compensando la corriente electrónica que circula por el circuito exterior. El proceso de descarga que se utiliza en las baterías de litio es el proceso a corriente constante, mientras que el proceso necesario para cargar estas baterías y que no se vean perjudicadas es el proceso de carga bifásica corriente constante – tensión constante.

Una vez desarrollado el estado del arte de las baterías electroquímicas, y con unos conocimientos adquiridos, se desarrollan las herramientas didácticas. Éstas son:

- **Banco de datos de las baterías:** Permite tener una visión global de las características de las baterías, y mediante gráficos comparativos y el conocimiento de los rangos de varios parámetros (tensión nominal, corrientes de carga o descarga, densidades de energía...), permiten diferenciar de un vistazo rápido unas baterías de otras. Se han incluido 24 baterías de un conjunto de diez químicas, siete de ellas de iones de litio, y las restantes, NiCd, NiMH y plomo ácido. Éstas presentan diferentes configuraciones (cilíndrica, prismática y pouch) y tamaños.
- **Libro de cálculo sobre la influencia de la temperatura en los cables de conexionado:** Conociendo la longitud y sección del cable, permite conocer al alumno observar cómo afectan estos parámetros a la resistencia al paso de corriente eléctrica que ofrece el cableado. Se observa, que, a mayor longitud del cableado y/o a menor sección, mayor número de choques entre electrones, con lo que mayor resistencia, y también a una mayor temperatura, mayor agitación de los electrones por lo que mayor resistencia.
- **Programa para el modelado de la temperatura de una batería:** Permite según las condiciones de corriente, hacerse una idea de la evolución de la temperatura de la batería a lo largo de los procesos de carga y descarga. Esta información, junto con los conocimientos de temperatura de almacenamiento y operación de las baterías, permite conocer si se podrían encontrar en rangos peligrosos de temperatura, o si su funcionamiento se podría ver afectado o perjudicado. También, se pueden hacer comparativas de la evolución de la temperatura de la batería con el banco físico de ensayos de la Escuela. Del estudio paramétrico realizado, se observa que:
 - El aumento de temperatura final de la batería depende de R_{int} , I , U y A .
 - La velocidad a la que se alcanza esa temperatura final depende de m_{bat} , C_{pbat} , U y A .
- **Programa de simulación de carga y descarga:** A partir de los datos obtenidos de las baterías del Banco de datos, permite realizar simulaciones de carga y descarga en muy diferentes condiciones mediante la variación de parámetros. Entre los resultados se encuentra la variación con el tiempo de: tensión de la batería (en bornes y en circuito abierto), el estado de carga, el rendimiento del proceso, o la temperatura, permitiendo la modificación de la resistencia interna, la resistencia del cableado o la reducción de capacidad por envejecimiento, las intensidades...

TOOLS FOR TRAINING ON ELECTROCHEMICAL BATTERIES

EXECUTIVE ABSTRACT

Until the beginning of the 21st century, electric vehicles have not been relevant, being relegated to a secondary position compared to combustion vehicles. Nowadays, the increase in greenhouse gases (CO₂, NO_x...), is causing international institutions to develop and impose regulations on vehicle manufacturers to alleviate this problem. Thus, manufacturers have had to turn their manufacturing and marketing strategy towards vehicle electrification. This electrification requires an electric energy storage system that feeds the motors that drive the vehicle, and this system is currently the electrochemical battery.

The present document, therefore, describes the **batteries state of art**, and explains the differences among them, while presenting some **didactic tools** for learning by students about this storage system. The **final objective** is that students obtain some clarity about how batteries work, getting familiar with the different advantages they present against others, allowing to discern which chemistries are more or less appropriate for their different applications. In addition, these tools can be used in the Propulsion Systems subject practices of the Automotive Engineering Master.

The main **energy storage systems** that can be applied to an electric vehicle are flywheels, supercapacitors, hydrogen fuel cells, and electrochemical batteries.

Electrochemical batteries are composed of a negative electrode (anode), a positive electrode (cathode), a separator, an electrolyte, and an enclosure or casing around all of it. Depending on the geometry of the casing, the cells or batteries can have a cylindrical, prismatic or pouch configuration. The **composition** of these elements depends on the chemistry of the battery used, being the most historically used, lead acid batteries, nickel-cadmium batteries, nickel-metal hydride and **lithium ion batteries**. The latter ones, due to their characteristics, are the ones used in current electric vehicles.

Lithium batteries normally have a positive electrode formed by a compound of lithium with other metals (Co, Ni, Al, Mn, Fe), a negative electrode in which the majority of cases contain a graphite matrix in which the liquid is housed, a plastic separator (mainly PP or PE) and generally liquid electrolyte of lithium salts. Depending on their main active material composition, lithium battery chemistries are **LCO, LMO, NCA, NMC, LFP, LTO and Li-Po** (with gelled electrolyte). It can be seen that the most suitable lithium-ion batteries used at BEV are NMC and LFP, with the first one being the most balanced (specific energy, specific power, safety, life cycle, performance, cost) in terms of characteristics, and the latter one being the most stable and safe, with a long life cycle.

New battery technologies studies are focused on Lithium-sulfur (Li-S), metal-air, redox batteries and solid electrolyte.

In the **processes of battery charging and discharging**, the lithium ions (Li⁺) released and captured by the reactions that take place on the electrodes move from one electrode to another through the electrolyte (which allows conduction) and the separator (which prevents short circuits), compensating the electronic current that circulates in the external circuit. The discharge process used in lithium batteries is the constant current process, while the process needed to charge these batteries and ensure that they are not damaged is the two-phase constant current - constant voltage process.

Once the electrochemical battery state of the art has been described, and with some knowledge acquired, the didactic tools are developed. These are:

- **Battery database:** Allows to have a global vision of the characteristics of the batteries, and through comparative graphs and knowledge of the ranges of several parameters (nominal voltage, charge or discharge currents, energy densities...), they allow to differentiate at a quick glance some batteries from others. Twenty-four batteries have been included from a set of ten chemicals, seven of them lithium ion, and the remaining ones, NiCd, NiMH and lead acid. These come in different configurations (cylindrical, prismatic and pouch) and sizes.

- **Calculation book about the temperature influence on the wiring:** Knowing the length and section of the cable, allows the student to observe how these parameters affect the resistance to the flow of electric current offered by the wiring. It can be observed that the longer the cable and/or the smaller its section, the greater the number of shocks between electrons, which means greater resistance. Temperature increments also increase the resistance due to more electrons' agitation
- **Thermal modelling battery application:** It allows, according to the current conditions, to get an idea of the evolution of the battery temperature throughout the charging and discharging processes. This information, together with the knowledge of storage and operating temperature of the batteries, allows to know if they could be in dangerous temperature ranges, or if their operation could be affected or damaged. Also, comparisons of the evolution of the battery temperature between calculated values and measured ones from the School's physical test bench can be made. From the parametric study carried out, it can be seen that:
 - The final battery temperature increase depends on R_{int} , I , U and A .
 - The speed at which this final temperature is reached depends on m_{bat} , $C_{p,bat}$, U and A .
- **Charge and discharge simulation program:** Based on the data obtained from the batteries in the Database, it allows charging and discharging simulations to be carried out under very different conditions by varying parameters. Some of the results are the variation of the following parameters with time: battery voltage (in terminals and open circuit), state of charge, process performance, or temperature, allowing the modification of the internal resistance, the resistance of the wiring or the reduction of capacity due to aging, currents...

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría indicar que el desarrollo de este trabajo, ha sido posible gracias al apoyo continuo e incansable de mi familia, en especial, mis padres, los cuales me han animado y soportado durante la ejecución del trabajo, en las buenas y en las malas situaciones. Recordar especialmente a mi abuelo Balbino y mi tío Federico, que nos dejaron hace poco tiempo. Sé que desde donde estéis, también habéis colaborado.

Como no, agradecer a mis amigos, que, a su vez han colaborado en la realización de este trabajo, haciendo amenos momentos que se podían hacer duros, mostrando su amistad y confianza en mí.

Por último, agradecer a mi tutor Francisco su ayuda en la realización de este trabajo y la confianza depositada en mí, cuando ni yo mismo la tenía. Ha demostrado ser una buena persona y un buen profesional.

Con vuestra ayuda todo ha resultado más sencillo, por todo ello, gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Justificación del TFM.....	1
1.3	Objetivos	1
1.4	Competencias	2
1.5	Estructura de la memoria	3
2	LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.....	5
2.1	Historia.....	5
2.2	Actualidad y previsiones.....	6
2.3	Sistemas de almacenamiento de energía.....	8
2.3.1	Volantes de inercia	9
2.3.2	Pila de combustible de hidrógeno.....	10
2.3.3	Supercondensadores	11
2.3.4	Baterías electroquímicas	12
2.3.5	Comparativa de los diferentes sistemas de almacenamiento	13
3	FUNCIONAMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS BATERÍAS ELECTROQUÍMICAS	15
3.1	Breve historia	15
3.2	Funcionamiento y componentes de la batería	15
3.2.1	Electrodos	15
3.2.2	Electrolito	17
3.2.3	Separador	17
3.2.4	Contenedor	17
3.3	Configuraciones geométricas	18
3.3.1	Cilíndricas	18
3.3.2	Prismáticas.....	19
3.3.3	Pouch.....	20
3.4	Parámetros característicos eléctricos.....	21
3.4.1	Tensión	21
3.4.2	Resistencia interna.....	21
3.4.3	Corriente	21
3.4.4	Capacidad.....	22
3.4.5	Energía almacenada	22
3.4.6	Estado de carga	22
3.4.7	Profundidad de descarga	23
3.4.8	Estado de salud	23

3.4.9	Autodescarga	24
3.4.10	Ciclo de vida.....	24
3.4.11	Intervalo térmico de trabajo	24
3.4.12	Rendimiento carga/descarga.....	24
3.4.13	Energía específica.....	24
3.4.14	Potencia específica	24
3.5	Procesos de carga y descarga de las baterías	24
3.5.1	Carga	24
3.5.2	Descarga.....	26
4	TIPOS DE BATERÍAS ELECTROQUÍMICAS SEGÚN SU COMPOSICIÓN	29
4.1	Plomo ácido (Pb).....	29
4.2	Níquel-Cadmio (NiCd).....	32
4.3	Níquel Metal-Hidruro (NiMH).....	34
4.4	Iones de litio (Li-ion)	36
4.4.1	Óxido de cobalto (LCO).....	38
4.4.2	Óxido de manganeso (LMO)	38
4.4.3	Óxido de níquel (LiNiO ₂).....	38
4.4.4	Níquel-Manganeso-Cobalto (NMC)	38
4.4.5	Níquel-Cobalto-Aluminio (NCA).....	39
4.4.6	Ferrosulfato (LFP).....	39
4.4.7	Polímero de litio (LiPo)	39
4.4.8	Titanato (LTO).....	40
4.5	Otras baterías en desarrollo (Li-S, metal-aire, estado sólido, de flujo...)	40
4.6	Resumen comparativo de características de las baterías.....	43
4.6.1	Comparativa general de la química de las baterías	43
4.6.2	Comparativa particular de las baterías de iones de litio.....	45
5	HERRAMIENTAS DESARROLLADAS PARA LA FORMACIÓN.....	47
5.1	Banco de datos de características de baterías	47
5.1.1	Tipos de baterías considerados.....	47
5.1.2	Fuentes para la obtención de las características	47
5.1.3	Tabla normalizada de características de baterías.....	48
5.1.4	Curvas características carga/descarga.....	49
5.1.5	Recomendaciones para el uso y almacenamiento de las baterías.....	49
5.2	Libro para el cálculo de la influencia de la temperatura, longitud y sección a los cables de conexionado de la batería.....	50
5.3	Modelado de la temperatura de una batería en carga y descarga.	51
3.5.1	Planteamiento del modelado térmico de una batería.....	51

5.3.2	Estudio paramétrico de sensibilidad	53
5.3.3	Comparativa con ensayos en banco de batería	55
5.4	Programa de carga y descarga de baterías (resultados comparativos y análisis de los mismos).....	57
5.4.1	Descarga.....	57
5.4.2	Carga	61
6	CONCLUSIONES.....	65
6.1	Conclusiones.	65
6.2	Principales aportaciones del autor del TFM.....	66
6.3	Sugerencias para trabajos futuros.....	66
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
	LECTURAS RECOMENDADAS	69
	ANEXOS.....	71
	Anexo 1. Tabla normalizada de las características de la batería.....	72
	Anexo 2. Cálculo del coeficiente transmisión de calor por convección.	73
	Anexo 3. Influencia de la temperatura, y longitud y de sección a los cables de conexionado de la batería.	74
	Anexo 4. Estudio paramétrico de sensibilidad de la temperatura de la batería.....	78
	Anexo 5. Estudio comparativo de los resultados de temperatura obtenidos experimental y teóricamente.....	86
	Anexo 6. Resultados y análisis del programa de carga y descarga de baterías.	91
	Anexo 6.a. Programa de descarga	91
	Anexo 6.b. Programa de carga.....	101
	Anexo 7. Gráficos comparativos de las baterías del libro de hoja de características y nomenclatura comercial de la química de las baterías.	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Taxi eléctrico de Nueva York en 1901 [Larminie, 2012].....	5
Figura 2. Coche utilitario Citicar [Motor.es, 2017], Toyota Prius [Toyota, 2020].....	6
Figura 3. Tesla Model 3 [Tesla, 2020]	6
Figura 4. Millones de vehículos eléctricos en circulación en el mundo [IEA, 2019].....	7
Figura 5. Previsiones de ventas de vehículos eléctricos 2018-2030 [IEA, 2019]	7
Figura 6. Evolución del parque de vehículos eléctricos en España hasta 2020 [OVEMS, 2020]	8
Figura 7. Proyección de la evolución del parque móvil en España [OVEMS, 2020].....	8
Figura 8. Esquema y sección del volante de inercia [Luo, 2014 y Diariomotor, 2013]	10
Figura 9. Esquema de la pila de combustible y el almacenamiento de hidrógeno. [Luo, 2014].....	10
Figura 10. Toyota Mirai [Toyota, 2020].....	11
Figura 11. Supercondensador Maxwell [Maxwell, 2020].....	12
Figura 12. Empaquetamiento de la batería de un vehículo eléctrico [Vidyanandan, 2019]	13
Figura 13. Comparativa Potencia-Energía-Tiempo de descarga de los ESS [IEC, 2011]	13
Figura 14. Comparativa de la energía y potencia específica de diferentes sistemas [Zubi, 2018].....	14

Figura 15. Esquema del funcionamiento de una batería electroquímica con iones positivos [Elaboración propia].....	16
Figura 16. Esquema del funcionamiento de una batería electroquímica en pack [Luo, 2014].....	16
Figura 17. Desglose de una batería de iones de litio NMC genérica para VE. [Kwade and Diekmann, 2018]	18
Figura 18. Geometrías cilíndrica, prismática y pouch. [Choi, 2016]	20
Figura 19. Circuito equivalente de la batería y expresión de V_t [Elaboración propia].....	21
Figura 20. Distribución de la utilización de la capacidad de la batería [Ottaviano, 2013]	23
Figura 21. Carga CC-CV [Buchman, 2016]	25
Figura 22. Circuito equivalente de carga de la batería. [Elaboración propia]	26
Figura 23. Esquema de la carga de la batería CC-CV. [Elaboración propia a partir de Tinaut].....	26
Figura 24. Modos de descarga de una batería. [Elaboración propia].....	27
Figura 25. Circuito equivalente de descarga de la batería. [Elaboración propia].....	27
Figura 26. Esquema de la descarga de la batería CC. [Elaboración propia a partir de Tinaut]	28
Figura 27. Relación energía y potencia para los distintos tipos de vehículos [Berg, 2015]	29
Figura 28. Rango de los estados de carga utilizados por los diferentes vehículos [Scrosati, 2015]	29
Figura 29. Variación de la densidad del electrolito y el V_{oc} en función del SOC. [Huggins, 2016].....	30
Figura 30. Curvas de voltaje (línea continua) y temperatura (discontinua) en el proceso de carga [Berg, 2015]	33
Figura 31. Curva de descarga de una batería NiMH [Berg, 2015]	35
Figura 32. Proceso de descarga de una batería de iones de litio [Berg, 2015]	36
Figura 33. Potencial vs Capacidad de los materiales activos y estabilidad electroquímica. [Berg, 2015]	37
Figura 34. Esquema de carga y descarga Li-S. [Scrosati, 2015]	40
Figura 35. Características teóricas de los cátodos de las baterías metal-aire. [Wang, 2019].....	41
Figura 36. Esquema batería de flujo de vanadio [Rufer, 2018]	42
Figura 37. Comparación batería electrolito líquido (a) vs electrolito sólido (b) [Pistoia, 2014].....	43
Figura 38. Comparativa de las curvas de descarga de las baterías [Huggins, 2016].....	44
Figura 39. Comparativa de las características de las baterías li-ion. [Miao, 2019].....	46
Figura 40. Gráficos del análisis paramétrico de sensibilidad variando C_p , diámetro, U y R_{int}	54
Figura 41. Banco físico de ensayo de baterías de la Escuela de Ingenieros industriales de Valladolid. 55	
Figura 42. Gráficos comparativos T_{exp} vs T_{calc} para batería NCR26650.....	55
Figura 43. Condiciones iniciales de referencia para la simulación de descarga de la batería NCR26650A.....	58
Figura 44. Gráfico ejemplo del resultado de la descarga normal de la batería NCR26650.	58
Figura 45. Condiciones iniciales de referencia para la simulación de carga de la batería NCR26650A. 61	
Figura 46. Gráfico ejemplo del resultado de la carga normal de la batería NCR26650.	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de las geometrías de una batería [Elaboración propia a partir de Berg y Miao] ..	20
Tabla 2. Comparativa de las características de las químicas generales [Elaboración propia a partir de Buchman, Chian, Vidnayaman y libro tabla de características].	44
Tabla 3. Tabla comparativa de las baterías de iones de litio. [Elaboración propia a partir de Buchman, Chian, Vidnayaman y libro tabla de características].	45
Tabla 4. Resistividad y coeficiente de temperatura para distintos materiales [Elaboración propia a partir de Tipler].....	50
Tabla 5. Tabla de los resultados del análisis paramétrico de sensibilidad [Elaboración propia]	54
Tabla 6. Comparativa de los resultados de las simulaciones de descarga.	60
Tabla 7. Comparativa de los resultados de las simulaciones de carga.	63

NOMENCLATURA

AGM	Absorbent Glass Material o batería de material de vidrio absorbente
BEV	Battery electrical vehicle o Vehículo eléctrico de baterías
BMS	Battery Management System o Sistema de control de la batería
Cp	Calor específico (J/(kg.K))
DOD	Estado de descarga
Gr	Número de Grashof
HEV	Hybrid Electrical Vehicle o Vehículo Eléctrico Híbrido
Ic	Intensidad de carga
Id	Intensidad de descarga
k	Conductividad térmica (W/(m.K))
LCO	Batería de litio cobalto
LFP	Batería de litio ferrofosfato
LiPo	Batería de litio polímero
LMO	Batería de litio manganeso
LTO	Batería de litio titanato
MHEV	Mild Hybrid Electrical Vehicle o Vehículo Eléctrico Híbrido Ligero
NCA	Batería de litio níquel-cobalto-aluminio
NiCd	Níquel Cadmio
NiMH	Níquel-Metalhidruro
NMC	Batería de litio níquel-manganeso-cobalto
Nu	Número de Nusselt
PHEV	Plug-in Hybrid Electrical Vehicle o Vehículo Eléctrico Híbrido Enchufable
Pr	Número de Prandtl
Qbat	Capacidad de la batería
Ra	Número de Raileigh
Rint	Resistencia interna
SOC	Estado de carga
SOH	Estado de salud
U	Coefficiente de película (W/(m ² .K))
Voc	Tensión en circuito abierto
VRLA	Valve Regulated Lead Acid o batería de ácido de plomo regulada por válvula
Vt	Tensión en bornes
τ	Tiempo característico (s)

1 INTRODUCCIÓN

1.1 *Antecedentes*

El presente trabajo tiene cabida en nuestros días debido al gran desarrollo que está experimentando el vehículo eléctrico, propiciado por el aumento de emisiones de efecto invernadero (CO₂ y NO_x principalmente), y otras emisiones como puedan ser partículas de los vehículos de combustión interna (ICE). Todas estas emisiones son perjudiciales para el ser humano y el medio ambiente, por lo que el desarrollo de estos vehículos, puede ser un balón de oxígeno para el planeta, siempre y cuando la producción de la energía con la que estos se propulsan, sea energía verde o menos contaminante. Además, los fabricantes de los vehículos se están viendo obligados a recurrir a este tipo de vehículos, debido a las sanciones que se imponen en caso de no cumplir con las exigencias de emisiones, pudiendo llegar a miles de millones de euros.

La batería electroquímica es actualmente el sistema de almacenamiento más utilizado por los vehículos eléctricos, y por ello, este TFM se enfoca hacia ellas, aunque se explican brevemente otros sistemas existentes y otros que se encuentran bajo investigación, los cuáles se podrían implementar de forma separada o conjunta a estas baterías.

El actual trabajo, se apoya en el Trabajo Fin de Máster (Diseño y montaje de un banco de ensayos de baterías de iones de litio para la realización de prácticas docentes) de Darío Delgado Esteban, y la Tesis que se encuentra realizando Iván Rodríguez Cea, antiguos alumnos del máster en Ingeniería de Automoción, de tal forma que se utilizan algunos recursos proporcionados por ellos.

1.2 *Justificación del TFM*

Como se ha mencionado anteriormente, el vehículo eléctrico lleva desarrollándose y expandiéndose durante los últimos años, y se prevé que continúe así durante varios años más. Por ello, ante la multitud de composiciones químicas de batería existentes, así como configuraciones, se pretende desarrollar una herramienta para la formación del alumnado sobre estas baterías electroquímicas. De esta forma, los alumnos podrán diferenciar entre unas y otras, por medio de sus características eléctricas, químicas y mecánicas, y les permitirá discernir en cada ámbito de aplicación, cuales son más o menos beneficiosas, siempre poniendo el vehículo eléctrico (o híbrido) en el centro de atención. Además, puesto que el desarrollo de las baterías aún se encuentra en un estadio medio de investigación para su aplicación en el vehículo eléctrico, se indicarán las líneas de investigación existentes para futuros vehículos.

1.3 *Objetivos*

El **objetivo general** del presente Trabajo Fin de Master es dar a conocer los diferentes tipos de baterías electroquímicas existentes mediante el desarrollo de unas herramientas Excel, que permita mostrar las características de éstas, su comportamiento en diferentes situaciones y procesos de carga y descarga, y realizar comparativas entre los distintos tipos. El trabajo se focaliza en las baterías de iones de litio, pero sin olvidar otras químicas que se utilizan y se han utilizado en la automoción.

Para alcanzar el objetivo mencionado, se establecen a continuación los **objetivos específicos**:

- Describir brevemente la situación del **vehículo eléctrico**, y sus previsiones.
- Dar a conocer los principales **sistemas de almacenamiento de energía** posibles para la propulsión del vehículo.
- Conocer el **principio de funcionamiento de las baterías**, principalmente las baterías de iones de litio, así como la investigación actual hacia nuevas químicas de baterías futuras.

- Conocer las diferentes **características eléctricas y diversas tipologías** existentes según el material y estructura utilizada para la fabricación de la batería.
- Realizar una búsqueda sobre los diferentes tipos de **baterías comerciales** y obtener sus características principales.
- Elaborar una **tabla normalizada** que englobe las **características eléctricas** para poder realizar comparativas entre los diferentes tipos de batería.
- Explicar el funcionamiento de los **procesos de carga y descarga de las baterías**, así como las curvas características de éstas.
- Calcular la evolución de la **temperatura de las baterías** durante los procesos de carga y descarga.
- Presentar la influencia que tiene la **temperatura, longitud y sección de los cables** del conexionado entre celdas de batería.
- Utilizar la herramienta de carga y descarga de baterías para realizar **simulaciones** con variación de **intensidades y tensiones** (aplicadas o límites), y número de baterías (en serie, en paralelo, o ambas)
- Utilizar la herramienta para mostrar los **efectos de envejecimiento** (reducción de capacidad Q_{bat} , aumento de R_{int}) a lo largo de un elevado número de ciclos.

1.4 *Competencias*

Este TFM también pretende contribuir al desarrollo de las siguientes competencias del Máster en Ingeniería de Automoción, además de las ya obtenidas durante el desarrollo de las demás asignaturas:

- **Competencias generales:**
 - **G.1.** Poseer, comprender y aplicar conocimientos para concebir, diseñar, organizar actuaciones, poner en práctica y adoptar un proceso sustancial de creatividad e innovación para el desarrollo de nuevos conceptos e ideas.
 - **G.2.** Capacidad de integrar y aplicar conocimientos y su comprensión para la resolución de problemas en entornos nuevos o poco conocidos dentro de contextos más amplios y multidisciplinares a partir de la información disponible.
 - **G.3.** Capacidad de comunicar sus conclusiones, conocimientos y razones últimas que las sustentan tanto a destinatarios especializados, mediante informes y documentos técnicos, como a públicos no especializados.
 - **G.4.** Capacidad de aprendizaje para el futuro de un modo que habrá de ser en gran medida autodirigido o autónomo.
 - **G.7.** Capacidad de promover y fomentar el avance tecnológico desde una perspectiva social justa y medioambientalmente sostenible.
- **Competencias específicas:**
 - **E.1.** Poseer y comprender conocimientos sobre la industria de automoción, el contexto económico, energético y medioambiental del automóvil, y la normativa general asociada.
 - **E.2.** Poseer y comprender conocimientos sobre los aspectos específicos de la fabricación y la logística en la industria de la automoción.
 - **E.3.** Poseer y comprender conocimientos sobre los vehículos automóviles, su arquitectura, su comportamiento, y los sistemas que los integran.

- **E.4.** Poseer y comprender conocimientos específicos sobre sistemas de propulsión convencionales y sus combustibles, sobre combustibles alternativos, sobre nuevos sistemas de propulsión y sobre nuevas arquitecturas de vehículos, incluyendo el almacenamiento de energía.
- **E.6.** Poseer y comprender conocimientos y su aplicación en aspectos relacionados con los sistemas eléctricos, electrónicos, de control y de comunicaciones utilizados en los automóviles, incluyendo los sistemas de tracción eléctrica y los convertidores de potencia.
- **E.9.** Poseer, comprender y aplicar conceptos sobre el diseño de componentes, y los procesos de innovación.

1.5 Estructura de la memoria

Este documento se estructura en varios capítulos, de tal manera que, intenta primeramente dar una visión general sobre el vehículo eléctrico, para más tarde hacer hincapié sobre las baterías electroquímicas y sus características. Una vez interiorizado esto, se pasa a explicar el desarrollo de las herramientas, y los resultados obtenidos de su utilización, así como el análisis de estos. Y por último un capítulo sobre las conclusiones obtenidas del trabajo.

Los capítulos, son los siguientes:

- **Capítulo 1: Introducción.** En este apartado y sus subapartados, se expone brevemente el fundamento del proyecto, su justificación y los objetivos y competencias que se pretenden alcanzar y desarrollar.
- **Capítulo 2: Los vehículos eléctricos.** En este capítulo se desarrolla brevemente la historia del vehículo eléctrico, su actualidad y futuro, así como posibles sistemas de almacenamiento de energía para su propulsión. Y una explicación sobre la carga y descarga de baterías.
- **Capítulo 3: Funcionamiento y descripción de las baterías electroquímicas.** A lo largo de este apartado se describe el funcionamiento de la batería, sus elementos principales, así como los parámetros esenciales de las baterías, sus configuraciones geométricas y los diferentes procesos de carga y descarga.
- **Capítulo 4: Tipos de baterías electroquímicas según su composición.** Se detallan los diferentes tipos de químicas que se utilizan en la actualidad y las químicas que se encuentran en desarrollo, así como las características específicas de cada una de ellas.
- **Capítulo 5: Herramientas desarrolladas para la formación.** Se explican de forma pormenorizada las herramientas creadas y utilizadas para el desarrollo del proyecto, que permite la formación en baterías de los alumnos del máster.
- **Capítulo 6: Conclusiones.** En este apartado se relatan las conclusiones obtenidas de la consecución del TFM, además de la citación de las aportaciones realizadas y las posibles mejoras futuras que puedan realizarse y no se hayan desarrollado en este trabajo.
- **Referencias bibliográficas.** Se detallan todas las fuentes de las que se ha obtenido la información utilizada para el correcto desarrollo trabajo.
- **Anexos.** Se incluyen en este capítulo algunos de los documentos creados y utilizados para el desarrollo del trabajo:
 - **Anexo 1.** Tabla normalizada de características de las baterías.
 - **Anexo 2.** Cálculo del coeficiente de transmisión por convección.

- **Anexo 3.** Estudio de la influencia de la temperatura, longitud y sección de los cables de conexionado de las baterías.
- **Anexo 4.** Estudio paramétrico de sensibilidad de la temperatura de la batería.
- **Anexo 5.** Estudio comparativo de los resultados de temperatura obtenidos experimentalmente y los calculados.
- **Anexo 6.** Resultados y análisis del programa de carga y descarga de baterías
- **Anexo 7.** Gráficos comparativos de las baterías del libro de hoja de características y nomenclatura comercial de la química de las baterías

2 LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

2.1 Historia

Los primeros vehículos eléctricos con baterías no recargables aparecen sobre la década de 1830, y tiene que pasar aproximadamente medio siglo, a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, hasta que se desarrollan las baterías de plomo ácido que permiten la recarga, lo suficiente para poder ser utilizadas en vehículos eléctricos comerciales. Ya con la producción de baterías en masa, los vehículos eléctricos juegan un importante papel en el emergente mercado de la automoción, tanto vehículos privados como taxis (ver fig. 1) [Pistoia].



Figura 1. Taxi eléctrico de Nueva York en 1901 [Larminie, 2012]

Estos vehículos eran más fiables que los de combustión interna de la época, malolientes, ruidosos y con necesidad de arrancarlos manualmente. Por ello, para 1910 existían ya miles de automóviles, camionetas, taxis, autobuses eléctricos... Sin embargo, a pesar de este hecho, una vez el petróleo (con mayor energía específica que las baterías) se convierte en un combustible barato y ampliamente disponible, y se llega a la producción en masa (y con ello, la disminución de costes) de los vehículos de combustión de la mano de Henry Ford y el motor de arranque, estos se convierten en la opción más atractiva. La gran diferencia de autonomía, la falta de infraestructura eléctrica fuera de la ciudad, el precio más caro de la electricidad frente a la gasolina (en esa época), así como la facilidad de repostaje del depósito en comparación con las baterías, hacen que los vehículos de combustión interna se conviertan en los vehículos más utilizados. Con ello, en la década de 1920, los vehículos eléctricos quedan relegados a maquinaria industrial, como puedan ser carretillas o elevadores. Irónicamente, los motores de arranque han sido el principal mercado para las baterías recargables de plomo, manteniéndolas con vida [Larminie, 2012].

En los años 60-70, debido a factores como la preocupación medioambiental por la contaminación atmosférica y la gran crisis del petróleo por su limitada cantidad de producción, el mercado observa un impulso del vehículo eléctrico, en el que los fabricantes lanzan prototipos, vehículos utilitarios como el CityCar (ver fig. 2) y vehículos de reparto.

Ya a finales del siglo XX, aún más conscientes del problema medioambiental, las emisiones realizadas por los vehículos de combustión hacen que se impulse la investigación de nuevo hacia los vehículos eléctricos o hacia los híbridos, como es famoso el predecesor del vehículo eléctrico, el EV-1 de General Motors o el caso del Toyota Prius como vehículo híbrido, consiguiendo transformar el sector por completo [Míguez, 2018].



Figura 2. Coche utilitario Citicar [Motor.es, 2017], Toyota Prius [Toyota, 2020]

2.2 Actualidad y previsiones

Los inicios del siglo XXI, han supuesto el boom definitivo para los vehículos eléctricos, aunque no ha sido hasta ahora, cuando se han notado los efectos acusados de esa investigación y desarrollo, tanto de baterías con nuevas químicas, como de los sistemas de gestión de estas baterías, de los motores utilizados para la tracción, de las mejoras en los sistemas de climatización (que aún tienen mucho por mejorar respecto a eficiencia se refiere) ...

Hay que hacer especial mención como se ha descrito antes, a Toyota, precursor de los vehículos híbridos, al fabricante Nissan, con su vehículo eléctrico Leaf, y al fabricante considerado disruptor Tesla, que guiado por Elon Musk y partiendo de una startup en Silicon Valley, en muy pocos años ha llegado a ser el mayor fabricante de vehículos eléctricos. Sus vehículos poseen una gran autonomía y eficiencia, conectividad, así como una tecnología muy sofisticada respecto a la conducción autónoma, que ningún otro fabricante posee. Además, con su último modelo de "bajo" coste, el Model 3 (ver fig.3), vehículo eléctrico más vendido en la actualidad, le coloca por delante de todos sus competidores respecto a precio se refiere en el tipo de vehículo.



Figura 3. Tesla Model 3 [Tesla, 2020]

El hecho de la existencia de Tesla, y de las nuevas medidas medioambientales, cada vez más exigentes con los vehículos de combustión, ha hecho que todos los demás fabricantes se hayan tenido que poner las pilas (nunca mejor dicho), cambiando sus políticas e invirtiendo grandes cantidades de dinero en el desarrollo de vehículos eléctricos e híbridos, para no quedarse atrás y luchar por la hegemonía del vehículo eléctrico. Aun así, habiendo presentado avances significativos, y poseyendo mucho más presupuesto y capacidades, no logran alcanzar al que se considera el Apple de los vehículos eléctricos.

Muchos fabricantes y expertos han sido muy escépticos con el vehículo eléctrico, diciendo que no iba a prosperar ni a desarrollarse, ya que aún queda por delante un gran camino sobre mejoras en autonomía frente a los de combustión, aumento de redes de recarga (electrolineras) frente a las gasolineras, la velocidad de recarga de estas baterías o la eficiencia de los sistemas de climatización, pero no es más cierto que finalmente todos ellos se han tenido que rendir y ponerse manos a la obra.

La situación actual de los vehículos eléctricos en el mundo se puede observar en la fig.4:

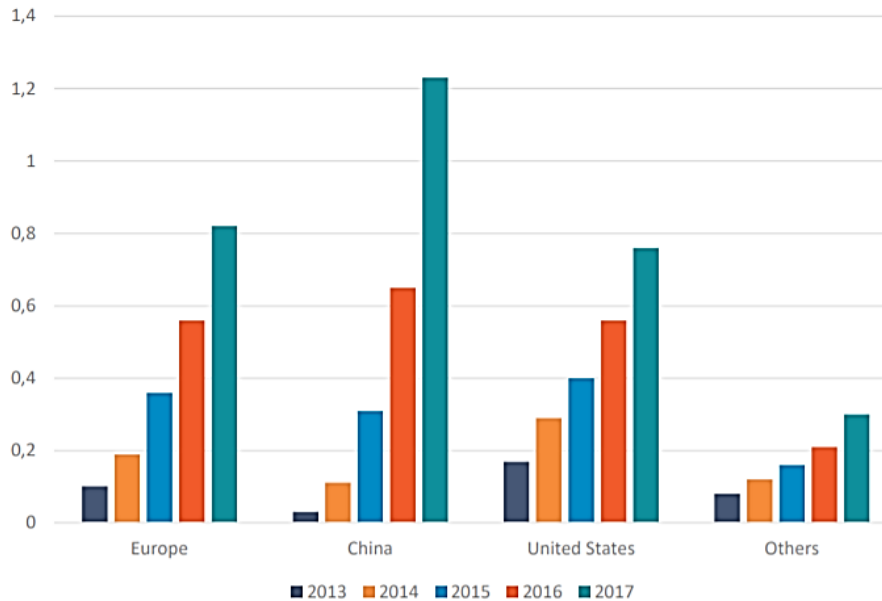


Figura 4. Millones de vehículos eléctricos en circulación en el mundo [IEA, 2019]

Señalar que China es el país que más vehículos eléctricos fabrica y tiene en circulación (también debido a su numerosa población) y que mayor número de fabricantes de estos presenta, destacando BYD o BAIC, los cuales quieren expandirse por Europa, y que fabrican sus propias baterías.

Respecto a las previsiones mundiales de ventas de vehículos eléctricos, la Agencia Internacional de Energía (IEA) en su informe anual de 2019, ha hecho la siguiente previsión fijándose en dos escenarios posibles; las actuales políticas anunciadas por los países, y el escenario 30, en el cual se pretende que, en 2030 el 30% de los vehículos a nivel mundial sean eléctricos (ver fig.5).

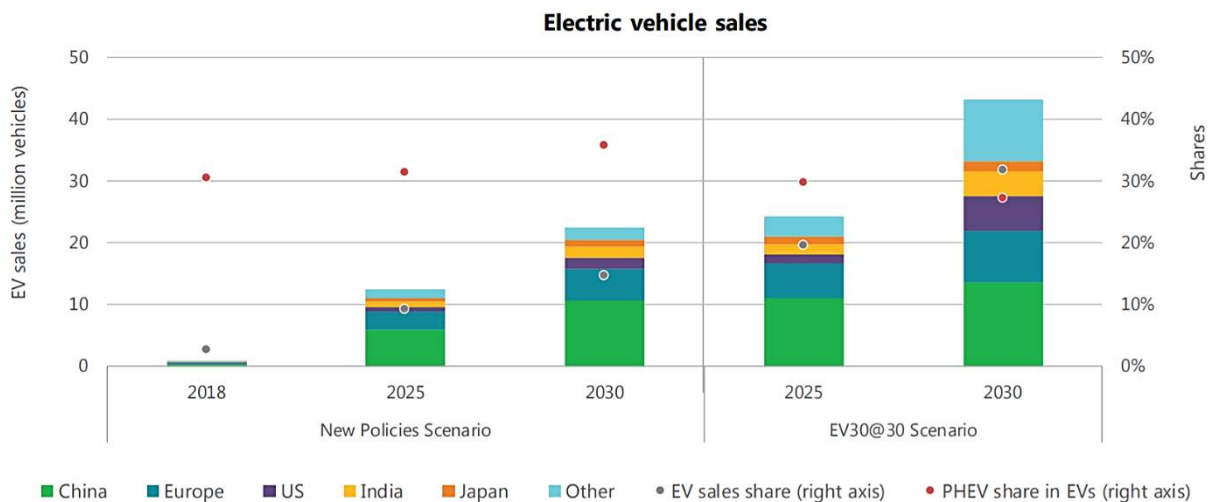


Figura 5. Previsiones de ventas de vehículos eléctricos 2018-2030 [IEA, 2019]

Se puede observar una gran diferencia entre las previsiones con las políticas adoptadas actuales y las del escenario 30, y como en 2018 existe una mínima cantidad de vehículos eléctricos que va a sufrir un gran cambio aumentando drásticamente en los próximos años.

En la fig.6 siguiente, se particulariza en la situación del vehículo eléctrico en España:

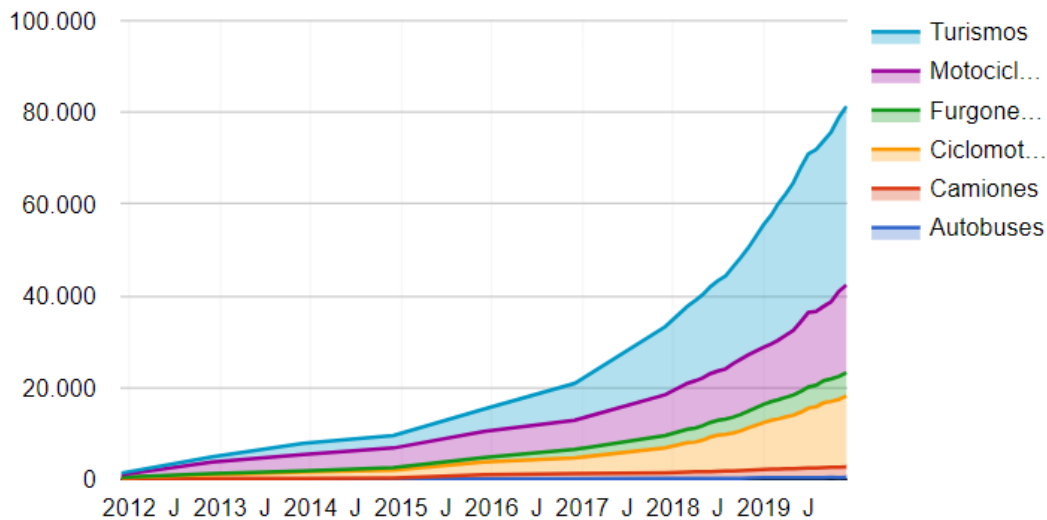


Figura 6. Evolución del parque de vehículos eléctricos en España hasta 2020 [OVEMS, 2020]

Se observa que hasta 2020 los vehículos eléctricos en España llegan escasamente a los 80.000 una situación muy lejana respecto a países como Noruega, Alemania, Francia... que cuentan con un número mucho mayor.

Por último, para finalizar este apartado se muestra a continuación la figura 7 con las previsiones del parque móvil en España:

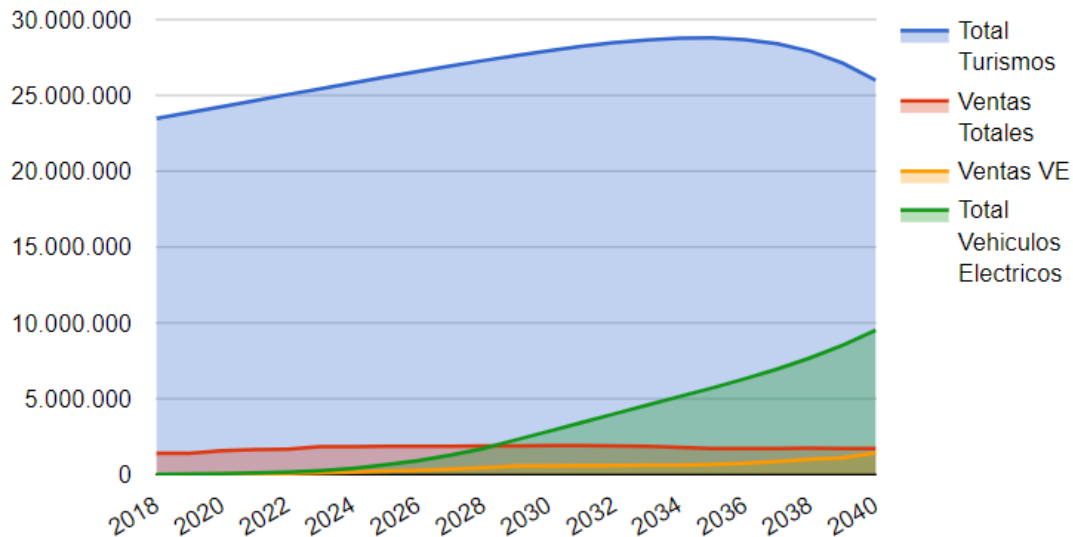


Figura 7. Proyección de la evolución del parque móvil en España [OVEMS, 2020]

El descenso de la curva del total de turismos se prevé por el aumento considerado del vehículo compartido y la retirada de vehículos actuales del parque móvil. Y se observa que aproximadamente, en 2040 en España existirán unos 10 millones de vehículos eléctricos.

2.3 Sistemas de almacenamiento de energía

Los sistemas de almacenamiento de energía, son aquellos sistemas que permiten **absorber** la energía generada por un productor, **almacenar** energía durante un tiempo dado, y **suministrar** esa energía cuando es requerido. Permiten por ello salvar el desfase entre la producción de la energía y la demanda de la misma.

Como se ha visto anteriormente, los vehículos eléctricos se mueven gracias a la tracción que les proporcionan los motores eléctricos, los cuales ofrecen altos rendimientos y se alimentan de energía eléctrica. Pero esta energía es imposible de almacenar en grandes cantidades, por lo que es habitual que la energía eléctrica, primero se encuentre contenida en otro tipo de energía que, transformándose, dé lugar a la energía eléctrica, que es la que se utiliza en la mayoría de aplicaciones. Lo ideal, es que estos sistemas acumulen la energía necesaria, tanto en potencia como en cantidad, que la conversión tenga las mínimas pérdidas posibles de energía, que el tamaño y peso sean reducidos para la aplicación, con un largo ciclo de vida, en unas condiciones seguras (temperaturas, emisiones, vibraciones...) y permitan una transformación inversa devolviendo la energía con la potencia necesaria y con el mayor rendimiento [Luo, 2014] [Tinaut, 2019] [Larminie, 2012] [IEC, 2011].

Existen multitud de **sistemas de almacenamiento** como pueden ser:

- **Bombeo hidráulico (PHS):** Almacenamiento de agua a distinto nivel o bien, aceite a presión.
- **Aire o gas comprimido (CAES):** Cuyo medio de almacenamiento es el aire u otro gas a presión.
- **Volantes de inercia (FES):** Cuyo medio de almacenamiento se produce en una masa rotativa.
- **Baterías electroquímicas:** Cuyo medio de almacenamiento es un electrolito y dos electrodos.
- **Condensadores (DLC):** Su almacenamiento se produce por un campo electrostático.
- **Superconductores magnéticos (SMES):** Almacenamiento es un campo magnético.
- **Hidrógeno y pila de combustible (H2):** Cuyo medio de almacenamiento es el combustible sintético.
- **Químicos:** Cuyo medio de almacenamiento son gas natural sintético (SNG), etanol, metano, hidrógeno...
- **Térmico (TES):** Cuyo medio de almacenamiento son el agua, las piedras, grava, por medio de un calentamiento de éstas.

En el caso del vehículo y la automoción, al que está enfocado este trabajo, los sistemas de almacenamiento más interesantes son los que se describen en los apartados siguientes.

2.3.1 Volantes de inercia

Se trata de sistemas de almacenamiento mecánicos, diseñados principalmente para un suministro de energía de corto periodo de tiempo y basados en el almacenamiento de la **energía cinética de rotación** generada por una masa en movimiento rotacional. Su ventaja frente a otros sistemas es la alta fiabilidad, la predictibilidad, y su largo ciclo de vida con la posibilidad de trabajar en condiciones extremas donde otros no pueden. Existen modelos tanto de alta velocidad como de baja velocidad, y se pueden utilizar en combinación con otros sistemas y para demandas puntuales (existen analogías con los supercondensadores).

Un caso muy interesante es el KERS (Kinetic Energy Recovery System) en la Formula 1, en el volante se acumula la energía producida durante la frenada, y posteriormente aplica esa energía para la aceleración.

La energía cinética almacenada tiene la siguiente expresión:

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

Dónde I es el momento de inercia (kg/m^2) y ω la velocidad angular de la masa (rad/s). Puesto que el momento depende de la distancia al eje de rotación y de la masa, la energía depende de la forma y material en el que esté fabricado el volante.

En la fig.8 se puede observar el despiece principal de un volante de inercia y un diseño real:

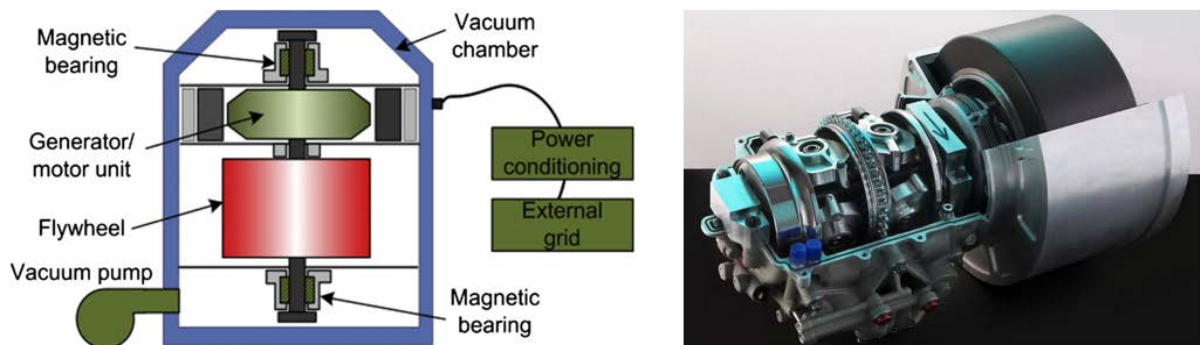


Figura 8. Esquema y sección del volante de inercia [Luo, 2014 y Diariomotor, 2013]

El inconveniente de estos sistemas es el efecto giroscópico que produce en la marcha del vehículo debido a la masa rotacional (aunque puede compensarse con volantes en sentido contrario) y que, la energía que almacena es pequeña, aunque pueda dar grandes cantidades de potencia. Además, presenta una alta autodescarga.

2.3.2 Pila de combustible de hidrógeno

En este caso, se utiliza una pila de combustible que convierte la energía química de éste en energía eléctrica, la cual se almacena en una batería intermedia antes de suministrar la energía al motor, con el fin de filtrar y poder absorber los picos, tanto en la producción como en la absorción (el frenado regenerativo). Existen diferentes tipos de pila dependiendo de los electrodos, el electrolito y el ion que transporta la energía, siendo la más utilizada, la pila PEM (Proton Exchange Membrane), que se alimenta únicamente de hidrógeno puro y aire. La pila completa, está compuesta por los sistemas de aporte (H_2 y aire) y extracción (H_2O y N_2) de productos existentes en la reacción, así como la refrigeración.

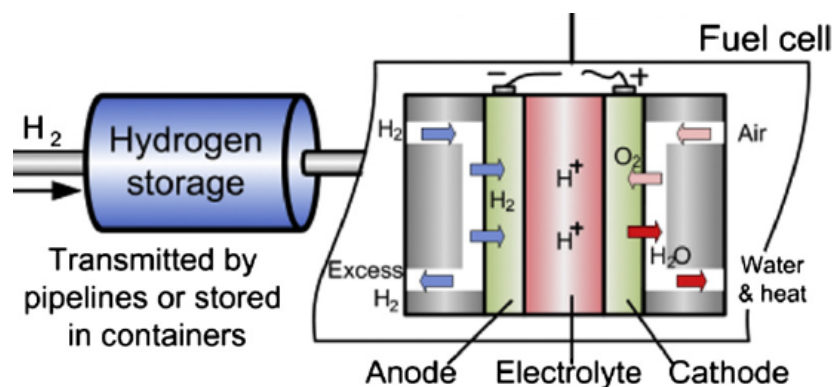


Figura 9. Esquema de la pila de combustible y el almacenamiento de hidrógeno. [Luo, 2014]

Su funcionamiento se basa en la **disociación del hidrógeno** (almacenado en un tanque a unos 700 bares de presión) en electrones y protones en el cátodo (reducción), de tal forma que los electrones circulan por el circuito externo (produciendo una corriente continua que va a la batería) y los iones positivos viajan a través del electrolito, hasta que se encuentran con los electrones del ánodo y el oxidante (oxígeno), para dar como resultado agua y nitrógeno (oxidación) que se expulsa de la celda.

Tiene una alta eficacia de conversión, con lo que, con un depósito se pueden obtener buenas autonomías, además de poder recargar el depósito en breves minutos. No produce emisiones contaminantes ni acústicas y presenta una rápida respuesta a variaciones de la carga.

Su principal problema, se presenta en la producción del hidrógeno, bien sea a partir de la electrólisis del agua, o por el procesado de hidrocarburos. La **producción** puede ser:

- **Externa:** En instalaciones fijas o no, y con distribución en “hidrogeneras” (similares a las gasolineras). Presenta una mayor eficiencia, pero necesita de una infraestructura de repostaje muy complicada y grande, así como de gran coste, tanto por almacenamiento como por producción de grandes cantidades necesarias para satisfacer las necesidades de los clientes.
- **A bordo del vehículo:** Permite reducir los costes de distribución del hidrógeno, la creación de las hidrogeneras, pero habría que incluir el procesador del hidrocarburo pertinente en el vehículo, y adaptar las actuales gasolineras a los combustibles necesarios. Además, estos presentan problemas de espacio en el habitáculo, y de eficiencia en la conversión, así como de prestaciones ya que no se dispone de todo el hidrógeno siempre, sino que se tiene que crear.

En la actualidad, es el principal rival del vehículo eléctrico, aunque bastante por detrás comercialmente hablando debido al complicado suministro y obtención de hidrógeno, así como su precio. Algunos modelos comerciales son el Hyundai Nexu o el Toyota Mirai del que se presenta un resumen de su estructura en la fig.10.

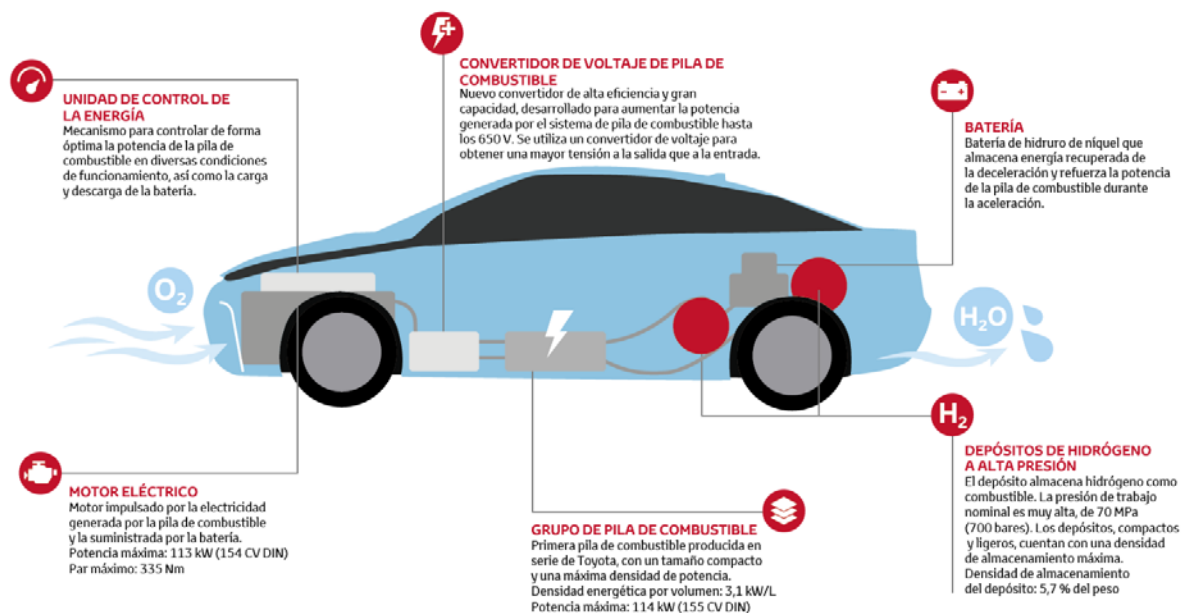


Figura 10. Toyota Mirai [Toyota, 2020]

Como dato destacable, decir que en la actualidad existen solamente tres hidrogeneras en España, certificando así la dificultad que tendría abastecer a nuestro vehículo de combustible.

2.3.3 Supercondensadores

Son condensadores con una gran capacidad de almacenamiento de **carga eléctrica** en forma de energía electrostática, de ahí la condición de “super”, por la gran capacidad. De esta forma, el supercondensador (ver fig.11) recibe cargas iónicas positivas y negativas en sus electrodos, acumulándolas en su capa interna y estableciéndose un campo eléctrico entre las placas separadas por un dieléctrico en el que se almacena la energía, la cual viene determinada por la expresión siguiente:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot q \cdot V$$

Donde C es la capacitancia del condensador definida como la relación entre la cantidad de carga que almacena q (C), y la diferencia de tensión entre las placas (V), que depende del área de las placas y la distancia entre ellas, así como de la permitividad dieléctrica del medio.



Figura 11. Supercondensador Maxwell [Maxwell, 2020]

En el vehículo, estos supercondensadores son muy interesantes a la hora de recoger la energía de las frenadas regenerativas, ya que éstas proporcionan grandes picos de potencia en muy poco tiempo, y los supercondensadores son capaces de absorber esa energía, que como se hablará más adelante, las baterías no pueden hacer. A su vez, al igual que absorben, pueden suministrar altas potencias. En estos aspectos, son muy similares a los volantes de inercia.

Existen multitud de supercondensadores dependiendo de la constitución de sus electrodos, aunque los de carbono son los más extendidos, ya que no se produce reacción química haciendo que la degradación con la carga-descarga sea mínima. Puesto que los supercondensadores no presentan una gran densidad de energía, se está investigando su fabricación con nanotubos de carbono y grafeno como material de los electrodos, de tal forma que aumente su superficie efectiva, y con ello la capacidad de almacenamiento, haciendo que estos elementos sean una opción real de sustitución de las baterías. Presentan una alta autodescarga y mala tolerancia a altas temperaturas, con lo que necesitan de sistema de refrigeración y, además, su tensión depende de la carga, por lo que no se pueden utilizar para aplicaciones de tensión constante.

Actualmente, para los coches eléctricos, estos elementos quedan relegados a la función de acompañamiento para los arranques y frenadas, los requerimientos de potencia alta, y tendrían que actuar de forma conjunta con las baterías, que proporcionarían los requerimientos en la marcha constante. Como dato curioso, decir que el fabricante Tesla, en 2019 realizó la compra de la empresa Maxwell, fabricante de supercondensadores y baterías.

2.3.4 Baterías electroquímicas

Las baterías electroquímicas son los dispositivos de almacenamiento más utilizados en el mundo, y para gran cantidad de aplicaciones (dispositivos electrónicos portátiles, sistemas SAI, energías renovables, sistemas de señalización y emergencias, vehículos...). Dependiendo del material del que estén constituidas (existen infinitud de pilas según composición química), así como de su estructura interna y externa, se utilizarán para unas aplicaciones u otras.

Como su propio nombre indica, se basan en **principios electroquímicos**, de tal forma que, por medio de reacciones químicas de oxidación reducción, producen energía eléctrica (descarga de la batería), o en caso de ser baterías recargables, almacenan la energía eléctrica que reciben en energía química (carga de la batería).

En el vehículo eléctrico (y en otras aplicaciones), éstas baterías están formadas por el elemento principal y unitario que son las **celdas**. Esas celdas, pueden formar agrupaciones serie y/o paralelo,

con el fin de satisfacer las necesidades determinadas de la aplicación formando **módulos**, y esos módulos a su vez se pueden combinar, de tal forma que se cree el **pack** denominado batería, como puede verse en la fig.12:



Figura 12. Empaquetamiento de la batería de un vehículo eléctrico [Vidyanandan, 2019]

Entre las **baterías recargables**, existen unas químicas principales que copan casi la totalidad del mercado, que son:

- Baterías de plomo-ácido.
- Baterías de níquel-cadmio
- Baterías de níquel metal-hidruro
- Baterías de iones de litio.

Aunque más adelante se hablará de los parámetros de las baterías para los vehículos, hay que destacar principalmente dos, que son en los que habrá que fijarse mayoritariamente a la hora de satisfacer las necesidades de un vehículo eléctrico. Estas son la **energía específica** y la **potencia específica**. La primera se relaciona con la autonomía que ofrece el vehículo, y la segunda con la capacidad de aceleración de éste, por lo que se intenta que estos parámetros sean lo mayor posible.

2.3.5 Comparativa de los diferentes sistemas de almacenamiento

Una vez presentados los diferentes sistemas de almacenamiento (ESS), el vehículo eléctrico en cuestión necesita de unos requerimientos, principalmente en energía específica y potencia específica, así como su suministro a lo largo del tiempo (descarga).

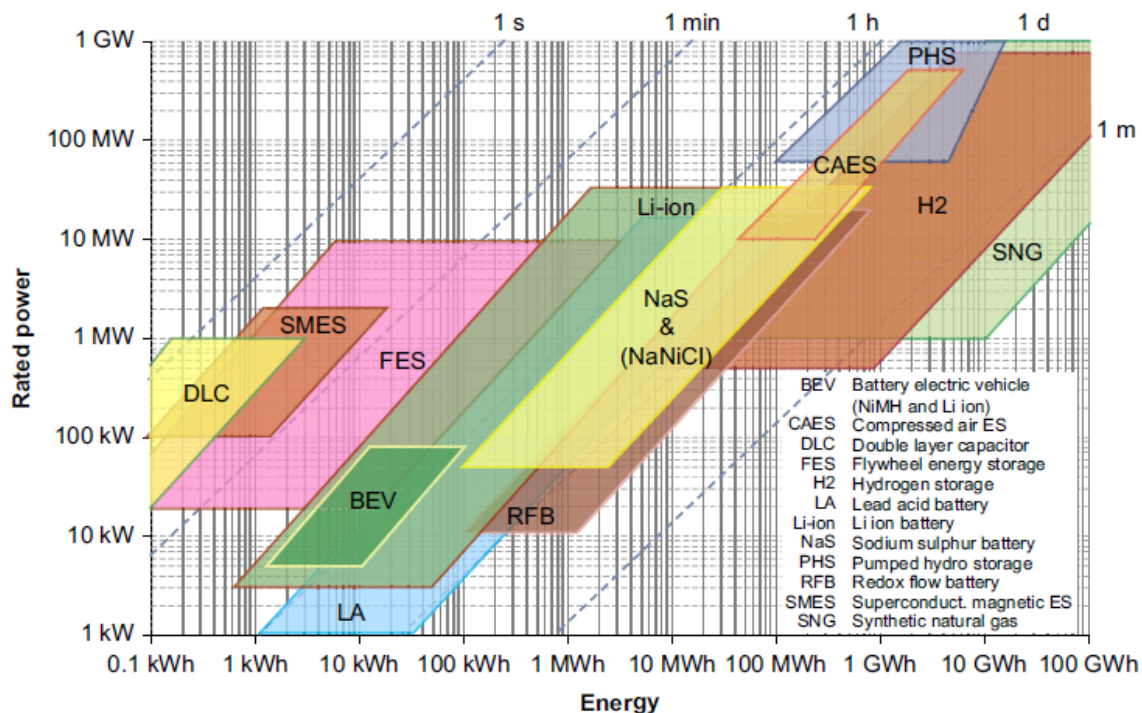


Figura 13. Comparativa Potencia-Energía-Tiempo de descarga de los ESS [IEC, 2011]

En la fig.13 anterior, puede observarse que para aplicaciones de cortos periodos (de segundos a minutos) de descarga o suministro, los condensadores supercondensadores, SMES y volantes de inercia, son los sistemas idóneos, además, que estos ofrecen un buen rango de potencias aunque a bajas energías (ratio energía-potencia menor que 1). A la hora de utilizarlo para aplicaciones con periodos de descarga media (de minutos a horas), también se encuentran los volantes de inercia (aunque estos ya de gran tamaño) y baterías que son muy polivalentes debido a sus varias composiciones, presentando un ratio energía-potencia entre 1 y 10. Por último, para aplicaciones de días a meses, las pilas de combustible con ratios de energía-potencia mayores que 10, y los sistemas hidráulicos y de aire comprimido con ratios entre 5 y 30.

En la fig.14 se muestra algo similar a lo anterior, pero sin relacionarlo con el tiempo de descarga y sí relacionándolo con el propio peso del sistema de almacenamiento, de tal forma que muestra la **energía y potencia en relación con el peso**, es decir, las magnitudes específicas.

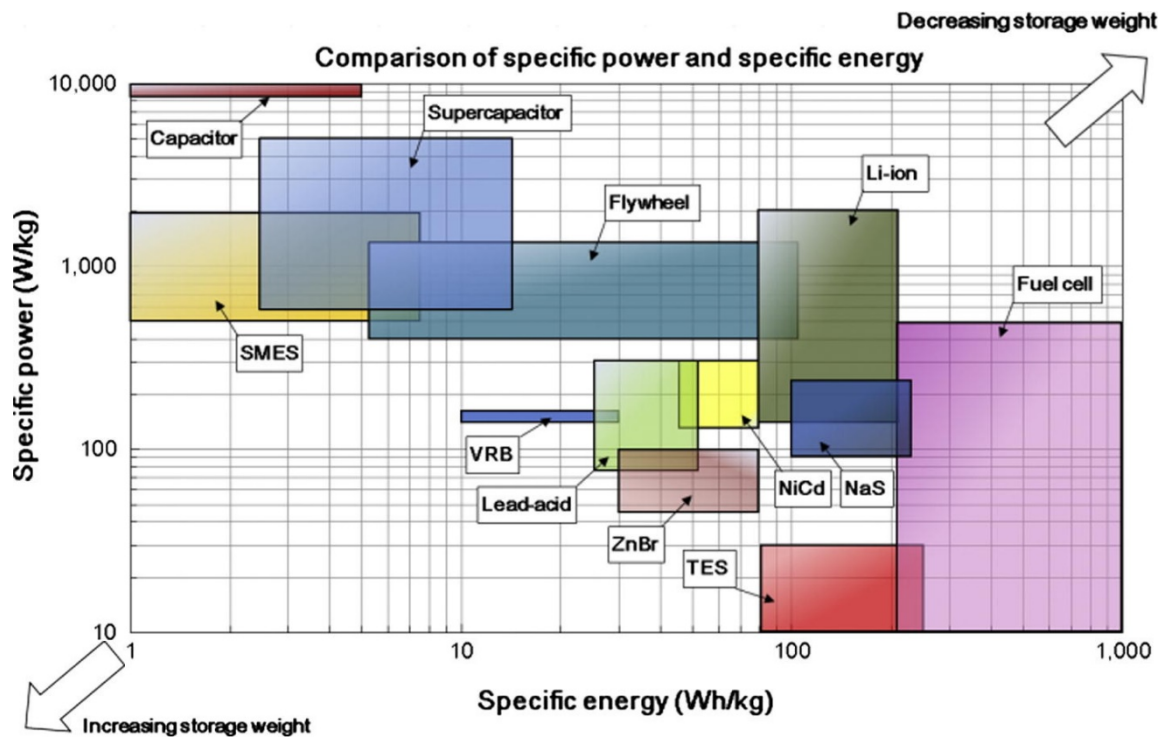


Figura 14. Comparativa de la energía y potencia específica de diferentes sistemas [Zubi, 2018]

Se observa, que los sistemas que más energía y potencia proporcionan respecto a su peso, son las baterías y las pilas de combustible. Es por ello principalmente, y debido a años de investigación y desarrollo que se han escogido las baterías electroquímicas (fundamentalmente las de iones de litio) como el sistema de almacenamiento del vehículo eléctrico.

Que actualmente las baterías sean el sistema que se utiliza, no quiere decir que, en el futuro no pueda ser otro el tipo de almacenamiento, o que lo comparta con otras tecnologías, como es la pila de combustible, principalmente de hidrógeno (que presenta muy buenas características de densidad y potencia). Ya se ha visto que actualmente existe algún modelo de pila de hidrógeno, pero estos por sus actuales características se encuentran por detrás de las baterías, con el hándicap que se está investigando en menor medida que las baterías.

Por todo ello, en lo que viene a continuación del presente trabajo, se hablará únicamente de las baterías electroquímicas.

3 FUNCIONAMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS BATERÍAS ELECTROQUÍMICAS

3.1 *Breve historia*

La primera pila de la que se tiene conocimiento fue la inventada por Alessandro Volta en el año 1800. Esta se trataba de unos discos metálicos de plata y zinc de pequeño tamaño, que se encontraban separados entre por una piel porosa, y a su vez todo ello estaba sumergido en una solución salina. Uniéndolos con un fino cable, circuló una energía que se manifestó en forma de chispa. Además, descubrió también que, al apilar las pilas, el voltaje total aumentaba. El **paso de pila a batería** (batería primaria a batería secundaria), ocurrió 59 años después de la mano de Gaston Planté, un físico francés que utilizó dos electrodos de plomo y una solución de ácido sulfúrico. Aplicando un voltaje a la pila experimentó como se oxidaba un electrodo cambiando el potencial de extracción de la pila, de tal forma que ahora la pila, una vez descargada, se podía volver a cargar. Ya a finales del siglo XIX, en 1899, el sueco Waldmar Jungner, desarrolló la batería de Níquel-Cadmio, y dos años más tarde, Edison produjo una alternativa de ésta, cambiando el cadmio por hierro. Debido a las grandes diferencias de coste entre las baterías de níquel y las desarrolladas, años atrás, sus aplicaciones fueron muy limitadas. Durante los siguientes años, se obtuvieron importantes avances como la sinterización de los electrodos (mayores corrientes y longevidad), o el sellado de la batería Ni-Cd. A mediados de 1970, se desarrollaron las baterías de plomo reguladas por válvula, mejorando mucho su seguridad y mantenimiento, y en la década de los 90, se comercializan ya las baterías de Níquel-Metalhidruro y las de iones de litio, ambas empezadas a desarrollar en los 70, la última de la mano de Sony y siendo actualmente la más utilizada [Buchmann, 2011].

3.2 *Funcionamiento y componentes de la batería*

Como ya se ha explicado en el apartado anterior, la celda es la unidad básica de una batería, que puede estar compuesta por sólo una o una varias de ellas conectadas en serie o en paralelo, con el fin de obtener la tensión y capacidad requeridas por la aplicación.

Su funcionamiento (ver fig.15 para una celda y fig.16 para un pack) se basa en las **reacciones químicas** que se producen en su interior; la **oxidación** que es un proceso de liberación de electrones y la **reducción**, proceso de captación de electrones. Estas reacciones ocurren en y por medio de cuatro elementos principales de la batería. [Viera, 2008] [Buchman, 2011] [Kiehne, 2003]

3.2.1 **Electrodos**

Son los elementos en los que se producen las reacciones de oxidación y reducción, y son los siguientes:

- **Ánodo o electrodo negativo:** En la descarga, se produce la oxidación de este, con lo que aporta los electrones al circuito eléctrico exterior y genera iones positivos o negativos (según la reacción química) que se trasladan por el electrolito. Los materiales activos de los ánodos más comunes y utilizados, son el plomo esponjoso (para las plomo-ácido), un compuesto de cadmio metálico (para las níquel-cadmio), una aleación de hidruro metálico (para las NiMH) y el carbón amorfo o grafito (para las de iones de litio), mientras que el colector o rejilla es plomo antimonio para las de plomo o el cobre (normalmente) para las demás.
- **Cátodo o electrodo positivo:** En este caso, es en el que se produce la reducción durante la descarga, es decir, el que acepta los electrones provenientes del circuito exterior generando los iones negativos o positivos según la reacción. En baterías de plomo ácido, el material activo más común es el peróxido de plomo, mientras que en las basadas en níquel (NiCd y NiMH) es el oxihidróxido de níquel, o en las de litio el litio junto con otros compuestos. A su vez, el material de la rejilla más común para las baterías plomo ácido es el plomo, o el aluminio para las demás.

Durante la carga, al contrario que en la descarga, puesto que **la reacción es reversible** (siempre que se le aplique un voltaje a la batería), se producen los efectos contrarios, llevándose en el ánodo la reducción, y en el cátodo la oxidación.

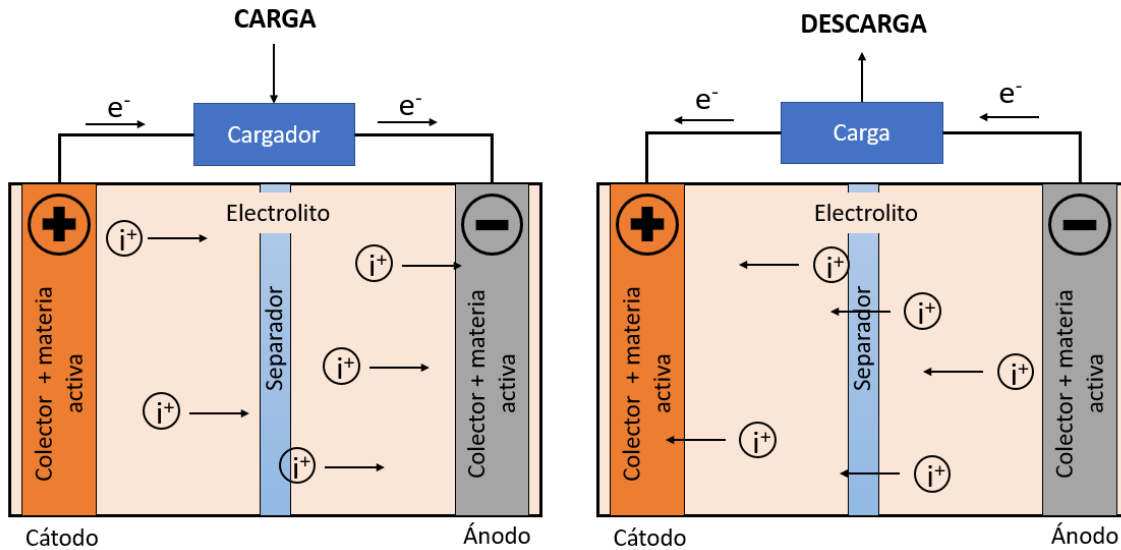


Figura 15. Esquema del funcionamiento de una batería electroquímica con iones positivos [Elaboración propia].

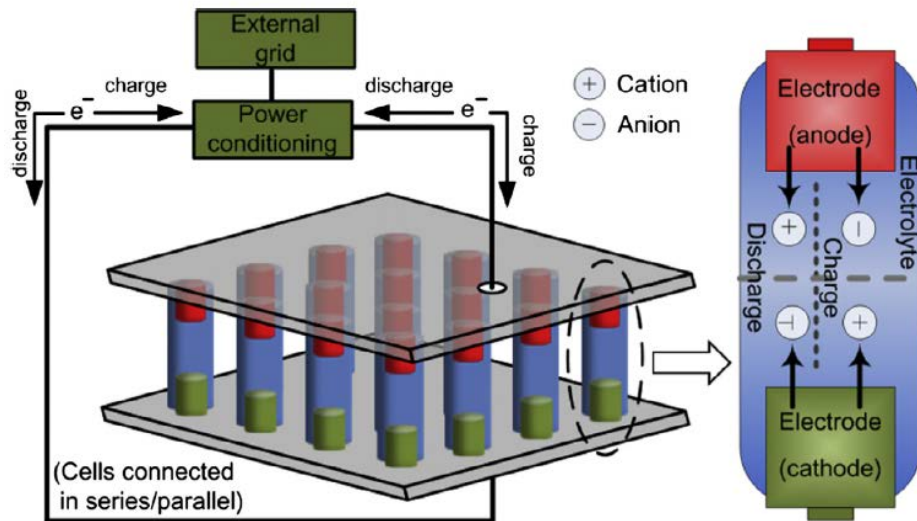


Figura 16. Esquema del funcionamiento de una batería electroquímica en pack [Luo, 2014]

Estos electrodos, se componen de una **rejilla** y de un material activo, la cual sirve de alojamiento a éste y es el conductor eléctrico de la corriente generada en la reacción. Por ello, la rejilla ha de tener buena conductividad y adherencia, elevada resistencia mecánica y alta resistencia eléctrica y a la corrosión, así como ser fino y lo más liviano posible sin limitar el rendimiento. Respecto al **material activo**, que produce las reacciones químicas, sus propiedades más destacadas deben ser; la elevada tensión que hace que se pueda reducir el número de celdas para la obtención de la tensión deseada; elevada eficiencia de las reacciones para tener un buen rendimiento y aprovechar mejor la energía eléctrica; bajo peso para conseguir baterías más ligeras; buena estabilidad con el fin de tener una gran ciclabilidad; alta porosidad para una mejor penetración del electrolito; y una fácil fabricación y bajo coste.

La **energía y potencia** que las baterías aportan, viene fundamentalmente dada por la **cantidad de material activo** de los electrodos, así como su **área y grosor**. Con ello se deberá jugar para conseguir las características requeridas en cada aplicación.

3.2.2 Electrolito

Es el medio en el que se encuentran sumergidos los electrodos y el que permite el desplazamiento o **traslado de los iones** generados en la reacción entre el ánodo y el cátodo. Habitualmente es una solución líquida de un ácido, base o sales, y su concentración determina en gran medida el comportamiento de la batería. Los electrolitos utilizados según las químicas generales son el ácido sulfúrico para las baterías de plomo ácido, el hidróxido de potasio para las NiCd y NiMH y una sal de litio mezclada con disolventes orgánicos (carbonatos) en las Li-ion.

Entre sus **propiedades**, deben destacar:

- Alta conductividad iónica, que mejore la eficiencia de la batería.
- Buena estabilidad térmica, para no perjudicar la salud de la batería.
- Bajo efecto corrosivo hacia los electrodos, para asegurar la salud de la batería.
- Bajo nivel de impurezas, que no perjudique la eficiencia.
- Bajo coste.

3.2.3 Separador

Este elemento es esencial en la batería electroquímica, ya que **proporciona el aislamiento eléctrico** necesario entre el ánodo y el cátodo, evitando que se produzcan cortocircuitos entre los electrodos que presentan polaridades opuestas, y a su vez permitiendo el paso de los iones de un electrodo a otro. La única corriente que puede pasar por el separador es la de autodescarga. Los materiales que suelen formar los separadores en las baterías a base de níquel, al igual que en las de iones de litio, son películas de poliolefina porosas (PE o PP), nylon o celofán. En las de plomo, los materiales pueden ser celulósicos, fibra de vidrio y poliméricos como PVC o PE.

Las **características** que debe presentar un buen separador son:

- Alta capacidad aislante o resistencia dieléctrica.
- Adecuada porosidad (distribución y tamaño). En caso de sobrecalentamiento, los poros se cierran para bloquear el paso de los iones.
- Compatibilidad con el electrolito y permeabilidad para el humedecimiento.
- Buena resistencia mecánica.
- Elevada resistencia a la degradación de agentes químicos y a la oxidación.
- Ausencia de impurezas y otros elementos.

3.2.4 Contenedor

Es el sistema o conjunto en el que se recogen todos los demás elementos nombrados anteriormente y que dan lugar a la celda. Asimismo, **da el soporte y la rigidez mecánica** al conjunto, suficiente para su correcto funcionamiento. Se utilizan tanto plásticos poliméricos, por ejemplo, el polipropileno, como aluminio o como aceros recubiertos de níquel.

Como **características** necesarias para un buen contenedor, señalar las siguientes:

- Presentar gran resistencia dieléctrica.
- Alta resistencia a impactos.
- Elevada capacidad frente a choques térmicos.
- Alta resistencia a la corrosión, tanto interior como exterior.
- Siempre que se pueda, bajo peso.

Puesto que, debido a las reacciones químicas existentes en el interior, se pueden producir gases, hay contenedores que presentan válvulas de seguridad que regulan la presión para preservar la seguridad de las baterías. Son especialmente utilizadas en las baterías de plomo ácido, las llamadas VRLA.

En la fig.17 se muestra la **composición genérica de una batería de litio NMC** utilizada en vehículos eléctricos para cada componente de ésta.

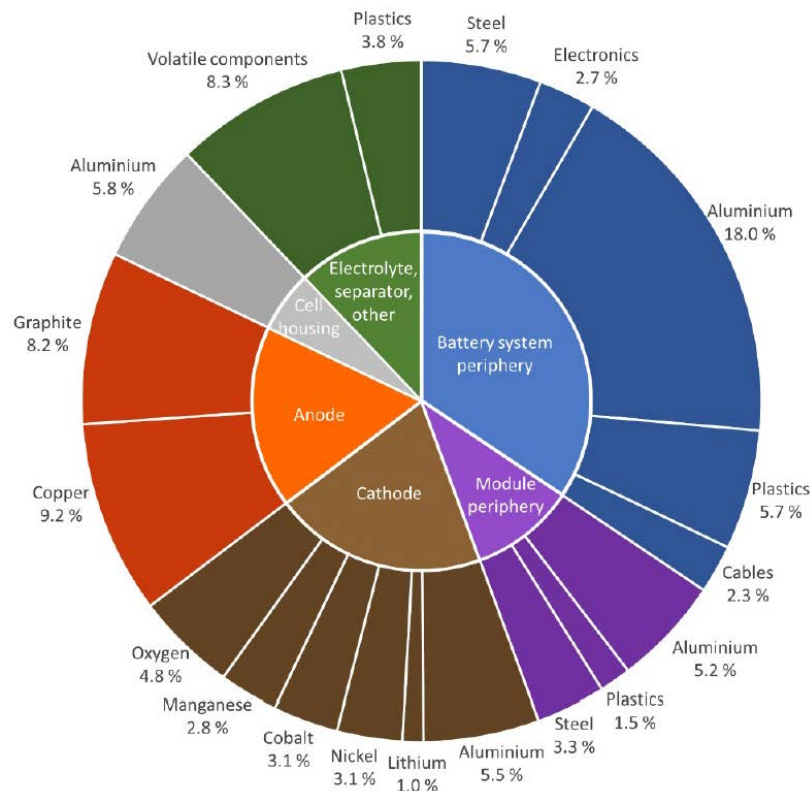


Figura 17. Desglose de una batería de iones de litio NMC genérica para VE. [Kwade and Diekmann, 2018]

3.3 Configuraciones geométricas

Siguiendo con el apartado anterior, en este se realiza una distinción de las configuraciones geométricas utilizadas en vehículos eléctricos **según la geometría del contenedor** (ver fig.18). Hay que tener en cuenta, que el empaquetado de la batería afecta a varios parámetros de rendimiento, como pueden ser la densidad de energía, la tasa C, la vida útil, la eficiencia y la seguridad. Por tanto, es algo que hay que tener muy en cuenta a la hora de fabricar una batería [Berg, 2015] [Miao,2019] [Buchman, 2016]

3.3.1 Cilíndricas

Son el tipo de celda más utilizado en la actualidad, tanto para baterías primarias como secundarias. En su interior se encuentran enrollados el separador, el cátodo y el ánodo y sumergidos en el electrolito. Normalmente se utiliza una carcasa de aluminio o de acero recubierto de níquel, y los terminales se encuentran en la parte superior e inferior del cilindro.

Durante su uso, es decir la carga y descarga, la temperatura interna de la celda aumentará debido a las reacciones llevadas a cabo en su interior. La temperatura dentro de la celda no es uniforme y núcleo estará más caliente que la carcasa, dependiendo de la temperatura ambiente. Dado que el rendimiento óptimo requiere una distribución uniforme de la temperatura, es necesario eliminar el calor del núcleo para evitar situaciones de abuso térmico. El tamaño de las celdas debe ser, por lo tanto, un equilibrio entre la capacidad y el rendimiento térmico.

Desde la perspectiva del pack batería, las celdas cilíndricas no pueden empaquetarse de una manera óptima cuando se conectan en serie y/o en paralelo ya que, con esta geometría, siempre habrá huecos entre las celdas, haciendo que el tamaño final de la batería pueda ser excesivo. Sin embargo, los

huecos son deseables en términos de gestión térmica y pueden, por ejemplo, servir para crear canales de enfriamiento. La posición de los terminales también puede afectar el empaquetado de la celda y ensamblaje del pack.

Por tanto, este tipo de empaquetado cilíndrico de la celda presenta las siguientes ventajas e inconvenientes:

- **Ventajas:** Facilidad de fabricación y bajo coste. Buena estabilidad mecánica que hace que soporte grandes presiones sin deformación mejorando la seguridad y dotando a la celda de una buena ciclabilidad (largo ciclo de vida). En el empaquetado, se puede incorporar un sistema de refrigeración entre sus cavidades en caso de necesidad.
- **Inconvenientes:** Puede llegar a ser muy pesada y voluminosa debido a la cantidad de material de carcasa y conectores, con lo que la energía específica y volumétrica del conjunto puede ser escasa.

Los tamaños más habituales de este tipo de celdas son 18650, 26650 y en los últimos tiempos, 21700 (los dos primeros dígitos indican diámetro en mm y los dos siguientes la altura o longitud en mm) para las baterías de iones de litio, y el tamaño AA para las pilas de NiCd y NiMH, aunque existen otros tamaños clásicos como el C, D o F, aparte de muchos otros. Las baterías de plomo ácido no se fabrican en este formato.

El hecho de aumentar el tamaño de la celda, puede ayudar a reducir pesos en el conjunto, aumentando capacidad de energía, y las energías y potencias específicas.

3.3.2 Prismáticas

Las células prismáticas se pueden producir de dos maneras: enrolladas o apiladas, según las características de rendimiento requeridas. Las carcasas de estas baterías se encuentran principalmente fabricadas en aluminio o plástico reforzado.

Desde la perspectiva del empaquetado, las celdas prismáticas son atractivas ya que se pueden lograr baterías de alta densidad. Sin embargo, la densidad de empaquetado puede generar situaciones de abuso si la gestión térmica no está diseñada y controlada adecuadamente, ya que la disipación de calor de las celdas puede ser un problema, al no tener huecos que lo evacúen pudiendo provocar el calentamiento de las celdas adyacentes. Además, la eficiencia del empaquetado se mejora si los terminales eléctricos se encuentran en el mismo lado del prisma, ahorrándose cableado y por ello peso.

Por tanto, este tipo de empaquetado prismático de la celda presenta las siguientes ventajas e inconvenientes:

- **Ventajas:** Para iguales densidades de energía que las baterías cilíndricas, presentan un menor tamaño y peso, por lo que una mayor energía específica y volumétrica. El hecho de que el volumen sea menor, es muy beneficioso en el caso del tamaño del dispositivo donde se va a alojar. Tiene también una buena estabilidad mecánica, aunque menor que las cilíndricas. En caso de celdas individuales, presenta buena evacuación del calor debido a su mayor área. Flexibilidad en el tamaño de las celdas.
- **Inconvenientes:** Actualmente su proceso de fabricación es más costoso. Presenta una menor ciclabilidad por su estabilidad mecánica, y la gestión térmica del pack en batería puede ser un problema si no se tiene perfectamente diseñado y controlado, debido a la falta de huecos que permitan la disipación de calor entre las celdas.

Existen gran cantidad de tamaños de celdas, la nomenclatura no está tan estandarizada como la de las células cilíndricas y puede diferir ampliamente entre los fabricantes. El formato se da en términos de grosor, anchura y longitud, y existe una tendencia hacia la fabricación de celdas más estrechas y anchas para facilitar la gestión térmica (evacuación del calor).

3.3.3 Pouch

Se podría decir que son un tipo de batería prismática, pero en este caso, en vez de presentar una carcasa rígida, la celda o conjunto de ellas se encuentra alojado dentro de una bolsa fabricada en plástico flexible y papel de aluminio que la dotan de flexibilidad y ligereza respecto a la batería cilíndrica y a la prismática. Dentro de la celda, los electrodos se apilan principalmente o se pliegan en Z para lograr la capacidad y las características de energía y potencia deseadas. El paquete de celdas está sellado por calor o soldadura ultrasónica.

Al igual que las celdas prismáticas de carcasa rígida, las diferencias de temperatura dentro de las celdas son pequeñas, pero la gestión térmica entre las celdas sigue siendo necesaria para un funcionamiento seguro. Además, las soldaduras pueden ser motivo de preocupación en cuanto a robustez y durabilidad. Por tanto, este tipo de empaquetado o envoltorio de la celda presenta las siguientes ventajas e inconvenientes:

- **Ventajas:** Flexibilidad de la celda, y buenas densidades de energía por el tamaño y peso que presentan. Buena evacuación de calor de la celda. Mejor flexibilidad de empaquetamiento y formación del pack.
- **Inconvenientes:** Dificultad de fabricación y de gestión térmica de los packs. Menos fiables debido a posibilidades de rotura o fisura de la bolsa, por lo que más inseguras.

Al igual que las prismáticas, no existen celdas pouch estandarizadas; cada fabricante diseña la suya. Las baterías pouch son comúnmente de polímero de litio.

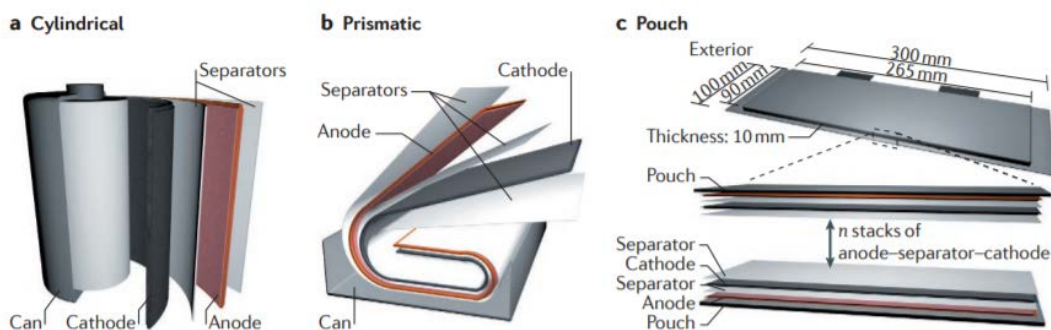


Figura 18. Geometrías cilíndrica, prismática y pouch. [Choi, 2016]

En los últimos años, todas las tecnologías han madurado y las celdas prismáticas y pouch tienen el potencial de almacenar una mayor capacidad que el formato cilíndrico. El costo por kWh en la celda prismática / pouch es aún mayor que con la celda cilíndrica, pero esto está cambiando. Los diseños de celdas planas están obteniendo precios competitivos y los expertos en baterías predicen un cambio hacia estos formatos de celdas (sobre todo en vehículos eléctricos), especialmente si se pueden cumplir los mismos criterios de rendimiento de la celda cilíndrica. En la tabla 1, se realiza un análisis general de las geometrías.

Tabla 1. Comparativa de las geometrías de una batería [Elaboración propia a partir de Berg y Miao]

Forma	Cilíndrica	Prismática	Pouch
<i>Energía específica</i>	-	+	++
<i>Energía volumétrica</i>	-	++	+
<i>Comportamiento térmico celda</i>	-	+	+
<i>Comportamiento térmico pack</i>	+	-	-
<i>Robustez mecánica</i>	++	+	-
<i>Seguridad</i>	++	+	-

Como dato destacable, comentar que, Tesla hasta ahora en sus vehículos utiliza celdas cilíndricas 26650 de Panasonic. Sin embargo, BMW en su modelo i3, utiliza baterías prismáticas de Samsung y el Nissan Leaf utiliza baterías tipo pouch del fabricante AESC. Como se puede ver, no existe una tónica clara al respecto de que batería es mejor, sino que cada fabricante se decanta por una y otra respecto a sus preferencias, costes, conocimientos... [Forocohelectricos, 2019]

3.4 Parámetros característicos eléctricos

En las baterías electroquímicas existen multitud de parámetros. Aquí se va a hacer una exposición de los parámetros principales para entender el funcionamiento de las baterías y poder distinguir entre unas y otras [Tinaut, 2019] [Viera, 2008] [Larminie, 2012].

3.4.1 Tensión

En este caso hay que diferenciar principalmente entre dos tensiones o voltajes, y estos son:

- **Tensión de la batería o tensión entre terminales (V_t):** Es el voltaje medido en voltios existente en los terminales de la batería y está definido por el potencial de reducción del cátodo (química del material activo). Normalmente se encuentra definido entre 1V (tensión mínima de descarga = V_{\min}) y 4V (tensión máxima de carga = V_{\max}) dependiendo del electrodo.
- **Tensión en circuito abierto (V_{oc}):** Es el voltaje de la batería cuando se encuentra en circuito abierto, es decir, cuando no circula corriente por ella.

En caso de encontrarse en reposo, es decir, no circular corriente ni de carga ni de descarga, los voltajes V_t y V_{oc} deberán tener el mismo valor, ya que no se produce caída de potencial en la resistencia interna (R_{int}). En la descarga, una expresión simplificada de estos valores para un circuito equivalente de la batería podría ser la de la figura 19 siguiente:

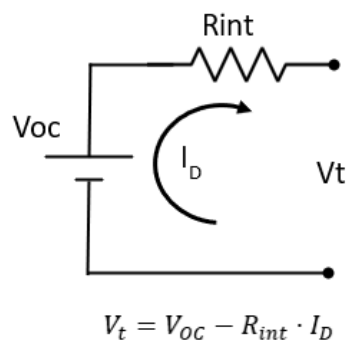


Figura 19. Circuito equivalente de la batería y expresión de V_t [Elaboración propia]

Por ello, en la descarga la tensión en bornes V_t es menor que la V_{oc} , y en la carga ocurre lo contrario.

3.4.2 Resistencia interna

Es la resistencia que ofrece la batería al paso de corriente. Se expresa en ohmios y depende de la química de la pila, de los elementos estructurales que lo forman (electrodos, electrolito), mantenimiento de la pila, ciclos de uso...

3.4.3 Corriente

En este apartado cabe destacar que existen múltiples corrientes a la hora de hablar de una batería. Las más importantes son:

- **Corriente nominal de carga o descarga:** Corriente nominal carga o de descarga para un tiempo determinado expresado en la proporción C, indica la corriente que hay que aplicar para que se lleven esos procesos en dicho tiempo.

- **Corriente C ó C1:** Corriente nominal de carga o de descarga para un tiempo nominal de una hora. Su valor en amperios (A) coincide con el valor de la capacidad nominal de la batería en Ah. El interés de usar este parámetro es que las intensidades divididas por el valor C1 suponen las mismas tasas de carga o descarga independientemente del tamaño de la batería (capacidad) darle una vuelta
- **Corriente máxima de carga continua:** Corriente a la cual se puede cargar una batería de manera continuada sin provocar sobrecarga en ella. Típicamente entre 1C y 3C, dependiendo del tipo de química de la batería.
- **Corriente de pico:** Corriente máxima que puede proporcionar una batería durante un corto periodo de tiempo sin sufrir deterioro o cortocircuito. Su valor depende en gran medida del tipo de química de la batería.
- **Corriente final de carga.** Es la corriente a la cual la batería deja de cargarse porque se interpreta que ya se encuentra completa. Suele corresponderse con el valor de 0,02C.

3.4.4 Capacidad

Representa la cantidad de electricidad o, mejor dicho, carga eléctrica que puede almacenar una batería en su interior durante el proceso de carga completa, o que puede suministrar al exterior en la descarga durante un tiempo determinado.

El valor máximo o capacidad nominal (Q_{nom}) es la capacidad que puede entregar una batería desde la plena carga, hasta alcanzar la tensión $V_{mín}$ de descarga, y dependerá del tamaño de los electrodos y del electrolito. Su unidad es el culombio (C) o amperio-hora (Ah) y su expresión es:

$$Q_{nom} = \int_{t_{final}} I_{nom} dt = I_{nom} \cdot \Delta t$$

La carga acumulada en un cierto instante de tiempo se expresa en culombios (C) o amperios-hora (Ah) y su expresión viene determinada por la siguiente ecuación:

$$Q_{bat}(t) = \int_0^t dq = \int_0^t I_C(t) dt - \int_0^t I_D(t) dt$$

3.4.5 Energía almacenada

Es el valor de energía (Wh o J) capaz de almacenar la batería, y resulta de multiplicar la capacidad por el voltaje de la celda:

$$E_{nom} = \int_t V \cdot I \cdot dt = V_{nom} \cdot I_{nom} \cdot \Delta t = V_{nom} \cdot Q_{nom}$$

La energía acumulada durante un determinado instante de tiempo por tanto es:

$$E_{bat}(t) = \int_0^t V \cdot dq = \int_0^t V \cdot I_C(t) dt - \int_0^t V \cdot I_D(t) dt$$

3.4.6 Estado de carga

El estado de carga o SOC, es la capacidad disponible de la batería en función de la capacidad nominal. Se expresa en porcentaje (%) y su fórmula es:

$$SOC_{bat}(t) = \frac{Q_{bat}(t)}{Q_{nom}} * 100$$

La tensión Voc de la batería varía en función del estado de carga, de tal forma que V_{máx} se corresponde con el 100% del SOC y V_{mín} con el 0% del SOC. Típicamente para garantizar una buena vida de la batería, el SOC varía entre el 20% y el 90%, aunque depende de las químicas y sus aplicaciones. En la fig.20 se puede observar su variación dinámica en los vehículos híbridos y eléctricos.

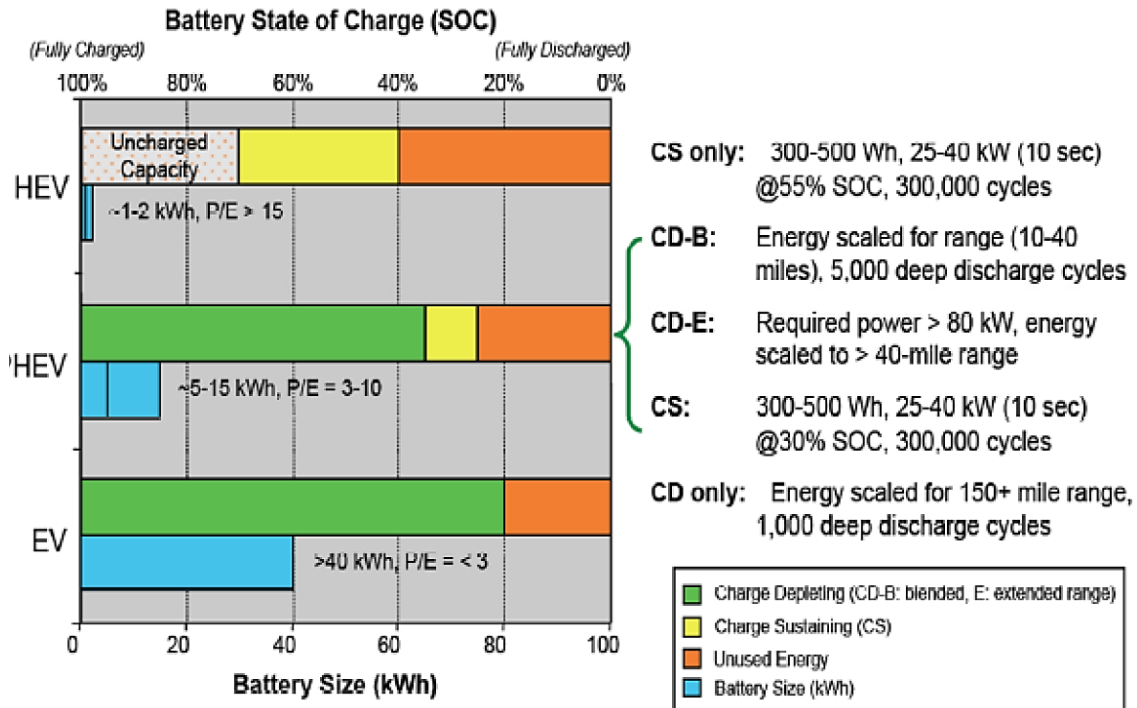


Figura 20. Distribución de la utilización de la capacidad de la batería [Ottaviano, 2013]

3.4.7 Profundidad de descarga

La profundidad de descarga o DOD, es la relación de capacidad entregada por la batería durante su descarga, y la capacidad nominal de ésta, expresada en porcentaje, es decir, la capacidad hasta la cual se ha descargado. Viene a ser el contrario que el SOC:

$$DOD_{bat}(t) = 100 - SOC_{bat}(t)$$

3.4.8 Estado de salud

El estado de salud o SOH de una batería es un parámetro que permite definir o reflejar la condición actual de una batería, para ofrecer las prestaciones previstas en comparación con una batería nueva. Es un indicador del grado de degradación de la batería, provocado por los procesos irreversibles físicos y químicos (debidos al uso y la edad), y se puede utilizar para estimar el tiempo de vida restante, es decir, hasta que deja de ser útil. Depende de multitud de factores como la resistencia interna, la capacidad, el voltaje, número de ciclos, la autodescarga...

En comparación con el SOC que se puede determinar mediante la capacidad de la batería, no existe un proceso de obtención absoluto para el SOH, por lo que se puede realizar una estimación de éste por medio de parámetros anteriormente comentados, observando las diferencias con los de la batería en estado nuevo. Las siguientes expresiones se pueden utilizar como estimación según la capacidad y resistencia interna respectivamente:

$$SOH(Q_{bat}) = 1 - \frac{Q_{bat_0} - Q_{bat_t}}{Q_{bat_0}} = 1 - \frac{\Delta Q_{bat_t}}{Q_{bat_0}} = \frac{Q_{bat_t}}{Q_{bat_0}} < 1$$

O bien,

$$SOH(R_{int}) = 1 - \frac{R_{int_t} - R_{int_0}}{R_{int_0}} = 1 - \frac{\Delta R_{int_t}}{R_{int_0}} = 2 - \frac{R_{int_t}}{R_{int_0}} < 1$$

3.4.9 Autodescarga

Es la pérdida de capacidad de una batería cuando se encuentra en circuito abierto. Suele expresarse en términos de pérdida de capacidad respecto a la capacidad nominal en el periodo temporal de un día o de un mes, y viene dada por la fuga de iones de un electrodo a otro a través del separador.

3.4.10 Ciclo de vida

Es el número de ciclos (secuencia de carga/descarga de una batería para una DOD determinada) que una batería puede soportar bajo determinadas condiciones.

3.4.11 Intervalo térmico de trabajo

Determina el rango de temperaturas dentro del cual la celda trabaja correctamente y en situación segura. En las baterías suele encontrarse entre los -20°C y los 60°C . También los fabricantes establecen un rango de temperaturas para su almacenamiento, de forma que estas se deterioren lo menos posible.

3.4.12 Rendimiento carga/descarga

Indica la relación entre la carga o energía almacenada/suministrada en/por la batería, y la energía aportada/obtenida a/de la batería en el proceso de carga/descarga. Estos rendimientos pueden oscilar entre el 75% y el 95% dependiendo de factores como el tipo de batería, la temperatura, la corriente de carga/descarga...

Gran parte de la pérdida de rendimiento se debe a las reacciones químicas y el efecto joule que provoca la resistencia interna de la batería, transformándose la energía, en calor.

3.4.13 Energía específica

Es el parámetro que determina la cantidad de energía que puede almacenar o proporcionar la batería por unidad de masa y es característico del tipo de batería. Se expresa en Wh/kg y tiene fuerte relación con la autonomía del vehículo.

3.4.14 Potencia específica

Es el parámetro que determina la cantidad de potencia que puede proporcionar la batería por unidad de masa y es característico del tipo de batería. Se expresa en W/kg y proporciona la máxima corriente eléctrica que la batería es capaz de absorber/suministrar, y por ello del par del motor eléctrico, lo cual se relaciona con la aceleración.

3.5 *Procesos de carga y descarga de las baterías*

Tanto para la carga como la descarga de las baterías, existen diferentes modos que se explican a continuación [Triana, 2017] [Dhameja, 2001] [Buchman, 2016] [Tinaut, 2019].

3.5.1 Carga

En el caso de la carga de baterías, existen tres principales métodos que son:

- **Tensión constante (CV):** Es uno de los métodos más simples y utilizados en la carga de baterías de plomo ácido, aunque válido para cualquier tipo. En él, se fija una tensión constante, de forma que se produce una variación de la corriente a lo largo de todo el ciclo de carga. Así, al aumentar el voltaje de la celda, la corriente decrece gradualmente hasta cero, que es cuando la batería llega al voltaje fijado y se encuentra completamente cargada. Su

principal inconveniente es que la corriente al principio de la carga puede llegar a ser muy alta si la diferencia de tensión aplicada por la fuente y la tensión actual de la batería es alta, perjudicando la salud de esta última. Además, no se pueden conseguir tiempos de carga elevados, debido a que la corriente se reduce a medida que el estado de carga (SOC) aumenta.

- **Intensidad constante (CC):** La tensión de la batería, se controla en todo momento, y se aplica de tal forma que la intensidad siempre sea constante. De esta forma el SOC crece de forma lineal con el tiempo. Este método permite realizar cargas a mayores velocidades que el anterior, porque la corriente no se reduce a medida que aumenta su SOC. La dificultad de este método, radica en saber cuándo la batería se encuentra al 100% del SOC, es decir, cuando se encuentra totalmente cargada. Para determinar ese momento, se han de combinar varios factores como son el gradiente de temperatura y el de la tensión con el tiempo. Este tipo de carga es el aconsejado para las baterías de níquel-cadmio y níquel-metal hidruro.
- **Intensidad constante – Tensión constante (CC-CV):** Se trata de una combinación de los dos anteriores. Primeramente, se produce una carga a corriente constante con el fin de alcanzar la tensión máxima de la batería, y cuando se alcanza ese momento, se pasa a una carga a tensión constante. Esta segunda fase finaliza cuando la intensidad de corriente de la batería disminuye hasta aproximadamente el 2% de la corriente nominal ó 0,02C. El método, que se puede ver en la fig.21, es utilizado principalmente en baterías de plomo ácido selladas y resulta imprescindible para las baterías de iones de litio.

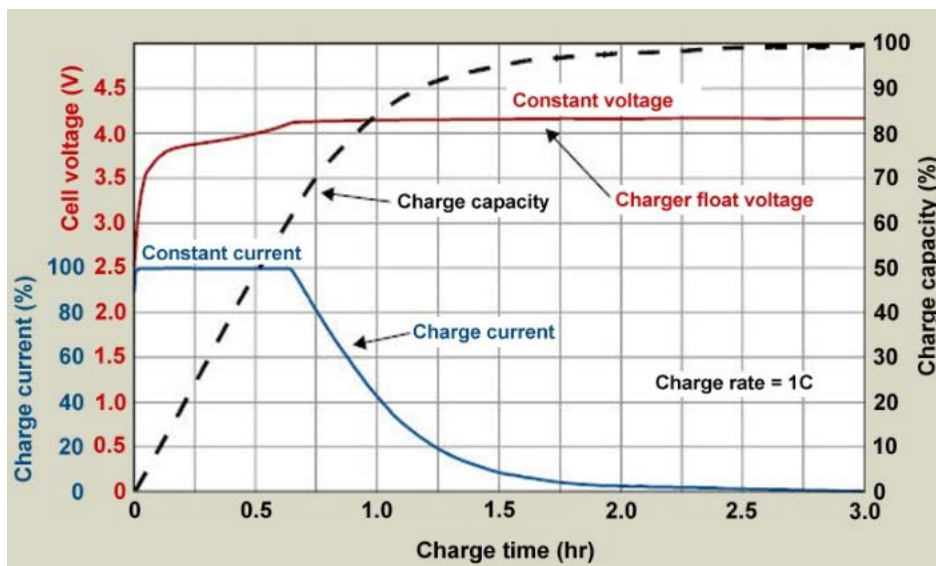


Figura 21. Carga CC-CV [Buchman, 2016]

A continuación, en la fig.23, se muestra un esquema en el que se ilustra la secuencia del **proceso de carga CC-CV** de una batería (basado en el circuito equivalente de carga de la fig.22), en el que la tensión de circuito abierto V_{oc} aumenta a medida que crece el estado de carga SOC. Así, se puede observar que, partiendo de un SOC0 con una tensión en circuito abierto determinada, cuando se aplica una corriente de carga I_c , la tensión en bornes V_t es una línea creciente de pendiente R_{int} .

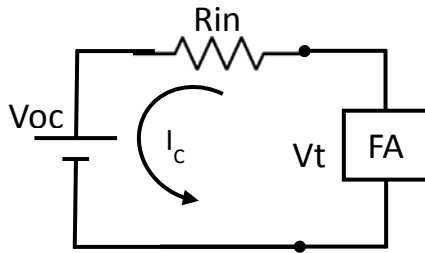


Figura 22. Circuito equivalente de carga de la batería. [Elaboración propia]

Relación tensión en bornes y en circuito abierto en carga:

$$Vt = Voc + R_{int} \cdot I_c$$

En las fases iniciales del proceso de carga, con valores reducidos del SOC y de la tensión Voc, en función del valor de la tensión de la fuente de alimentación, la corriente podría ser muy grande, por lo que hay que limitarla hasta un valor $I_{c\text{máx}}$. Con esa corriente de carga a lo largo del tiempo, se incrementa la capacidad de la batería hasta un valor SOC1. Realizando esto de forma iterativa, se llegan a un punto como el 2, en el que se puede ver que, si se mantuviera el valor de la corriente $I_{c\text{máx}}$ aplicada, la tensión en bornes Vt superaría el valor de la tensión máxima en circuito abierto $V_{c\text{máx}}$. Por ello se hace necesario pasar a limitar la tensión en bornes, en precisamente dicho valor $V_{c\text{máx}}$. Como consecuencia, en esta fase de tensión aplicada constante, la intensidad de carga I_c es menor que la $I_{c\text{máx}}$. Con este valor de la corriente de carga, el estado de carga se incrementa de nuevo, aumentando la tensión de circuito abierto Voc. El proceso de carga sigue por el punto 3, con intensidades progresivamente decrecientes, hasta que la carga se interrumpe cuando la intensidad de carga es inferior a un valor especificado (0,02C, por ejemplo). Puede observarse también que cuando no existe corriente, la Vt es igual a la tensión en circuito abierto (Voc).

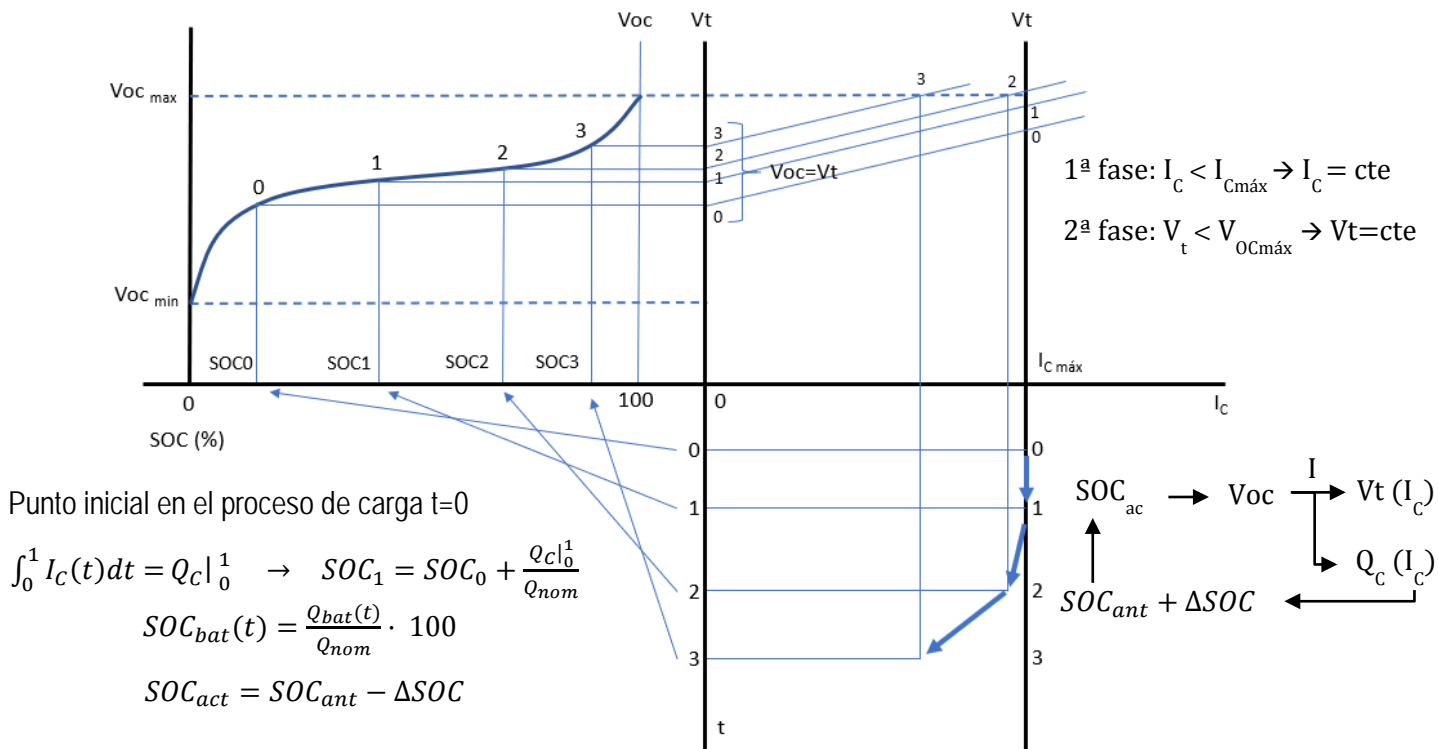


Figura 23. Esquema de la carga de la batería CC-CV. [Elaboración propia a partir de Tinaut]

3.5.2 Descarga

Destacan los tres métodos siguientes para la descarga de las baterías, que se encuentran esquematizados en la fig.24:

- **Corriente constante (CC):** Se produce la descarga a corriente constante hasta que la batería se descarga completamente, independientemente de la tensión en los bornes. De tal forma que la potencia suministrada por la batería se reduce al reducirse el voltaje de la pila.
- **Resistencia constante (CR):** Suponiendo la carga constante, la relación entre la tensión en terminales y la corriente de descarga se mantiene de tal forma que, al reducirse la tensión de la batería debido a la descarga, se reduce la intensidad de descarga.
- **Potencia constante (CW):** Para que la potencia sea constante en la descarga de una batería, la intensidad de descarga debe aumentar para compensar la reducción de voltaje, cumpliendo así siempre $P=V \cdot I$.

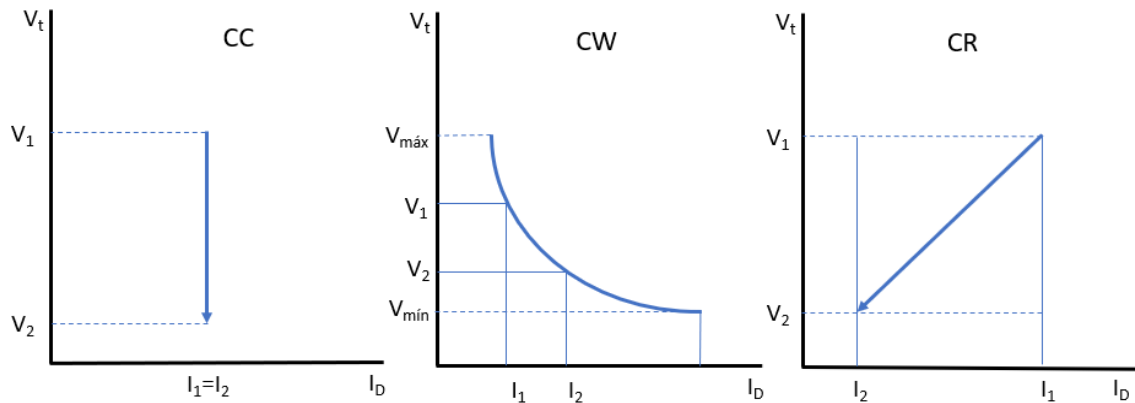
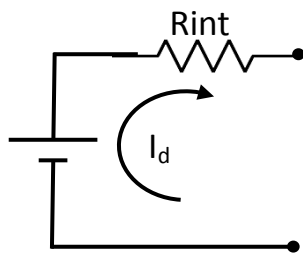


Figura 24. Modos de descarga de una batería. [Elaboración propia]

Al igual que en el caso de la carga, se ha realizado un esquema para mostrar la **descarga a corriente constante** según los diferentes estados de carga (ver fig.26) basados ahora en el siguiente circuito equivalente de descarga.



Relación tensión en bornes y en circuito abierto en descarga:

$$V_t = Voc - R_{int} \cdot I_D$$

Figura 25. Circuito equivalente de descarga de la batería. [Elaboración propia]

En este caso, la tensión de circuito abierto Voc disminuye a medida que decrece el estado de carga (SOC). Así, se puede observar que, partiendo de un SOC0 con una tensión en circuito abierto determinada, cuando se conecta una carga, la batería proporciona una corriente de descarga I_d , y la tensión en bornes V_t es una línea decreciente de pendiente R_{int} , es decir, se produce una caída de tensión.

En las fases iniciales del proceso de descarga, con valores altos del SOC y de la tensión Voc , se prefija un valor de corriente de descarga I_d constante. Con esa corriente de descarga lo largo del tiempo, se decreta la capacidad de la batería hasta un valor SOC1. Realizando esto de forma iterativa, se llegan a un punto como el 2, en el que de nuevo el SOC desciende y con ello la tensión Voc . Lo mismo pasa para otros estados de SOC menores hasta el punto en que la tensión de la batería llega al mínimo establecido (SOC=0%), a partir del cual la celda podría estropearse o degradarse. Se ve necesario por ello establecer una tensión mínima, la cual dependerá de la química de la batería, ya que según sea una u otra aceptará diferentes rangos de tensión en los que trabaja de forma correcta. Puede observarse también que cuando no existe corriente (circuito abierto), la V_t es igual Voc .

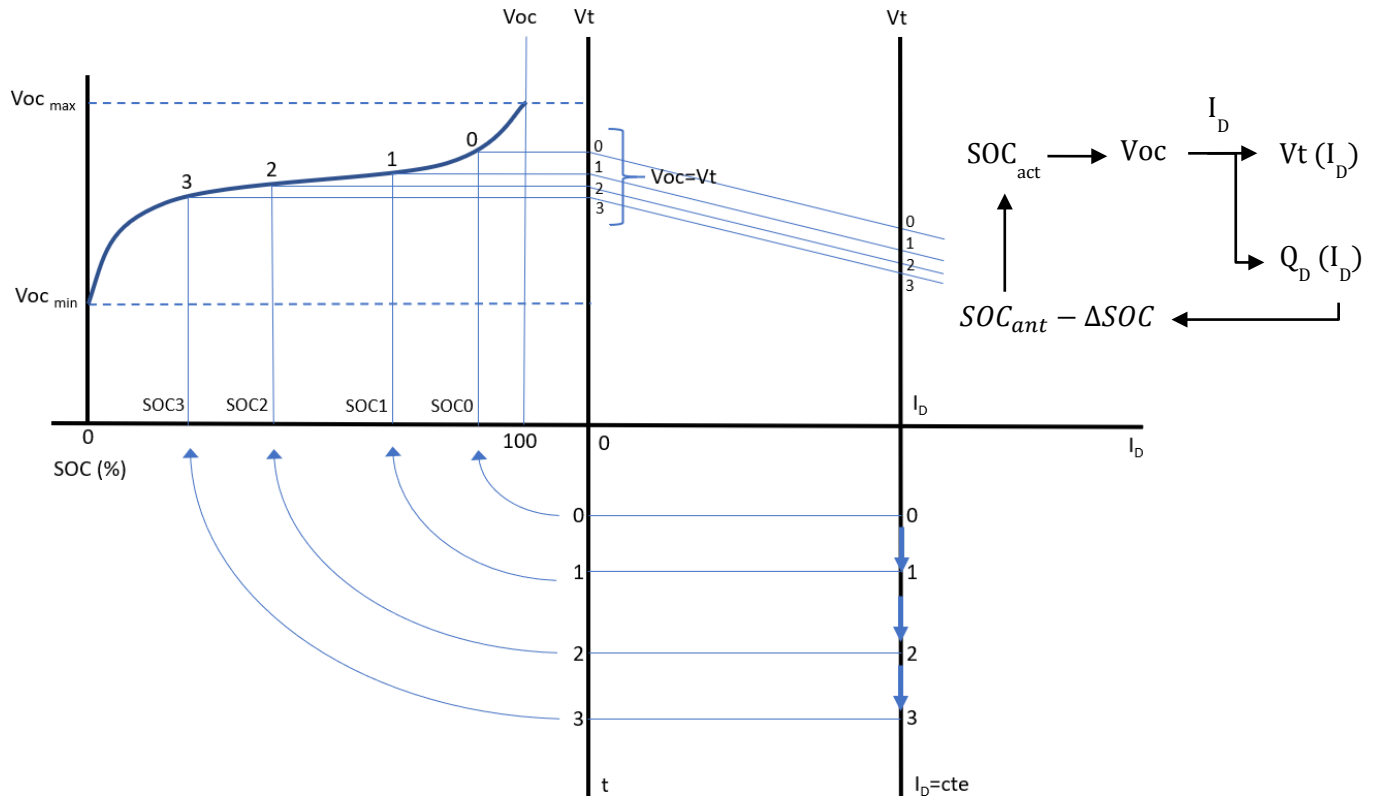


Figura 26. Esquema de la descarga de la batería CC. [Elaboración propia a partir de Tinaut]

4 TIPOS DE BATERÍAS ELECTROQUÍMICAS SEGÚN SU COMPOSICIÓN

Las diferentes tipologías de vehículos existentes en la actualidad, como son los vehículos de combustión interna (IC), los vehículos microhíbridos (MHEV), los vehículos completamente híbridos (HEV), así como los híbridos enchufables (PHEV) y los vehículos completamente eléctricos (BEV o EV), necesitan de diferentes requerimientos para su funcionamiento y tracción, como pueden ser **necesidades de energía y potencia** (ver fig.27), **SOC** (ver fig.28), principalmente. Estos son proporcionados por las baterías [Chian, 2019] [Larminie, 2012] [Scrostai, 2015] [Berg, 2015] [Buchman, 2016].

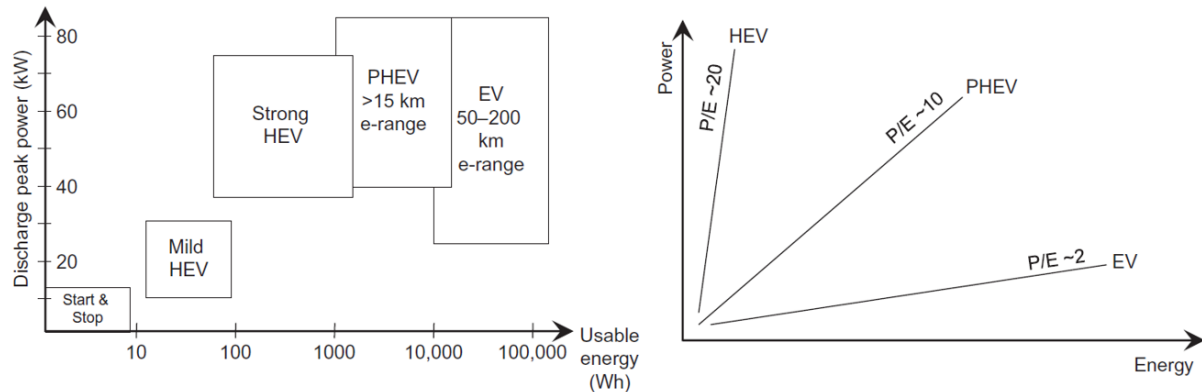


Figura 27. Relación energía y potencia para los distintos tipos de vehículos [Berg, 2015]

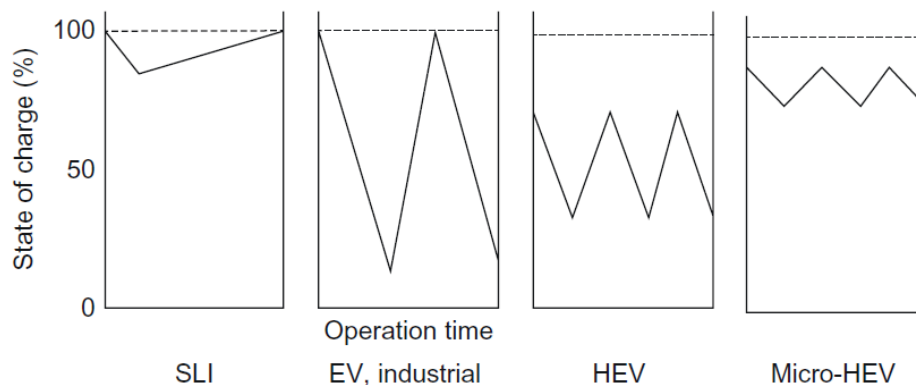


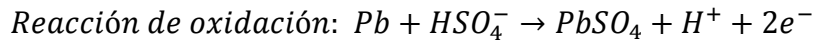
Figura 28. Rango de los estados de carga utilizados por los diferentes vehículos [Scrosati, 2015]

Por ello, a lo largo de los años y para satisfacer estas diferentes necesidades, se han desarrollado diversidad de químicas que se han empleado y se emplean en la automoción. En este capítulo se procede a detallarlas, explicando su funcionamiento, las ventajas e inconvenientes que presentan, y sus aplicaciones en la automoción.

4.1 Plomo ácido (Pb)

Aunque las baterías plomo ácido fueron inventadas hace 160 años, actualmente siguen contribuyendo y utilizándose ampliamente en el sector de la automoción.

El funcionamiento básico de una celda viene determinado por las reacciones que se llevan a cabo en; el electrodo positivo, formado por una placa recubierta de óxido de plomo (Pb_2); el electrodo negativo formado por una placa recubierta de plomo esponjoso metálico (Pb); y el electrolito, el cual es una disolución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) en agua destilada. Durante la descarga el Pb es oxidado y el Pb_2 es reducido, dando lugar a $PbSO_4$, reduciendo la concentración de ácido sulfúrico y produciendo agua (H_2O). Para entenderlo mejor, se muestran las reacciones a continuación:



La tensión característica de la celda de plomo-ácido es de **2,0 V**, y el desarrollo de la V_{oc} y de la densidad del electrolito con el estado de carga SOC se puede ver en la fig.29.

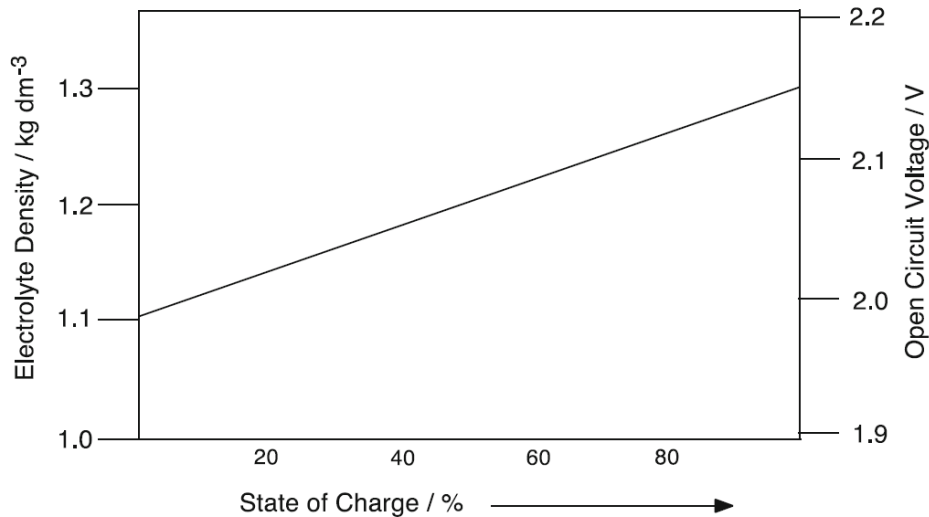


Figura 29. Variación de la densidad del electrolito y el V_{oc} en función del SOC. [Huggins, 2016]

En estas celdas, se quiera o no, las reacciones tienen una energía de activación baja y pueden ser espontáneas. Además, presentan problemas de autodescarga, sulfatación, estratificación y gasificación del electrolito, y desprendimiento.

Puesto que el Pb y el PbO_2 son inestables en el H_2SO_4 , cuando están almacenadas, se producen las mismas reacciones que en la descarga, pero en menor medida, dando lugar a la **autodescarga**, dependiente también de la temperatura y el diseño de los electrodos. La presencia de antimonio en el electrodo, permite a estos que sean más resistentes y duraderos, pero va en contra de una mayor autodescarga.

Además, cuando las celdas están agrupadas (normalmente siempre, para conseguir mayor voltaje), estas reacciones no se producen en la misma proporción, provocando que unas celdas tengan más tensión y otras menos, con lo que, a la hora de cargarlas, algunas pueden acabar sobrecargándose con los pertinentes problemas (pérdida de agua).

La autodescarga y la sobre descarga tienen un efecto considerable en la **sulfatación** de la celda, proceso por el cual la celda pierde la habilidad de ser cargada bajo condiciones normales. A bajo nivel de SOC, se crean pequeños cristallitos de $PbSO_4$ y con el paso de los ciclos, la cristalización del $PbSO_4$ se va haciendo mayor hasta que se hace irreversible. Esto minimiza el área de contacto entre el electrodo y el electrolito, bloqueando las reacciones, aumentando la resistencia interna y por ello, irrevocablemente disminuyendo la capacidad de la celda. También afecta a las condiciones de carga, alargando su tiempo, aumentando la temperatura y disminuyendo la eficiencia. Este proceso de sulfatación puede verse mayorado por una concentración de ácido sulfúrico más alta de lo normal en el electrolito. La sulfatación puede ser controlada o reducida mediante un correcto control de los procesos de carga.

La **estratificación** se da como resultado de una diferencia de densidades y variaciones de temperatura de la celda, causando que el electrolito tenga unas concentraciones de H_2SO_4 distintas en la celda, lo que provoca la utilización desigual del electrodo.

Cuando se **sobrecarga** la celda con valores mayores a 2,4 V, se pueden generar gases (**gasificación**) debido a la electrólisis del agua causando una atmosfera explosiva y situaciones abusivas para la celda, por lo que hay que tener muy presente las condiciones de carga.

El **desprendimiento** de plomo de los electrodos puede ocurrir como consecuencia de la construcción deficiente de los electrodos y el diseño de la celda. Se suele producir con tasas de carga o descarga grandes o profundidades de descarga exigentes. El plomo desprendido se acumula en el compartimento y provoca pérdida de capacidad y puede que incluso cortocircuito.

Para hacer frente a los diferentes retos y aplicaciones, existen diferentes tipos de baterías de plomo ácido que se detallan a continuación:

- **Baterías de electrolito inundado, abiertas o ventiladas (Flooded).** Son aquellas donde los electrodos están sumergidos en un exceso de electrolito líquido. Dentro de este tipo, se pueden diferenciar varias:
 - **Encendido, iluminación y arranque (SLI).** Este tipo de baterías se utiliza para los vehículos de combustión de toda la vida. Proporciona los picos de potencia que necesita el motor de arranque y otros elementos auxiliares del vehículo como pueda ser la iluminación. En la actualidad se han producido mejoras, y se han creado las EFB (enhanced flooded batteries) que son baterías que se instalan en vehículos MHEV con sistema start-stop. Utilizan placas o electrodos finos y con gran área que permiten reducir la R_{int} , y con ello suministrar los picos de corriente.
 - **Tracción.** Diseñadas para la tracción de vehículos permitiendo ciclos de descarga profundos, con una energía constante y pequeña durante largos periodos. Se utilizan en pequeños vehículos eléctricos (carros de golf, vehículos eléctricos transformados, sillas de ruedas) y también en la industria como pueden ser carretillas elevadoras, transpaletas... Utilizan electrodos más gruesos que las anteriores para proporcionar más densidad de energía y mayor número de ciclos.
 - **Estacionarias.** Se cargan constantemente y se utilizan para la industria náutica, caravanas, así como para el almacenamiento de energías renovables y sistemas SAI. Tienen una larga vida útil.
- **Baterías selladas o reguladas por válvula (Sealed o VRLA).** Fueron una mejora de las baterías inundadas. El hecho de estar selladas, permite la posibilidad de recombinación de los gases provocados por la sobrecarga en el interior de la batería, evitando el mantenimiento. Además, éstas se encuentran dotadas de una válvula que regula la presión en el interior de la celda, de forma que, si se produce una gasificación no controlada, ésta no provoque problemas de seguridad y evacúe los gases. Este tipo de baterías es más caro que las flooded. Existen varios tipos:
 - **Electrolito absorbido en fibra de vidrio (AGM).** En éstas, el separador se encuentra fabricado normalmente en silicato de boro, una fibra de vidrio embebida en el electrolito y que promueve la recombinación del H_2 y el O_2 . Además, esta recombinación puede mejorarse con la adición de aditivos limitando la degradación de la celda y mejorando la concentración cerca de los electrodos. Además, la autodescarga es menor y existe un mayor refuerzo mecánico contra las vibraciones. Estas baterías también son utilizadas para vehículos IC y MHEV como las SLI, incluyendo la mejora de que también permiten la absorción de la energía proveniente del frenado regenerativo. No son utilizadas para la tracción de los vehículos.
 - **Electrolito en forma de gel (Gel).** Aquí el gel actúa tanto de electrolito como de separador. La tasa de carga está limitada para prevenir la evolución del gas y la descomposición del electrolito que podría dañar la celda. Presenta un buen ciclo de vida, pero su capacidad de potencia es menor que las AGM. Son utilizadas para la tracción de los EV.

Pueden presentar diferentes configuraciones de placas (planas o tubulares) y éstas, encontrarse o apiladas, o en espiral (en las que suelen fabricarse las AGM).

Las principales ventajas e inconvenientes de las baterías de plomo ácido, son las siguientes:

Ventajas:

- Tecnología ampliamente establecida
- Tensión por celda correcta (2V)
- Baja resistencia interna
- Buena capacidad de suministro y absorción de picos de corriente
- Buen comportamiento a altos niveles de SOC (en la actualidad con ciclabilidad media)
- Tasa de autodescarga baja (aproximadamente 5% mensual)
- Alta eficiencia
- Facilidad de reciclado
- Bajo coste
- Buen rendimiento en un rango de temperaturas

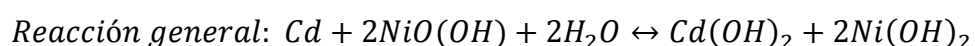
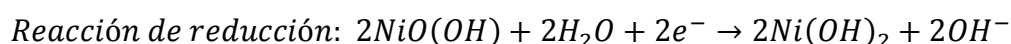
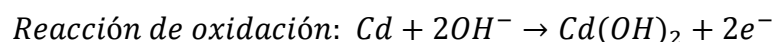
Desventajas:

- Baja energía y potencia específica
- Mal comportamiento a bajo SOC (con baja ciclabilidad)
- Carga lenta. Insuficiente aceptación de carga debido a limitaciones en la cinética de las reacciones. No acepta carga rápida
- Afectadas por la corrosión de los electrodos
- Deben almacenarse cargadas para evitar sulfatación
- Atención a los procesos de carga
- Algunas necesitan de mantenimiento

4.2 *Níquel-Cadmio (NiCd)*

Fue considerada una de las principales competidoras de las baterías de plomo ácido, y su uso en vehículos eléctricos se dio principalmente en las décadas de los 80 y 90, como avance a las baterías de hierro-níquel o zinc-níquel. Actualmente no se utilizan, principalmente, por problemas medioambientales.

La celda NiCd utiliza como material activo el oxihidróxido de níquel (NiOOH) en el electrodo positivo, un compuesto de cadmio metálico (Cd) en el electrodo negativo y un electrolito formado por hidróxido de potasio, el cual es hidróxido de potasio (KOH). Durante la descarga el Cd es oxidado produciendo iones negativos del electrolito (OH⁻) y el NiOOH es reducido aceptando esos iones, y fluyendo por el circuito exterior una corriente entre el ánodo y el cátodo. Para entenderlo mejor, se muestran las reacciones a continuación:



La tensión de la celda de níquel cadmio es de 1,2 V, lo que hace que, para conseguir un voltaje determinado, haya que emplear más celdas que en otros casos en las que su tensión característica es mayor.

Debido a la química, estas baterías permiten seguir siendo cargadas aun habiéndose completado ésta. Para conocer cuándo se encuentra cargada, se ha de atender a la variación de voltaje de la celda (cuando está totalmente cargada, se produce una caída de potencial) y a la temperatura (se produce un notable incremento de temperatura). En la fig.30 se pueden ver esas variaciones.

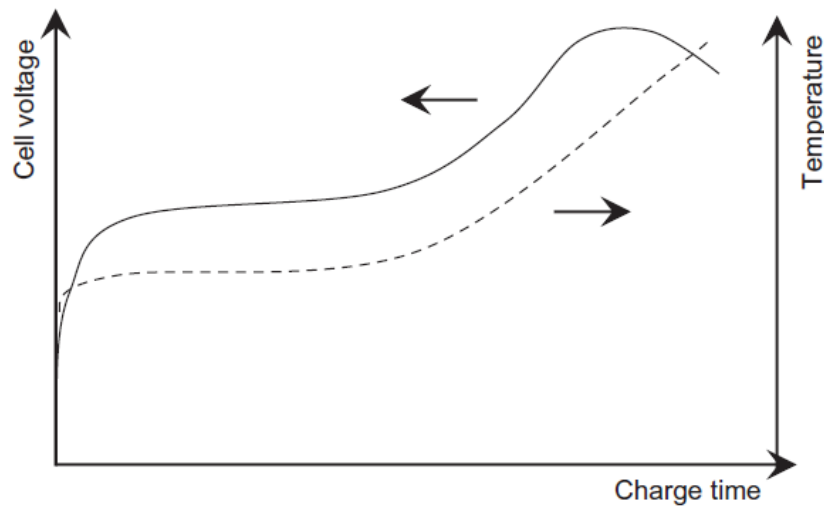


Figura 30. Curvas de voltaje (línea continua) y temperatura (discontinua) en el proceso de carga [Berg, 2015]

Un gran problema que presentan estas baterías es el **efecto memoria**, el cual es un fenómeno que reduce la capacidad de la batería cuando se producen cargas o descargas incompletas de ésta. De tal forma que, si se carga la batería sin haberse descargado del todo, se crean unos cristales en los electrodos que interferirán entre el electrodo y el electrolito disminuyendo su capacidad al bloquear las reacciones. Se podría decir que la celda puede recordar la capacidad de la descarga previa, y por ello solo aceptará la misma cantidad de capacidad en siguientes procesos. Por ello, a medida que pasan los ciclos, esa cristalización puede ser mayor llegando a romper el separador y provocar mayor autodescarga o cortocircuitos. Para evitar esta situación, lo mejor es realizar cargas y descargas completas de las baterías.

Las principales ventajas e inconvenientes de las baterías de níquel cadmio, son las siguientes:

Ventajas:

- Mayor energía específica que las baterías plomo ácido
- Gran ciclabilidad
- Amplio rango de temperaturas de operación (con buen funcionamiento a bajas temperaturas)
- Baja resistencia interna
- Permiten carga rápida
- Buena eficiencia
- Buena fiabilidad y estabilidad
- Libre de mantenimiento (excepto cargas de mantenimiento para evitar efecto memoria)

Desventajas:

- Bajo voltaje de celda 1,2 V
- Alto coste
- Necesitan cargadores especiales
- Efecto memoria
- Envejecimiento prematuro con el calor
- Alta tasa de autodescarga (aproximadamente 15% mensual)
- Son altamente contaminantes, principal factor por el que se dejaron de utilizar

Como se ha comentado, con anterioridad, estas pilas se utilizaron durante años para intentar sustituir a las baterías de ácido plomo en la tracción de vehículos, pero ahora principalmente por los problemas medioambientales del cadmio y debido a la alta autodescarga y efecto memoria, estas baterías no se utilizan en la automoción.

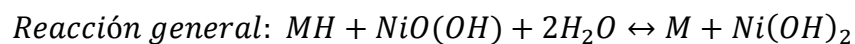
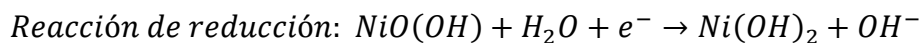
4.3 *Níquel Metal-Hidruro (NiMH)*

Las baterías de níquel metal hidruro son las sucesoras de las NiCd con sus mejoras correspondientes en varios ámbitos, lo que las permite actualmente seguir siendo utilizadas en diversas aplicaciones además de en la automoción.

La celda NiMH se podría decir que funciona como una pila de combustible. Utiliza como material activo el oxihidróxido de níquel (NiOOH) en el electrodo positivo, hidrógeno (H) absorbido en una aleación metálica (M) en el electrodo negativo y un electrolito formado por hidróxido de potasio, el cual es hidróxido de potasio (KOH) como las baterías NiCd. La reacción en el electrodo positivo, es la misma que en las baterías NiCd, convirtiéndose el oxihidróxido en hidróxido. En el electrodo negativo, el hidrogeno es liberado del metal en el que se aloja, y reacciona produciendo agua y electrones, estos últimos fluyendo por el circuito exterior.

Actualmente existen tres tipos de aleaciones en las NiMH; AB₂, A₂B₇ y AB₅, siendo esta última la más utilizada actualmente, ya que, aunque almacena menos hidrógeno, es más barata (materiales y fabricación). Los componentes A son tierras raras como son el lantano, neodimio, cerio, mientras que los B son usualmente níquel, cobalto, manganeso o aluminio.

Para entenderlo mejor, se muestran las reacciones a continuación:



Presenta la misma tensión característica que las baterías NiCd es decir **1,2 V**.

Con esta química de batería se necesita un buen sellado de celda, ya que la presión de gas de hidrógeno debe mantenerse constante en el proceso de absorción/desorción. Además, si entrara aire a la celda, las moléculas de este reaccionarían con las de las aleaciones dañándolas, y el hidrógeno no ocuparía los huecos que debe. Igualmente, son celdas que incorporan respiraderos de protección para presiones excesivas.

El control de la carga de la batería se hace de igual forma que en las NiCd; se ha de atender a la variación de voltaje de la celda (cuando está cargada, se produce una caída de potencial) y a la temperatura (se produce un notable incremento de temperatura).

Presentan también efecto memoria (aunque menor) y, además una **mayor tasa de autodescarga** que las baterías NiCd, ya que las moléculas de hidrógeno son muy pequeñas y pueden difundir más fácilmente por el separador, lo cual es su principal inconveniente.

Una característica interesante es que la composición del electrolito se mantiene constante en la carga y la descarga, es decir, el agua y los iones OH⁻ se crean y son usados en la misma tasa. Como resultado, se tiene que la resistencia interna y el voltaje en circuito abierto de la celda es mucho más constante que en las baterías plomo ácido o NiCd. Su curva de descarga se observa en la fig.31.

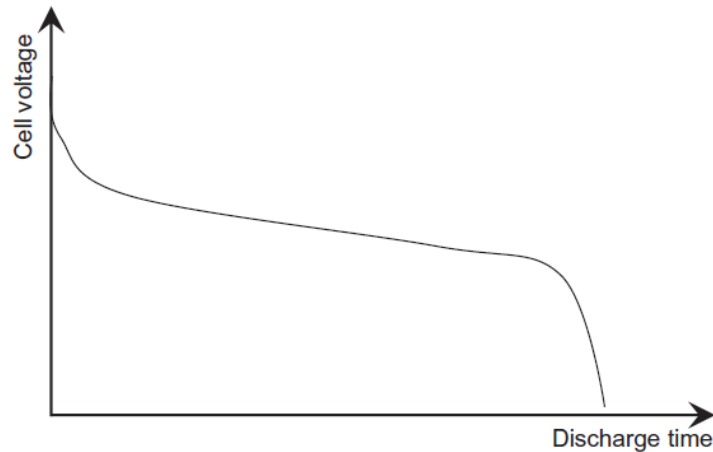


Figura 31. Curva de descarga de una batería NiMH [Berg, 2015]

Las principales ventajas e inconvenientes de las baterías de níquel cadmio, son las siguientes:

Ventajas:

- Mayor energía específica (aproximadamente 40% más) y densidad de energía que las baterías níquel cadmio
- Mayor potencia específica que las baterías níquel cadmio
- Tecnología robusta
- Mayor ciclabilidad que las NiCd
- Amplio rango de temperaturas de operación
- Baja resistencia interna
- Permiten carga rápida
- Libre de mantenimiento (excepto cargas de mantenimiento para evitar efecto memoria)
- Medioambientalmente "amigable" y reciclable

Desventajas:

- Bajo voltaje de celda 1,2 V
- Coste moderado
- Generan mucho calor en tasas altas de carga y descarga
- Necesitan cargadores especiales
- Efecto memoria (aunque menor que las de níquel cadmio)
- Envejecimiento prematuro con el calor
- Baja eficiencia (aproximadamente el 70%)
- Muy alta tasa de autodescarga (aproximadamente 20% - 30% mensual)

Ni en las baterías NiCd ni en las NiMH se puede aplicar un procedimiento de descarga constante, ya que, al presentar una mínima resistencia, las corrientes serían muy elevadas y degradarían la batería.

Como se ha comentado, con anterioridad, estas baterías son las sucesoras de las NiCd y debido a sus mejores características y sobre todo a sus características de potencia entregada, se utilizan hoy en día, principalmente por Toyota en sus HEV, aunque se podrían utilizar también para híbridos medios y microhíbridos (que a lo mejor con el coste que presenta, no saldría rentable). También se las puede dar otras aplicaciones fuera de la automoción como los sistemas de almacenamiento de energía, pilas para multitud de elementos electrónicos...

4.4 Iones de litio (Li-ion)

Desarrolladas a finales de los 90, se han convertido en la batería más utilizada en la automoción para la tracción de vehículos, debido a las mejoras que ofrecen en la mayoría de los ámbitos respecto a las anteriormente nombradas.

El litio es el metal menos pesado de todos y con una alta reactividad al contacto con el aire y la humedad, por lo que debe ser tratado con mucho cuidado. También, presenta un radio pequeño que permite al litio ser acomodado o insertado en una gran variedad de materiales, dotándolo de la capacidad teórica específica de 3800 Ah/kg.

Estas características hicieron que se plantease la idea de introducirlo en el electrodo negativo para proporcionar densidades extremadamente altas. El problema se presenta cuando se observa que, en los ciclos de carga, debido a la deposición irregular del litio, el electrodo se altera grandemente y su estabilidad térmica se ve gravemente afectada provocando un potencial riesgo de fuga térmica. Por ello, se llevó a cabo la solución no metálica, utilizando los iones de litio.

Las celdas de iones de litio utilizan principalmente grafito, carbón amorfo o titanato de litio en su **ánodo**, mientras que su **cátodo** está formado por óxidos metálicos litiados. A su vez, el **electrolito** suele ser una disolución orgánica de sales de litio junto con aditivos (carbonatos principalmente), o polímero de litio. Durante la descarga (ver fig. 32), el cátodo se reduce y libera los iones de litio que fluyen a través del separador y electrolito para alojarse en el electrodo negativo, y al mismo tiempo los electrones liberados captados por el colector circulan por el circuito eléctrico externo.

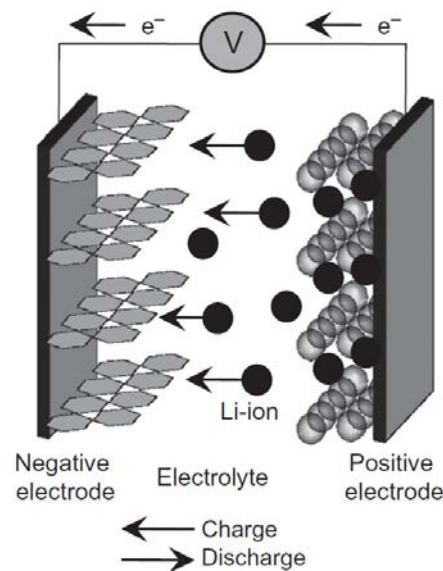
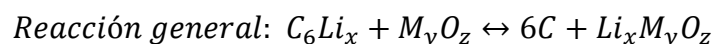


Figura 32. Proceso de descarga de una batería de iones de litio [Berg, 2015]

La reacción más general de este tipo de baterías es:



Además, presenta un alto potencial electroquímico frente a las baterías presentadas anteriormente, ya que es de **3,7 V** aproximadamente. Esto es muy beneficioso, porque permitiría con un menor número de celdas llegar a mayores voltajes ahorrando peso.

Las baterías de iones de litio no necesitan mantenimiento y no presentan efecto memoria, es decir, no necesitan ser descargadas y cargadas totalmente. Es más, en caso de realizarse esas operaciones pueden llevar a la fatiga de la batería con el consiguiente deterioro. Además, presentan una buena autodescarga, similar a la del plomo ácido y mucho menor que la autodescarga de las baterías basadas en níquel.

Sobre las baterías de iones de litio, se ha de comentar una peculiaridad que es, la **Interfaz de Electrolito Sólido (SEI)** en el ánodo. Es una capa tanto de pasivación como protectora, y es crucial

para asegurar el funcionamiento y permitir la óptima utilización de la celda, sobre todo en ánodos inestables (ver fig.33). La capa se crea en el proceso de formación de la batería y favorece el aislamiento entre el electrodo y el electrolito, evitando reacciones indeseadas que puedan provocar la descomposición de ambos. Aun aislando ambos elementos, esta capa permite el paso de los iones (de una forma similar a la del separador) y permite estabilizar el sistema y alargar la vida útil (al evitar la descomposición), a expensas de reducir la capacidad y aumentar la resistencia interna. Por tanto, para que la capa no sea tan restrictiva tanto en capacidad como conductividad, se incorporan aditivos al electrolito, como el carbonato de vinilo, permitiendo trabajar a temperaturas más altas, y manteniendo la resistencia interna. El tipo de geometría de celda y el estado de carga, también afectan, y más cuando se realizan los ciclos a una alta temperatura. Para la mayoría de las baterías li-ion, la capa SEI se descompone a unas temperaturas entre los 75°C y los 90°C, algo que se ha de evitar. Con el paso de los ciclos a medida que la batería envejece, esta capa va creciendo (reduciendo el litio activo), y es lo que se conoce como pérdida de vida útil de calendario.

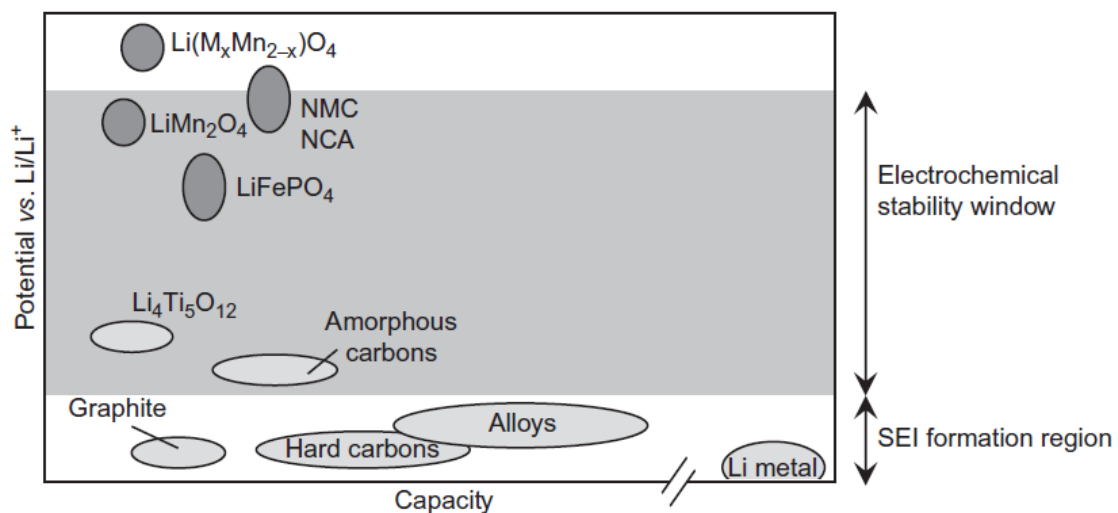


Figura 33. Potencial vs Capacidad de los materiales activos y estabilidad electroquímica. [Berg, 2015]

Las celdas de iones de litio son celdas en las que la carga y descarga necesita ser muy controlada, con **circuitos de protección** y con avanzados **BMS** (sistema de control de la batería) que, permiten desconectar la batería cuando surgen problemas en su utilización. Entre esos problemas destacan; la sobrecarga (por encima de la tensión máxima o a corrientes excesivas) pueden provocar crecimientos irregulares por acumulación de litio, liberación de calor y gases por efecto Joule y reacciones parasitas, y la descomposición del electrodo y electrolito; la sobredescarga (descargarlo por debajo de los límites de voltaje y a muy altas corrientes durante un tiempo prolongado) puede descomponer el cobre del colector y después en la recarga crear dendritas que provoque cortocircuitos, además de descomponer la SEI y formar gases; y, el aumento de temperatura por alguno de los anteriores motivos (aumentando el envejecimiento prematuro y posibles problemas de sobrepresión y explosión). La necesidad de estos sistemas les hace que su precio sea más elevado.

Las principales ventajas e inconvenientes de las baterías de iones de litio, son las siguientes:

Ventajas:

- Altas densidades de energía y potencia
- Alto voltaje (3,7 V)
- No presentan efecto memoria
- Tienen baja autodescarga (frente a baterías Ni)
- Buena ciclabilidad (menores que las baterías Ni)
- Amplio rango de temperaturas de operación
- Permiten carga rápida (mayores que baterías Ni)
- Muy buena eficiencia (mejor que baterías Ni)

- Soportan altos DOD

Desventajas:

- Bajo voltaje de celda 1,2 V
- Coste alto (cada vez menor debido a su investigación y producción en masa)
- Muy problemáticas a altas temperaturas (electrolito orgánico inflamable)
- Necesita BMS o circuitos de protección individuales
- Efecto memoria (aunque menor que las baterías níquel cadmio)

Por todas estas ventajas, y los menores inconvenientes que otras químicas anteriormente nombradas, los fabricantes de vehículos eléctricos se han decantado por esta tecnología para su desarrollo. Ahora bien, dentro de este tipo de batería, se dan muchas variantes que otorgan unas características en contra de otras, las cuales se detallan en los sucesivos apartados y vienen nombradas por su principal material activo.

4.4.1 Óxido de cobalto (LCO)

Las baterías fabricadas con cátodo de óxido de cobalto (LiCoO_2) fueron las primeras baterías de iones de litio desarrolladas. Son baterías que presentan una alta densidad de energía, una vida útil moderada y facilidad de fabricación, pero presentan una potencia normal, y debido a su reactividad, son menos estables térmicamente, con lo que tienen que ser monitoreadas y controladas. Además, la limitación de la obtención del cobalto las hace más caras. Por estos factores no se emplean actualmente en vehículos eléctricos, aunque sí se han empleado en alguno como son el Tesla Roadster (1ª generación) y el Smart ForTwo [Chian, 2019] [Miao, 2019]

4.4.2 Óxido de manganeso (LMO)

Este tipo de baterías presenta en su cátodo óxido de manganeso (LiMn_2O_4) con una estructura tridimensional en forma de espinela que, ayuda a mejorar el flujo de electrones. Esto permite obtener una menor resistencia interna y mayores flujos de corriente, tanto de carga como de descarga. Además, aporta una mayor estabilidad térmica que las baterías de cobalto, aunque esto va en contra de la capacidad (aproximadamente un tercio menor) y de la vida útil de la batería. Esta química se ha utilizado junto a una de las siguientes que se describe a continuación, la NMC, con el fin de conseguir las mejores características posibles, dando lugar a las baterías LMO-NMC utilizadas en vehículos como el Nissa Leaf (de última generación), el Chevrolet Bolt (u Opel Ampera), el BMW i3...

4.4.3 Óxido de níquel (LiNiO_2)

Fue reconocido como un prometedor material debido a su muy bajo coste, su alto voltaje y una alta capacidad teórica. Sin embargo, las dificultades en su uso, especialmente por la formación de una capa de auto pasivación, han hecho que no se utilicen directamente, sino que se tengan que desarrollar junto con otros productos (Co, Fe, Mn, Al, Ti, Mg) que permiten su fabricación y estabilidad. Para la automoción, a partir de estas celdas se han desarrollado las NCA y las NMC que se detallan a continuación.

4.4.4 Níquel-Manganeso-Cobalto (NMC)

Se trata de una evolución de las baterías de óxido de níquel y que se basan en un óxido de níquel, manganeso y cobalto principalmente ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$), normalmente llamadas NMC. Se pueden diseñar para proporcionar alta energía específica, alta potencia específica o un compromiso entre ambas dependiendo de los requerimientos. La presencia de níquel permite que la celda obtenga alta energía específica pero baja estabilidad, mientras que el manganeso, debido a su estructura en espinela otorga una baja resistencia con la posibilidad de alcanzar altas potencias en contra de la densidad de energía. Además, presentan un muy buen ciclo de vida.

En los últimos tiempos, los fabricantes están dando más valor al níquel y reduciendo el cobalto para dotar a las celdas de mayor energía, mientras abaratan el coste. Cada fabricante guarda su "fórmula secreta" (proporciones de los elementos y otros en menores proporciones). Se ha pasado de fabricar NMC111 (aprox. 33% de cada elemento), o NMC532 a NMC622 ya utilizadas en algunos vehículos eléctricos, y actualmente a la fórmula 811, adquiriendo esta última gran importancia entre los fabricantes mundiales.

A fecha de hoy, debido a sus ventajas, son las baterías de iones de litio más utilizadas en vehículos eléctricos que permiten satisfacer los requerimientos de los sistemas de propulsión de éstos.

4.4.5 Níquel-Cobalto-Aluminio (NCA)

Al igual que las anteriores, se trata de otra evolución de las baterías de óxido de níquel. Se basan en un electrodo negativo de óxido de níquel, cobalto y aluminio principalmente ($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_{1-x-y}\text{O}_2$). Tienen grandes similitudes a las NMC, ofreciendo alta energía y potencia específica (incluso un poco mayor esta última respecto a las NMC al ser un poco más ligeras), largo ciclo de vida... pero, éstas no son tan seguras como las anteriores y además son más caras. Aun así, el principal fabricante de vehículos eléctricos mundial, Tesla, las utiliza en sus vehículos, reivindicando que incluso tienen menor proporción de cobalto que las NMC. Los modelos que las utilizan son el tesla Model S, el Model X, y el Model 3. Aunque hora se dice que Tesla va a pasar a utilizar también baterías NMC o incluso LFP (en su gigafábrica de China).

4.4.6 Ferrofosfato (LFP)

Las baterías con electrodo positivo de litio hierro-fosfato (LiFePO_4) ofrecen un buen comportamiento electroquímico, con baja resistencia interna (lo que implica una alta densidad de potencia), además de una alta tasa de carga y un largo ciclo de vida. El fosfato ayuda a estabilizar el electrodo contra la sobredescarga, y provee de una mayor tolerancia al calor, limitando la degradación o descomposición del material y tolerando mejor el estrés. Presentan un amplio rango de temperaturas y son mucho menos propensas a una fuga térmica (lo que aumenta su seguridad). Un problema que pueden presentar o que es más notable que en las anteriores baterías de iones de litio nombradas, es que tienen una mayor tasa de autodescarga, lo que puede provocar problemas de balanceo o equilibrio de las celdas con el paso del tiempo o envejecimiento. Además, la humedad limita bastante su vida útil, su voltaje nominal de celda es de 3,2 V (con lo que menor densidad de energía), un poco inferior a las baterías ya mencionadas. En los últimos años están adquiriendo bastante popularidad, y fabricantes chinos como por ejemplo BYD las están empleando en sus vehículos (destaca la batería Blade).

4.4.7 Polímero de litio (LiPo)

Este tipo de batería principalmente se diferencia del resto de baterías de iones de litio por su electrolito. Basados desde plásticos sintéticos a biopolímeros o proteínas naturales, son un aislante que permite el intercambio de iones y reemplaza al separador poroso tradicional de las baterías que se encuentra imbuido en el electrolito. Primeramente, este polímero era sólido y con escasa o poca conductividad, y la batería para funcionar correctamente debía calentarse a unos 60°C para permitir el flujo de corriente. Para solucionarlo, se desarrolló el electrolito de **polímero gelificado**, que actúa de separador microporoso con algo de humedad y con mayor conductividad. Presenta una energía específica ligeramente más alta que las baterías de iones de litio, aunque también se dice que su coste de fabricación es mayor. Las características de carga y descarga son muy similares a las baterías con electrolito líquido y como ventaja además de su empaquetado, destaca su menor peso, menor propensión a la gasificación e ignición, así como un menor riesgo en la fuga del electrolito corrosivo.

Se pueden fabricar en celdas pouch y con diferentes químicas como NMC, LMO, aunque los más utilizados actualmente son los LCO y los LFP.

4.4.8 Titanato (LTO)

En este caso, el nombre de las baterías viene dado por el principal material activo del ánodo, que es el titanato de litio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$). Este material sustituye al típico ánodo de grafito o el carbón amorfo de las baterías de iones de litio anteriormente nombradas, y se estructura en forma de espinela como las LMO, y los cátodos de estas baterías son o LMO o NMC. Éstas presentan un voltaje nominal de celda de 2,4 V, a diferencia de las anteriores baterías de iones de litio, aunque tienen la ventaja de que, por su estructura, pueden cargarse y descargarse a grandes tasas C, y tienen también una larga vida útil. Es una química segura para baterías, y presenta excelentes características de descarga a bajas temperaturas. Sin embargo, presentan dos principales desventajas que se están intentando solucionar, y son; su baja energía específica a consecuencia del voltaje de celda, y su coste.

4.5 Otras baterías en desarrollo (Li-S, metal-aire, estado sólido, de flujo...)

Todas estas baterías anteriormente nombradas son las que se utilizan actualmente o se han utilizado. Pero como es conocido, los vehículos eléctricos necesitan de mejoras que permitan mayor autonomía, menores tiempos de carga y más seguridad, por lo que, además de seguir investigando las anteriores baterías, se están intentando desarrollar otras tecnologías que permitan llegar a esos requerimientos. Éstas se describen brevemente a continuación:

- Litio azufre (Li-S).** Estas baterías utilizan litio metálico como electrodo negativo, mientras que el positivo emplea azufre. La reducción del azufre (S_8) a un ion sulfito (S^{2-}) tiene una capacidad teórica muy alta, unas diez veces a la del ion litio y tiene un bajo coste. A temperaturas bajas se ofrecen buenas características de descarga y es medioambientalmente ecológica o, no peligrosa al menos. Sin embargo, dependiendo de las tasas de descarga y si ha sido utilizado o no todo el azufre, esta capacidad desciende bastante. El voltaje de la celda, se encuentra por debajo de las li-ion, sobre los 2 V. El azufre por sí mismo carece de conductividad iónica, por lo que se requiere una matriz de carbono que permita alojar los iones y electrones en su superficie, lo cual, que reduce la densidad. Durante la descarga, el litio se difunde por el electrolito reaccionando con el azufre y formando **polisulfuros**, depositándose el Li_2S en el cátodo. Durante la carga, el Li_2S se acumula en el electrodo negativo y los polisulfuros son reducidos en la superficie del positivo.

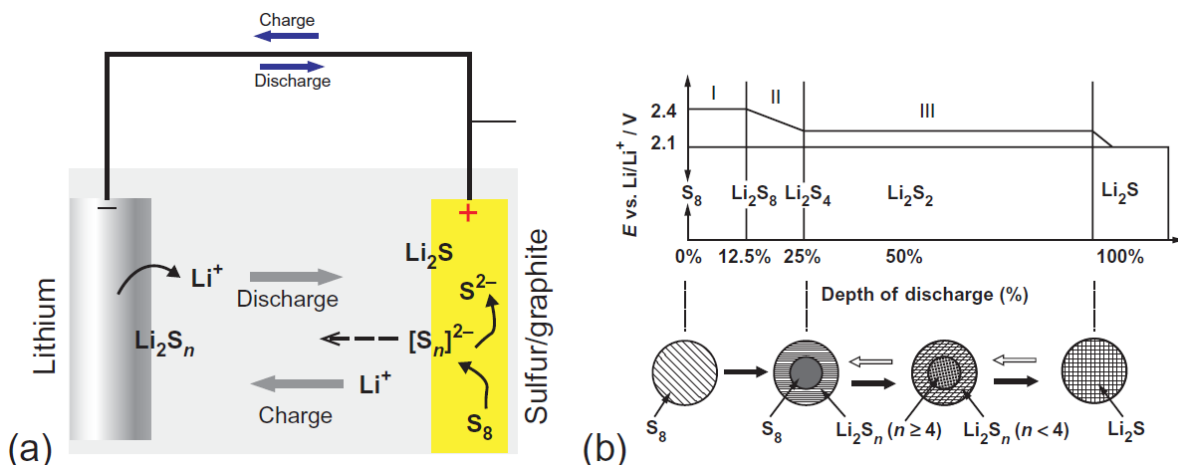
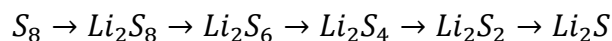


Figura 34. Esquema de carga y descarga Li-S. [Scrosati, 2015]

Sin embargo, los sulfuros con alto contenido en litio, Li_2S_2 y Li_2S , son insolubles en el electrolito, y no participan en las reacciones de oxidación reducción con lo que causan una capa de pasivación en el electrodo reduciendo la capacidad a medida que los ciclos de batería aumentan.

Por ello, su principal problema actualmente se encuentra en la corta vida útil de la batería, además de la adopción del ánodo de litio metálico que, provoca problemas de formación de dendritas. Entre los fabricantes pioneros de este tipo de baterías se encuentra Sion Power. [Berg, 2015][Scrosati, 2015]

- **Metal-aire (MAB).** Este tipo de baterías consiste en un ánodo metálico, un electrolito acuoso o no, y un cátodo de aire al que se ha de añadir una capa que facilite la penetración de **oxígeno** hasta otra capa donde se encuentra un catalizador para la reacción de reducción. El cátodo utiliza el oxígeno obtenido directamente de aire del ambiente, lo cual lleva a una reducción grande del peso de la batería aumentando la energía específica y la densidad. Además, estas baterías son más baratas ya que la fuente de cátodo es como se ha dicho el aire, y los metales del ánodo son de bajo coste, principalmente aluminio, zinc, litio y hierro. Unas de las características teóricas más importantes de cada tipo de ánodo se muestran en la fig.34. [Wang, C, 2019]

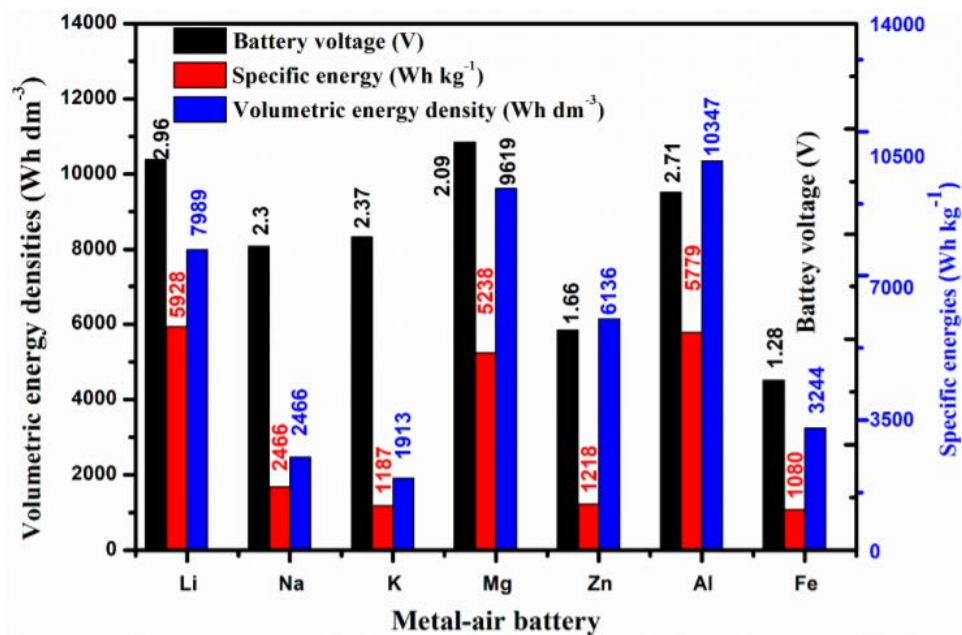


Figura 35. Características teóricas de los cátodos de las baterías metal-aire. [Wang, 2019]

La problemática de esta batería es el hecho de no ser recargable, es decir, son de un solo uso, por lo que se podría realizar una recarga "mecánica" (reemplazando electrolito y electrodo agotados), algo rudimentario e incómodo. Además, la cinemática de las reacciones del oxígeno son lentas y poco eficientes.

Los investigadores estudian como realizar unas baterías metal aire recargables, y de hecho ya lo han conseguido experimentalmente utilizando plata en el electrodo de aire, pero aún queda tiempo para que estas baterías puedan ser comercializadas.

- **Baterías de flujo o redox.** Se podría decir que se trata de una mezcla entre las baterías convencionales y las pilas de combustible. La clave de esta tecnología es que, las **reacciones redox** únicamente utilizan los iones presentes en una **disolución** y esas reacciones tienen lugar por medio de unos **electrodos inertes** (normalmente, placas bipolares de grafito). Los materiales activos, por tanto, se encuentran contenidos en dos electrolitos (anolito y catolito), almacenados externamente y bombeados posteriormente cuando se necesitan a la celda. Esta tecnología de diseño más complejo permite una larga durabilidad, aunque su densidad de

energía es baja debido a la limitación de solubilidad de los materiales activos y demás elementos auxiliares.

Las baterías de flujo de vanadio, son las más comunes y estudiadas. Para almacenar energía, emplea iones de vanadio en diferentes estados de oxidación: V^{5+}/V^{4+} en el lado positivo, y V^{2+}/V^{3+} en el lado negativo. En la fig.36 se muestra de manera simplificada el principio de este tipo de baterías y las reacciones que se dan, de forma resumida son:

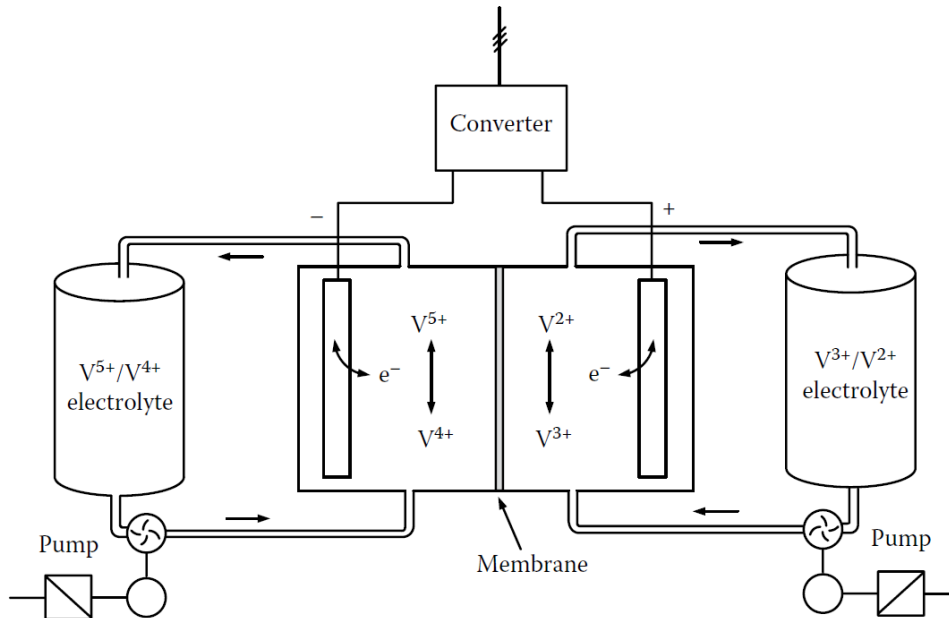
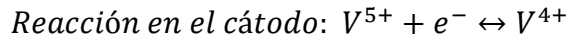
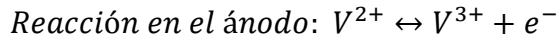


Figura 36. Esquema batería de flujo de vanadio [Rufer, 2018]

Se utilizan pues, los diversos estados de oxidación del vanadio (II, III, IV, V) y su potencial típico es de **1,4 V**. Existen otros compuestos válidos que otorgan diferentes potenciales entre los que se encuentran V/Br, Cr/Fe, Sulfuro/Br...

Los electrolitos son comúnmente disoluciones de ácido sulfúrico a base de agua. Los dos electrolitos son bombeados a la celda para facilitar las reacciones y una membrana de intercambio de protones es utilizada para separar ambos electrolitos. La mezcla de éstos daría como resultado la permanente pérdida de capacidad de almacenamiento de energía debido a la disolución de los materiales activos.

Una de las principales ventajas de esta tecnología, es que su capacidad de almacenamiento depende del tamaño de los tanques de electrolito. Además, puede ser completamente descargada sin riesgo de daño, y puede ser recargada reemplazando las disoluciones de vanadio o aplicando un potencial externo mediante una fuente de alimentación. Su principal desventaja es la baja densidad de energía y la complejidad del sistema con elementos auxiliares. También, el rango de temperaturas de operación es menor que para las anteriores baterías mencionadas, y a bajas temperaturas, la solución de ácido sulfúrico con los iones cristaliza. Al igual que las celdas de combustible, no aporta la potencia solicitada de forma inmediata. Todo esto actualmente las hace perfectas para sistemas de almacenamiento estacionario, y se están intentando llevar mejoras a cabo con el fin de poder introducir las en la automoción. [Berg, 2015] [Pistoia, 2014] [Rufer, 2009]

- **Estado sólido.** Son consideradas unas de las más prometedoras baterías futuras para los vehículos eléctricos. Este tipo de batería, gracias a la introducción de un **electrolito sólido**, se dice que puede mejorar la capacidad de diseño de la celda al permitir que el apilamiento en

serie y las estructuras bipolares, mejoren la eficiencia de empaquetamiento de la celda (ver fig.37). Por ello, se podría lograr una alta densidad de energía al reducir el espacio “muerto” entre celdas de las baterías convencionales. Otra ventaja que se espera de ellas es, el aumento de la seguridad de la batería al no haber riesgo de fuga de electrolitos líquidos y a la alta estabilidad térmica atribuida a los electrolitos sólidos no inflamables e inorgánicos. Y como gran ventaja final, destacarían unos muy cortos tiempos de recarga de batería.

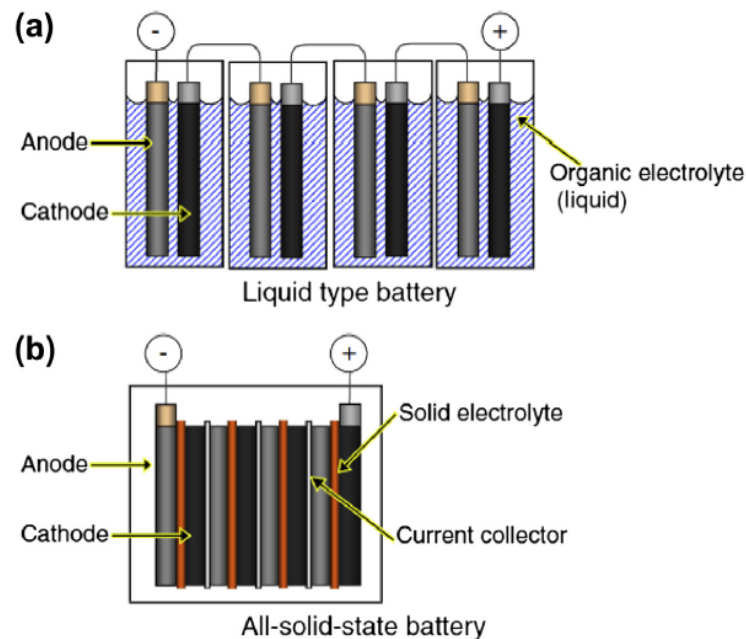


Figura 37. Comparación batería electrolito líquido (a) vs electrolito sólido (b) [Pistoia, 2014]

Los problemas a los que están haciendo frente los investigadores se encuentran en unos electrolitos con mayor conductividad de iones de litio (sobre todo a bajas temperaturas), el diseño de las interfases entre electrodo y electrolito y la mejora de la conductividad del material activo del electrodo (que podría darse por una reorientación del cristal de los materiales activos). Además, éstos, aunque presentan mayor densidad de energía, aportan una menor potencia

Los electrolitos cerámicos y basados en azufre, con cátodo LCO, NMC o NCA son los que parecen llevar la delantera en este tipo de baterías. Se pretende que entre 2020 y 2025 se comiencen a utilizar, teniendo como principal precursor al fabricante Samsung. [Pistoia, 2014] [Scrosati, 2015]

Existen otra gran multitud de baterías que se están investigando y desarrollando, y otras de las que se ha frenado su desarrollo, pero aquí se han explicado las que se cree que son más propicias para la automoción.

4.6 Resumen comparativo de características de las baterías

En este apartado se proceda a realizar una primera comparativa entre las diferentes químicas de baterías principales, y una segunda comparativa diferenciando únicamente las baterías de iones de litio, ya que son las más utilizadas en la industria de los vehículos eléctricos e híbridos. Se utilizarán los valores o parámetros que mejor definen estas baterías para su aplicación en la automoción, aunque se podrá extrapolar a otras aplicaciones.

4.6.1 Comparativa general de la química de las baterías

Las baterías más utilizadas a lo largo de los años como se ha dicho con anterioridad son; las baterías plomo ácido; las baterías níquel cadmio; las baterías níquel metal hidruro y las baterías de iones de litio. En la fig.38 se observa la curva de descarga de las baterías frente al DOD, partiendo de las diferentes tensiones cuando la celda se encuentra totalmente cargada (o nada descargada). En este

caso, las baterías de iones de litio son las que mayor voltaje presentan, con una curva suavizada descendiente. Respecto a las baterías de plomo ácido, comienzan con un voltaje de aproximadamente 2 V, y a medida que aumenta la DOD, la reducción del voltaje es mucho más plana que la anterior hasta que llega al 80% DOD que desciende abruptamente. Por otro lado, ambas baterías de níquel, con un voltaje de 1,2V muestran aún, una planitud mayor en el voltaje de descarga (debido a su R_{int}) hasta aproximadamente el 90% del DOD. El hecho de que la curva sea plana en la descarga, permite para un pack de batería del mismo voltaje, un mayor suministro de potencia (a lo largo de la mayor parte del SOC), ya que, para una misma intensidad requerida, en las baterías de iones de litio el voltaje de la celda desciende gradualmente, mientras que, en las Ni o Pb éste se mantiene casi constante.

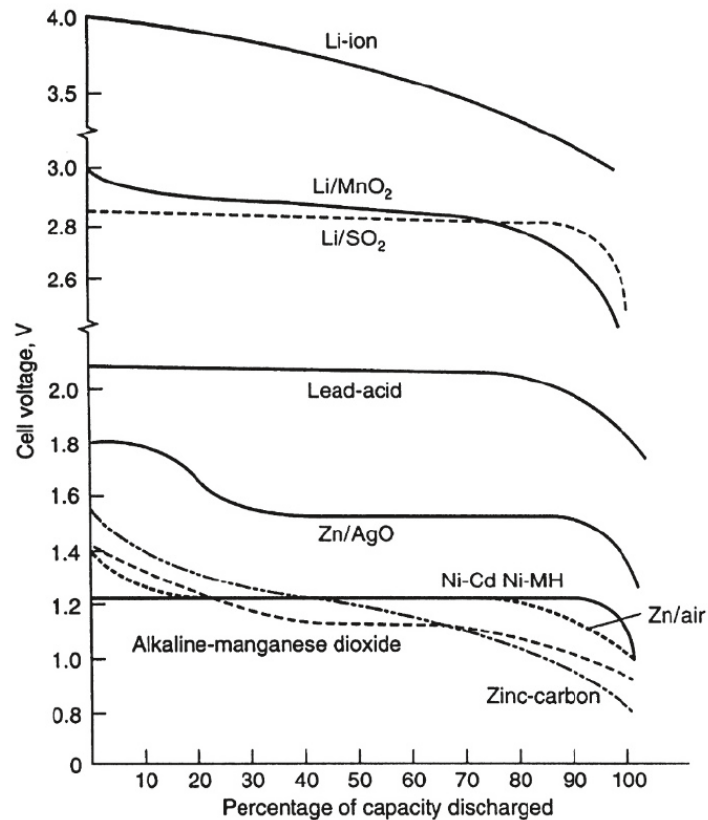


Figura 38. Comparativa de las curvas de descarga de baterías primarias y secundarias [Huggins, 2016]

En la Tabla 2 se pueden ver resumidas las características generales de las baterías:

Tabla 2. Comparativa de las características de las químicas generales [Elaboración propia a partir de Buchman, Chian, Vidnayaman y libro tabla de características].

	Plomo Ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
<i>Energía específica (Wh/kg)</i>	30-50	45-70	60-100	100-250
<i>Energía volumétrica (Wh/L)</i>	80-100	100-140	120-220	200-800
<i>Potencia específica (W/kg)</i>	150-350	80-150	200-300	200-600
<i>V máxima (V)</i>	2,4	1.4	1.4	4,2
<i>V nominal (V)</i>	2	1,2	1,2	3,6
<i>V mínima (V)</i>	1,8	1	1	2,5
<i>Tasa de carga (C)</i>	0,1-0,05	0,1	0,1	0,5-1
<i>Tiempo de carga (h)</i>	8-16	12-16	12-16	2-4
<i>Temperatura de operación (°C)</i>	-20 a 45	-30 a 60	-30 a 60	-20 a 60
<i>Eficiencia</i>	75%-85%	60%-70%	70%-80%	85%-95%
<i>Tolerancia a la sobrecarga</i>	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
<i>Autodescarga (mes)</i>	≈ 5%	≈ 20%	≈ 30%	≈ 10%

<i>¿Efecto memoria?</i>	No	Alto	Bajo	Muy bajo
<i>¿Carga rápida?</i>	No	+	+	++
<i>¿Mantenimiento?</i>	Algunas	Muy bajo	Muy bajo	No
<i>Ciclo de vida (80% DOD)</i>	250-1000	2000	<3000	1000-2000
<i>Coste</i>	Bajo	Alto	Moderado	Alto

4.6.2 Comparativa particular de las baterías de iones de litio

En este caso, al igual que se ha hecho con las baterías de química general, en la tabla 3 se comparan las características de las diferentes baterías de iones de litio con el fin de tener una visión global de ellas.

Tabla 3. Tabla comparativa de las baterías de iones de litio. [Elaboración propia a partir de Buchman, Chian, Vidnayaman y libro tabla de características].

	LCO	LMO	NMC	NCA	LFP	LTO
<i>Material Ánodo</i>	Grafito	Grafito	Grafito	Grafito	Grafito	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂
<i>Material Cátodo</i>	LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiNiMnCoO ₂	LiNiCoAlO ₂	LiFePO ₄	LMO o NMC
<i>Energía específica (Wh/kg)</i>	150-190	100-140	140-220	200-250	90-140	70-80
<i>V máxima (V)</i>	4,2	4,2	4,2	4,2	3,7	2,8
<i>V nominal (V)</i>	3,6	3,6	3,6	3,6	3,2	2,4
<i>V mínima (V)</i>	2,5	2,5	2,5	2,5	2	1,5
<i>Tasa carga recomendada (C)</i>	0,3-0,7	0,3-0,7	0,3-0,7	0,3-0,7	0,5-1	1
<i>¿Posibilidad alta tasa de descarga?</i>	No	Sí	No	No	Sí	Sí
<i>Máx corriente descarga continua (C)</i>	2-3	10	2-3	2-3	10-30	10
<i>Temperaturas carga (°C)</i>	0 a 45	0 a 45	0 a 45	0 a 45	0 a 45	-20 a 45
<i>Temperaturas descarga (°C)</i>	-20 a 60	-30 a 60	-20 a 60	-20 a 60	-30 a 60	-30 a 70
<i>Rendimiento (Rango SOC %)</i>	20-80	20-80	20-80	20-80	15-100	100
<i>Temperatura fuga térmica</i>	150°C	250°C	210°C	150°C	270°C	+ segura
<i>Ciclo de vida (80% DOD)</i>	500-1000	700-1500	1000-2000	1000-1500	1000-3000	3000-7000
<i>Coste</i>	Medio-Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Alto

En la fig.39 se observan las principales químicas de iones de litio expresadas en un gráfico radial en el que, cuanto más externo sea el parámetro, mejor es su característica (el coste más lejano, indica que más barato es):

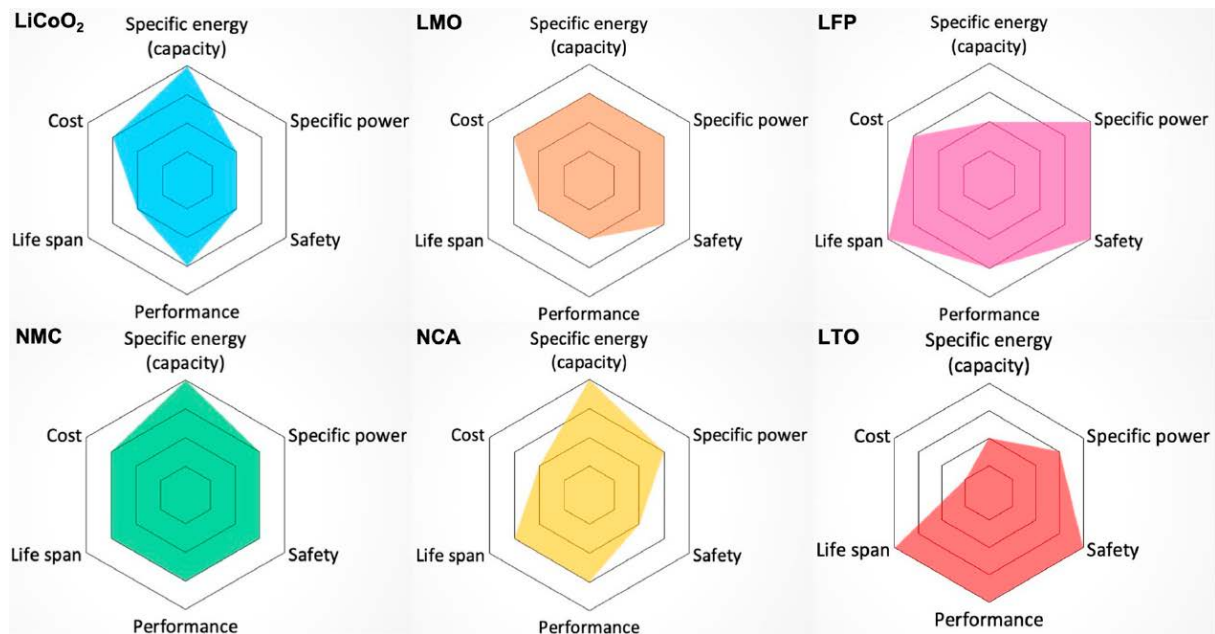


Figura 39. Comparativa de las características de las baterías li-ion. [Miao, 2019]

De esta forma se puede observar que, la batería más equilibrada actualmente es la NMC, que destaca por su energía específica, mientras que la NCA, aunque son similares, menor estabilidad y por ello seguridad, y mayor coste. Por otro lado, por ejemplo, la batería LFP destaca como se dijo anteriormente por su seguridad y vida útil, algo parecido a lo que lo hace la LTO, con un buen rendimiento pero que presenta un coste grande. Las baterías LCO y LMO, son las que se podría decir que peores características presentan. La primera de ellas, la LCO, presenta una escasa seguridad como consecuencia de la baja estabilidad que presenta, y un ciclo de vida más corto. Las LMO debido a su estabilidad por la estructura en forma de espinela, presenta menor capacidad y vida útil, y por ello necesita de otros compuestos que le ayuden a mejorar, dando lugar a las LMO-NMC.

Por el **equilibrio** que ofrecen las baterías **NMC** y, sobre todo, por su principal característica respecto a las demás que es la **energía específica** (en relación con la **autonomía** del vehículo), éstas son las baterías mayoritariamente utilizadas en el vehículo eléctrico.

5 HERRAMIENTAS DESARROLLADAS PARA LA FORMACIÓN

En este apartado se procede a explicar las herramientas introducidas y/o desarrolladas para la formación del alumnado sobre las baterías electroquímicas que pueden ser utilizadas en la automoción, aunque también en otras aplicaciones.

5.1 *Banco de datos de características de baterías*

Se ha creado un Banco de datos, basado en un libro Excel, en el cual se recopilan diferentes características (obtenidas de los datasheets del fabricante) de una serie de baterías comerciales de diversas composiciones químicas, geometrías y tamaños.

En la primera hoja del libro, se representa un **índice o tabla** que permite acceder directamente a las hojas de características de cada batería en concreto, de forma que se hace más accesible y fácil encontrar una batería por la química, geometría tamaño o fabricante. Además, desplazando hacia abajo la hoja, se encuentran algunas imágenes que resumen las características o muestran las geometrías de las baterías. En el caso de que se añadan más baterías, habría que añadir una nueva línea con la batería nueva y realizar el hipervínculo a la hoja de características correspondiente.

Cada una de las siguientes hojas del documento incluye una **tabla de características de cada una de las baterías** incluidas (se describe más adelante).

Finalmente, en la última hoja del libro Excel se muestra una **tabla comparativa** de las características que se consideran más relevantes de las baterías. Esta tabla recoge automáticamente esos datos de la hoja de características de cada una de las baterías y genera los gráficos de los parámetros correspondientes que se recogen en el Anexo 7. Esto permite comparar las diferentes baterías y observar las diferencias y semejanzas entre unas y otras químicas, geometrías y tamaños.

5.1.1 Tipos de baterías considerados

Los tipos de baterías utilizadas para este documento por su **química** son las nombradas en el Capítulo 4 del presente trabajo. Estas son las baterías de plomo ácido, níquel cadmio, níquel metal hidruro e iones de litio, y dentro de estas últimas, las LCO, LMO, NMC, NCA, LiPo, LFP y LTO.

Por su **geometría** se incluyen las cilíndricas, las prismáticas y las pouch o de bolsa.

Por **tamaño**, se han incluido muy diversos, como pueden ser 18650, 21700, 26650, AA, D, F...

5.1.2 Fuentes para la obtención de las características

Para realizar este documento, se han utilizado las webs de los propios fabricantes y distribuidores como pueden ser A123Systems, Panasonic, Samsung, GNB Exide, Sunlight...

Además de esas fuentes, otras webs que se han utilizado de forma recurrente han sido:

- Thundersheart (<https://www.thunderheartreviews.com/>)
- Lygte (<https://lygte-info.dk/>)
- Voltaplex (<https://voltaplex.com/>)

Las dos primeras webs son páginas que se dedican a testear las baterías, sometiéndolas a cargas y descargas a diferentes tasas, calcular las resistencias internas, hacer comparativas entre baterías... Estas muestran sus resultados y los comparten con la comunidad. La tercera es una web que representa una empresa de fabricación de packs de baterías de iones de litio, en la cual se pueden encontrar diversas baterías de iones de litio con sus químicas específicas (LCO, LMO, NMC...) algo que no es nada fácil de encontrar ya que no suele estar especificado. Además, adjuntan los datasheets de éstas, así como los MSDS (Material Safety Data Sheet) en el que se especifican los porcentajes de los componentes de la batería, los riesgos de las baterías y como solucionarlos...

5.1.3 Tabla normalizada de características de baterías

En este apartado se detalla la tabla normalizada de características de la batería. Ésta se puede encontrar en el Anexo 1.

BATERÍAS ELECTROQUÍMICAS TABLA RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS			
TIPO	(Tamaño)		(Química)
Marca			
Modelo Comercial			
Hoja de características	(Hipervínculo a datasheet)		
Capacidad Nominal	Qnom		Ah
Capacidad Mínima	Qmin		Ah
Condiciones (0.2C, 2.50 V descarga)			
Tensión nominal	Vnom		V
Tensión máxima carga	Vmax		V
Tensión mínima descarga	Vmin		V
Resistencia interna	Rint		mΩ (<=)
Corriente nominal para 1h	C ó C1		0,0 A
Energía nominal	Enom		0,0 Wh
Proceso de Carga			
Corriente nominal carga	Icnom		C 0,0 A
Tiempo nominal carga	tcnom		h
Corriente máxima carga	Icmax		C 0,0 A
Tiempo máximo carga	tcmx		h
Tensión máxima carga	Vcmax		0,00 V
Corriente final carga	Icfin		C 0 A
Proceso de Descarga			
Corriente máxima descarga continua	Idmax		C 0,0 A
Tensión mínima descarga	Vdmin		0,00 V
Corriente límite descarga discontinua	Idlim		C 0,0 A
Temperaturas min-max			
Almacenamiento	Tmin		°C
	Tmax		°C
Carga	Tmin		°C
	Tmax		°C
Descarga	Tmin		°C
	Tmax		°C
Dimensiones y peso			
Altura	Hmax	0,00	mm
Longitud	Lmax	0,00	mm
Grosor	Bmax	0,00	mm
Volumen	Vol	0,0	mm ³
Peso	m	0,1	kg
Densidad aparente	ρ		kg/L
Coste (IVA excl.)	Coste		€
	Coste/E	0,00	€/kWh
Energía específica	E/m	0,0	Wh/kg
	E/Vol		Wh/L
Potencia máx. @ 3C	P	0,0	W
Potencia específica @ 3C	P/m	0,0	W/kg
Potencia máx. @ η=2/3	P _{max}		W
Pot. max. espec. @ η=2/3	P _{max} /m	0,0	W/kg
Nº Ciclos descarga	80%DOD		>
	70%DOD		>
¿Circuito de protección?			

En la parte superior de la tabla se presenta la **información general de la batería**:

- **Tipo:** Se indica química, geometría y tamaño de la batería.
- **Marca:** Fabricante o marca de la batería.
- **Modelo comercial:** Nombre bajo el cual se puede encontrar a la venta esa batería.
- **Hoja de características:** En este caso se incluye el hipervínculo que lleva al **datasheet** de la batería que está alojado en una carpeta de la documentación del TFM.
- **Capacidad nominal y mínima:** Las capacidades que indica el fabricante de la batería bajo unas condiciones de descarga determinadas.

Seguidamente se muestran los **parámetros eléctricos** más relevantes: los voltajes nominales, máximos de carga y mínimos de descarga; la resistencia interna; la corriente nominal C ó C1; y la energía nominal calculada a partir de la Qnom y Vnom. Las corrientes se muestran tanto en tasa de corriente (C), como en amperios (A).

Después se exponen las características del **proceso de carga** como son:

- Corriente de carga nominal y el tiempo que tarda ésta en realizarse.
- Corriente máxima de carga que la batería soporta sin peligro y el tiempo que tardaría en cargar a esa corriente.

- La tensión máxima de carga.
- La corriente final de carga, es decir, la corriente a la cual se considera que la batería se encuentra completamente cargada.

También se muestran **parámetros de la descarga** como son:

- Corriente máxima de descarga continua, es decir, la máxima que puede aportar de forma continuada sin interrupción.
- Tensión mínima de descarga.
- Corriente límite de descarga discontinua (o de pico), que es la corriente máxima que puede aportar la batería durante un periodo de tiempo muy corto.

Se incluyen a su vez las temperaturas máximas y mínimas recomendadas por el fabricante, tanto de **almacenamiento**, así como de **operación** (carga y de descarga) para las baterías. Se añaden además las dimensiones de las celdas adaptadas a su geometría (espesor, altura anchura o diámetro). Y también se calcula su volumen, se incluye el peso y con ello se calcula la densidad aparente de la celda. Por otro lado, se incluye el precio de la celda (aproximado) y su coste por unidad de energía.

Mediante la energía nominal calculada anteriormente, y el peso de la celda, se obtiene la **energía específica** de la celda, y con el volumen y la energía nominal, la energía volumétrica. También, se muestran **dos formas de calcular la potencia máxima**, una de ellas igual a tres veces la potencia nominal ($3 \cdot V_{nom} \cdot C1$) y la segunda igual a $(2/9 \cdot V_{nom}^2 / R_{int})$. Esta segunda expresión se obtiene al suponer un rendimiento del proceso de descarga de $2/3$, ya que $P_{m\acute{a}x} = \eta_{m\acute{a}x} \cdot (1 - \eta_{m\acute{a}x}) \cdot V_{nom}^2 / R_{int}$ equivalente a que la resistencia externa aplicada sea dos veces el valor de R_{int} .

Ya para finalizar, se indican el **número mínimo de ciclos de descarga** que, según el fabricante, la batería permite realizar con una profundidad de descarga del 80% o del 70% en otros casos. Este apartado puede encontrarse un poco modificado dependiendo de la batería, ya que en algunos casos la información del fabricante no se adapta perfectamente a este parámetro. Por último, se indica si la celda en cuestión presenta un **circuito de protección** (PCM Protection Circuit Monitor) o no, incorporado en ella misma, ya que existen baterías que, para asegurar su correcto funcionamiento, así lo hacen.

Se ha realizado un esfuerzo grande para conseguir rellenar todos campos de datos de las tablas, si bien, en algunos casos, esto no ha sido posible debido a la falta de información del fabricante, ya sea por confidencialidad, o por no haber sido directamente publicados. Otras informaciones como pueden ser las resistencias internas, en algunos casos han sido escogidas de las páginas web de testeo anteriormente mostradas.

5.1.4 Curvas características carga/descarga

Además, en cada hoja de las baterías, se han incluido algunas curvas características referidas principalmente a la **carga** ($V-I-Q$ frente a tiempo) y **descarga** ($V_t-Q_{descarga}$). En algunas hojas, se incluyen otras gráficas representativas del comportamiento de las baterías, ya que a pesar de que se ha realizado un esfuerzo en buscar las anteriormente nombradas, no se ha podido encontrar esa información para la batería concreta.

5.1.5 Recomendaciones para el uso y almacenamiento de las baterías

Se incluye una pequeña tabla con avisos y recomendaciones para el correcto funcionamiento de la batería y su mantenimiento, en pro de su seguridad y mayor vida útil.

5.2 Libro para el cálculo de la influencia de la temperatura, longitud y sección a los cables de conexión de la batería

Con esta herramienta se pretende calcular fácilmente los efectos de la resistencia de los cableados de conexión entre las celdas. Esta resistencia depende y varía con la longitud del cableado, la sección de éste y la temperatura del propio cableado [Tipler, 2009].

Como bien es sabido, todo material presenta una resistencia al paso de corriente eléctrica, ya sea menor o mayor. Habitualmente, los cables se encuentran fabricados en cobre debido a su buena conductividad, y precio moderado. Otro material que también es bastante utilizado en los cables es el aluminio, que, aunque menos conductivo, es un material más ligero y de menor precio.

Los cables responden a la Ley de Ohm ($V=I \cdot R$), y por ello, cuando circula una corriente por éstos, al tener una cierta resistencia se produce una caída de potencial entre los extremos que, si bien en algunos casos es despreciable, en otros casos, cuando se habla de pocos voltios y/o amperios, hay que tener muy en cuenta. Por ello, se pasa ahora a describir los conceptos de resistencia, resistividad y la variación de estos frente a la temperatura:

- **Resistencia eléctrica (R):** Es la oposición que presenta un material al flujo de corriente a través de él. Se debe a la cantidad de electrones libre que posee el conductor, y a las colisiones que presentan en su movimiento los electrones y átomos. Y todo ello, como se ha dicho anteriormente, depende de la resistividad, la longitud y la sección del material con el que se encuentra fabricado. La resistencia se expresa en Ohmios (Ω) y su fórmula se describe de la siguiente forma:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Donde ρ es la resistividad del material, L es la longitud del cable y S es la superficie de la sección.

- **Resistividad (ρ):** Se trata de la resistencia específica de un material determinado, y cuantifica la dificultad que presenta el material para conducir corriente eléctrica. Es la inversa de la conductividad, la cual depende de la estructura atómica y molecular del material, así como de la temperatura. Normalmente se expresa en Ωm o $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ medida a 20°C . Esta resistividad varía con la temperatura de la siguiente forma:

$$\rho = \rho_{20^\circ\text{C}} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 20^\circ\text{C})]$$

Donde T es la temperatura actual del material y α el coeficiente de variación de la temperatura de ese material.

- **Coficiente de variación de la resistencia en función de la temperatura (α):** Es una propiedad del material, y cuantifica la relación entre la variación de la resistividad y el cambio de temperatura. Se mide en (1/K).

En la tabla 4 se pueden observar las características de algunos de los conductores más utilizados:

Tabla 4. Resistividad y coeficiente de temperatura para distintos materiales [Elaboración propia a partir de Tipler]

Materiales	Resistividad (ρ) a 20°C en $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	Coficiente de Temperatura (α) en $1/^\circ\text{C}$
Cobre	1,72E-02	3,93E-03
Aluminio	2,86E-02	4,07E-03
Plata	1,47E-02	3,80E-03
Hierro	9,71E-02	4,50E-03
Plomo	2,07E-01	4,30E-03
Tungsteno	5,65E-02	4,50E-03
Oro	2,44E-02	3,40E-03
Platino	1,06E-01	3,93E-03
Carbón	3,5E+01	-5,00E-04

Por todo ello, la resistencia, además de variar con la longitud y sección el cable (mayor cantidad de choques a cable más largo y a sección más pequeña), varía también con la temperatura (un aumento, provoca mayor agitación de los electrones provocando más choques). A partir de estos conocimientos, en el Anexo 2, se muestran y analizan diferentes resultados sobre la influencia de los parámetros anteriormente nombrados en los cables de conexionado.

5.3 Modelado de la temperatura de una batería en carga y descarga.

3.5.1 Planteamiento del modelado térmico de una batería

La energía eléctrica que absorbe o aporta una batería, viene condicionada por las reacciones químicas que se producen en su interior (determinadas por los materiales del material activo, dimensiones de electrodos...), y estas reacciones químicas generan calor. Esa generación de calor es una pérdida de energía de la batería (disipación), bien sea a la hora de absorber (cargar) o de suministrar (descargar) energía, ya que este calor no es aprovechado de ninguna manera.

Aunque ningún material en la naturaleza tiene una conductividad térmica infinita, muchos problemas de flujo de calor transitorio pueden simplificarse y resolverse con una precisión aceptable considerando que la temperatura dentro del sistema es sustancialmente uniforme u homogénea en cualquier instante. Esta simplificación se justifica cuando la resistencia térmica externa es mucho mayor que la resistencia térmica interna del sistema que controla el proceso de transferencia de calor. Relativo a ello, una medida de la importancia relativa de la resistencia térmica dentro de un cuerpo sólido es el número **Biot** (Bi), que es la relación entre la resistencia interna y la externa y puede definirse mediante la ecuación:

$$Bi = \frac{R_{int}}{R_{ext}} = \frac{L_s/k_s}{1/h_f} = \frac{h_f L_s}{k_s}$$

donde h_f es el coeficiente promedio de transferencia de calor al gas circundante, L_s es la dimensión característica del cuerpo (diámetro o espesor), y k_s es la conductividad térmica del cuerpo sólido. En cuerpos cuya forma se asemeja a una placa, un cilindro o una esfera, el error introducido por el supuesto de que la temperatura en cualquier instante es uniforme es inferior al 5% cuando la resistencia interna es inferior al 10% de la resistencia superficial externa, es decir $Bi < 0,1$ (en otras referencias se indica $Bi < 1$). Estas condiciones se cumplen en general para las baterías pequeñas, aunque hay que comprobar el valor para baterías prismáticas grandes [Kreith, 2011]. De esta forma se consigue simplificar el modelado y los cálculos que, de otra manera, tendrían grandes complicaciones.

En el presente trabajo, se utiliza el **modelo térmico promediado** (*Lumped thermal model*), para conocer la evolución de la temperatura en un proceso de carga/descarga [Viswanathan, 2010] [Jeon, 2011] [Wang, 2016]. El modelo se formula de la siguiente manera:

$$\frac{dE_{térmica,bat}}{dt} = \frac{d(m_{bat} \cdot Cp_{bat} \cdot T_{bat})}{dt} = (U \cdot A)_{bat} \cdot (T_{bat} - T_{\infty}) + q_{bat}$$

Donde m_{bat} es la masa de la batería (kg), Cp_{bat} el calor específico de ésta, T_{bat} es la temperatura (K), U es el coeficiente de transmisión de calor por convección (W/m^2K), A es la superficie de intercambio de calor (m^2) y q_{bat} es el calor generado (W) dentro de la batería.

A la hora de determinar el **calor generado** (q_{bat}), existen dos principales factores que son:

- **Calor generado por efecto Joule:** Se trata de una generación de **calor irreversible**, siempre exotérmica tanto en carga como en descarga, y viene dado de la siguiente forma:

$$q_{irr} = V \cdot I = R_{int} \cdot I^2 \quad (W)$$

- **Calor generado por cambios de entropía:** En este caso es una generación de **calor reversible** generada en los electrodos. Se describe de la siguiente forma:

$$q_r = I \cdot T_{bat} \cdot \frac{\Delta S}{nF} = I \cdot T_{bat} \cdot \frac{dV_{oc}}{dT} \quad (W)$$

Siendo ΔS la variación de la entropía de la batería, n el número de electrones por cada reacción y F la constante de Faraday.

En este trabajo, el término de generación de calor por entropía no se tiene en cuenta al ser en general mucho más pequeño que el de efecto Joule [Damay, 2017], [Saw, 2013]. Su evaluación detallada es compleja y requiere conocer la dependencia de V_{oc} respecto a la temperatura. Por ello únicamente se tienen en cuenta la generación de calor por efecto Joule.

Por todo ello, la ecuación que podría establecer el **balance de energía térmica** generada/evacuada de la batería es la siguiente:

$$\frac{dE_{t\acute{e}rmica,bat}}{dt} = \frac{d}{dt} (m_{bat} \cdot Cp_{bat} \cdot (T_{bat} - T_{amb})) = R_{int} \cdot I^2 - (U \cdot A)_{bat} \cdot (T_{bat} - T_{amb})$$

Considerando el término de generación por Joule positivo, y el término de evacuación de calor negativo (siempre que $T_{bat} > T_{amb}$).

A partir de esta expresión, se obtiene la ecuación diferencial de la variación de temperatura de la batería sobre la temperatura ambiente (siempre que exista intensidad de carga (+) o de descarga (-)):

$$\frac{d}{dt} (T_{bat} - T_{amb}) = \frac{R_{int} \cdot I^2}{m_{bat} \cdot Cp_{bat}} - \frac{(U \cdot A)_{bat}}{m_{bat} \cdot Cp_{bat}} \cdot (T_{bat} - T_{amb})$$

La **solución estacionaria** para la temperatura de la batería, se alcanza cuando la derivada vale 0, es decir cuando el término de generación de calor es igual al término de pérdida o evacuación, cumpliéndose que:

$$T_{bat,final} - T_{amb} = \frac{R_{int} \cdot I^2}{(U \cdot A)_{bat}} = \Delta T_{bat,final}$$

Definiendo un tiempo característico τ :

$$\tau = \frac{m_{bat} \cdot Cp_{bat}}{(U \cdot A)_{bat}}$$

La ecuación diferencial se puede expresar como:

$$\frac{d}{dt} (T_{bat} - T_{amb}) = \Delta T_{bat,final} - \frac{1}{\tau} \cdot (T_{bat} - T_{amb})$$

En el caso de que todas las variables fueran constantes, se puede obtener la **solución analítica** que depende de dichas variables:

$$\begin{aligned} \theta_{bat}(t) = (T_{bat}(t) - T_{amb}) &= \frac{R_{int} \cdot I^2}{(U \cdot A)_{bat}} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{(U \cdot A)_{bat}}{m_{bat} \cdot Cp_{bat}} t\right) \right] = \\ &= \Delta T_{bat,final} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \end{aligned}$$

Como puede observarse:

- el aumento de temperatura final depende R_{int} , I , U y A ,
- mientras que la velocidad a la que se alcanza dicha temperatura final depende de m_{bat} , Cp_{bat} , U y A .

En caso de que **no circule corriente**, el balance se plantearía análogamente, conduciendo a la siguiente expresión que muestra la **reducción exponencial** de temperatura por enfriamiento desde una temperatura inicial superior a la del ambiente, o bien un aumento exponencial en caso de que la temperatura inicial sea inferior a la del ambiente.

$$\theta_{bat}(t) = (T_{bat}(t) - T_{amb}) = \Delta T_{bat.inicial} \cdot \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

En el supuesto de que **alguna de las variables no permanezca constante**, por ejemplo, la intensidad de carga o descarga, o alguna de las propiedades eléctricas o térmicas, se ha de realizar una integración numérica:

$$\frac{d}{dt}(T_{bat} - T_{amb}) = \frac{R_{int} \cdot I^2}{m_{bat} \cdot Cp_{bat}} - \frac{(U \cdot A)_{bat}}{m_{bat} \cdot Cp_{bat}} \cdot (T_{bat} - T_{amb})$$

$$\theta_{bat_{i+1}} = \theta_{bat_i} + \left[\frac{R_{int}}{(m \cdot Cp)_{bat}} \cdot I_{i+1}^2(t) - \frac{U_i \cdot A}{(m \cdot Cp)_{bat}} \cdot \theta_{bat_i} \right] \cdot \Delta t_{i+1}$$

Esto permite reproducir casos de baterías ensayadas en el banco experimental de baterías de carga y descarga (ver Anexo 5)

5.3.2 Estudio paramétrico de sensibilidad

Se ha realizado un estudio paramétrico de sensibilidad con el fin de ver cómo afectan las distintas variables anteriormente expuestas a la temperatura de una batería supuesta cilíndrica. Para ello, se establecen las condiciones iniciales (muy semejantes a las reales pero modificadas ligeramente para trabajar de forma más cómoda):

Parámetros fijos:

- $T_{amb} = 293 \text{ K}$
- $T_{bat \text{ inicial}} = 296 \text{ K}$
- $K_{fluido} = 0,025 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Parámetros de referencia:

- $R_{int} = 0,05 \ \Omega$
- Diámetro = 0,018 m
- Altura = 0,065 m
- Área = 0,0042 m²
- $C_{pbat} = 1000 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- Coeficiente de transmisión de calor por convección $U = 4,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
- Tiempo característico $\tau = \frac{m_{bat} \cdot Cp_{bat}}{(U \cdot A)_{bat}} = 2,536,6 \text{ s}$

A partir de estos parámetros, se procede a realizar una modificación de los valores de los parámetros de referencia (del orden de un 20% tanto por arriba como por abajo) para observar los cambios existentes en la temperatura calculada de la batería. En este apartado se muestran algunos de los resultados del estudio paramétrico en forma de gráficos, pero el estudio paramétrico completo se encuentra en el Anexo 3.

Las figuras siguientes corresponde a los casos en los que se modifica el calor específico **Cp** de la batería, el **diámetro**, la resistencia interna **Rint** y el coeficiente de transmisión de calor por convección **U**. Para todos estos casos, solo se varía este parámetro, manteniendo todos los demás como las condiciones iniciales indican.

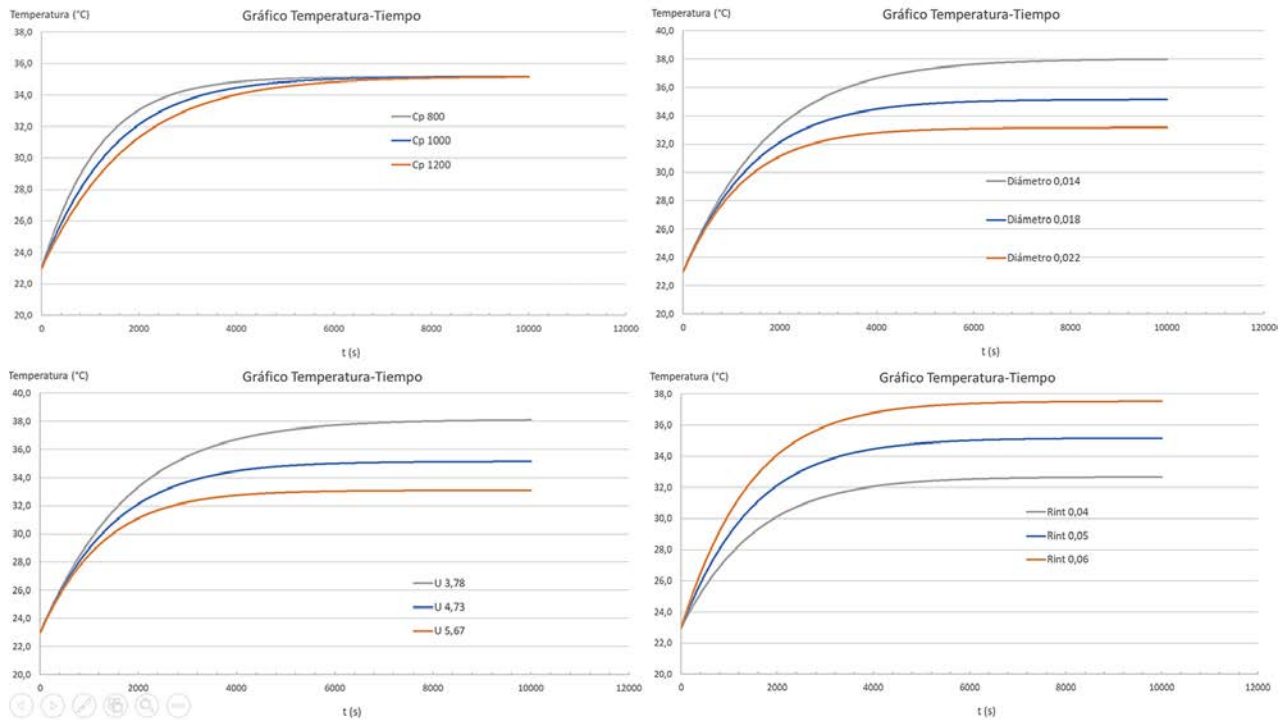


Figura 40. Gráficos del análisis paramétrico de sensibilidad variando Cp, diámetro, U y Rint.

Para recopilar la variación de los parámetros y los resultados que provocan en la temperatura final de la batería, a partir del estudio completo presente en el anexo, se ha realizado la tabla 5. Aquí se muestra como se ve afectado cada parámetro con la variación y, sobre todo, los términos de generación de calor por Joule y de calor evacuado.

Tabla 5. Tabla de los resultados del análisis paramétrico de sensibilidad [Elaboración propia]

Parámetro inicial	Inicial	Variación	Valores	U	Tau	Término Joule	Término evacuación	Temperatura batería
<i>Cp</i>	1000	+	1200	=	+	--	-	-
		-	800	=	-	++	+	+
<i>Área = 0,0042</i>	Diam=0,018 Alt=0,065	Diam +	0,022	-	-	=	+	-
		Diam -	0,014	+	+	=	-	+
		Alt +	0,084	=	-	=	+	-
		Alt -	0,047	=	+	=	-	+
<i>Rint</i>	0,05	+	0,06	=	=	+	=	+
		-	0,04	=	=	-	=	-
<i>Intensidad</i>	3	+	3,6	=	=	+	=	+
		-	2,4	=	=	-	=	-
<i>U</i>	4,73	+	5,67	+	-	=	=	-
		-	3,78	-	+	=	=	+
<i>Tau</i>	2526,6	+	3031,9	=	+	=	-	+
		-	2021,3	=	-	=	+	-

La simbología + significa que el valor aumenta, el - significa que el término disminuye, y el = que se mantiene constante.

Siempre que el término de la generación por efecto Joule sea mayor que el término de evacuación, se producirá un aumento de la temperatura de la batería, y en caso de que sea menor, una disminución. Aunque en algunos casos se considere que, U es constante, esto no es así, sino que existe un cambio muy pequeño y se expresa de este modo para interpretar mejor lo que pasa. En todos los casos, si la

temperatura de la batería aumenta, U aumenta, y si la temperatura de la batería disminuye, U disminuye, y en consecuencia, Tau varía a la inversa.

5.3.3 Comparativa con ensayos en banco de batería

Se ha realizado también un estudio comparativo de las temperaturas obtenidas en diferentes ensayos (con el banco físico de ensayo de baterías de la fig.41. de la Escuela de Ingenieros Industriales de Valladolid), y de las temperaturas obtenidas de la herramienta realizada en Excel. Se han utilizado los valores de corriente de carga y descarga del ensayo correspondiente, la tensión en bornes de la batería, así como las temperaturas ambiente y de la batería (medida mediante termopares), y el intervalo de tiempo en el que se tomaba cada dato. Se ha realizado el estudio para la **batería NCR26650A** de Panasonic, del cual los resultados se exponen a continuación, y del que el estudio completo se muestra en el Anexo 5.

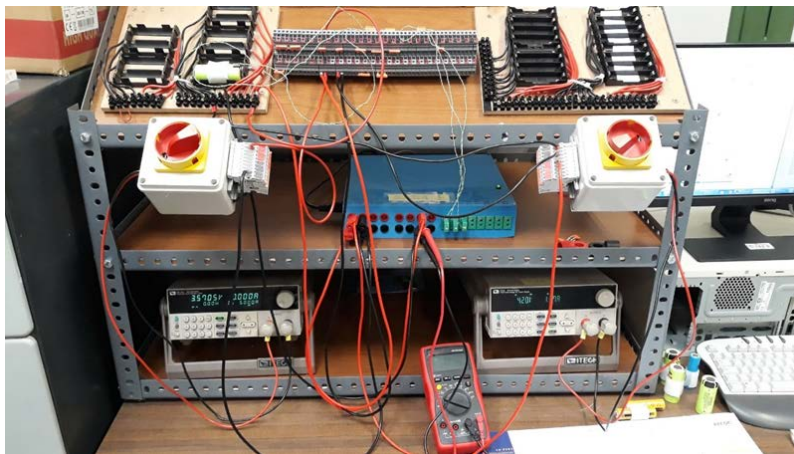


Figura 41. Banco físico de ensayo de baterías de la Escuela de Ingenieros industriales de Valladolid.

La temperatura calculada se muestra en morado, la experimental en naranja, la intensidad de corriente, ya sea de carga o de descarga en rojo, la tensión en bornes en azul, y la temperatura ambiente en negro. Todos los casos presentan procesos de carga y descarga, en algunos momentos a intensidad constante, otros a tensión constante, otros a potencia constante y, por último, también a resistencia constante.

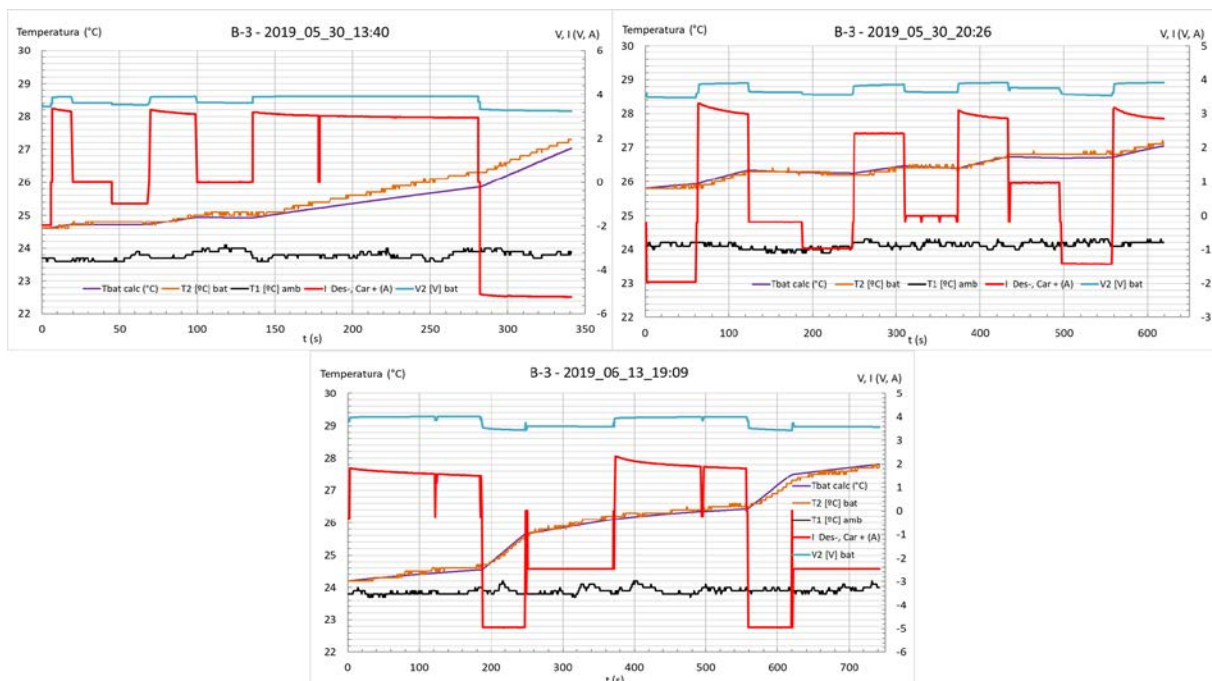


Figura 42. Gráficos comparativos Texp (naranja) vs Tcalc (morado) para batería NCR26650.

En los gráficos, se observa que **cuando existe una carga o descarga**, a mayor intensidad mayor temperatura generada en la batería y a menor, menor temperatura. En algunos momentos en los que el tiempo de carga o descarga es corto, no da tiempo a apreciar la subida de temperatura en el gráfico, ya que ésta es pequeña y gradual.

En los periodos en los que no existe corriente, se puede observar cómo la temperatura disminuye, y es mayor esta disminución, cuando la diferencia entre la temperatura ambiente y la de la batería es más grande, ya que mayor es su coeficiente de película U .

En los momentos en los que se observa que en la carga la corriente decrece, es debido a que la batería ha llegado a la **zona de tensión constante**, con lo que la intensidad se va reduciendo para no estresar la batería, y finalizar la carga correctamente. El hecho de que en esos instantes se aprecie en la gráfica una pequeña subida de tensión, es debido a que la fuente de alimentación trata de mantener la tensión constante en sus bornes a 4,2V, y puesto que existe una diferencia entre la tensión en bornes de la batería (caída de tensión debido al cableado y bornes) y de la fuente (tensión establecida a 4,2V) que depende de la intensidad, ésta al reducirse, hace que la tensión se diferencie menos entre la de la batería y la de la fuente.

Los **saltos de tensión en los inicios de los procesos de carga o descarga** son debidos al paso de medición de la batería en circuito abierto a la medición de la tensión en bornes, diferencia que viene dada por el producto de la intensidad de carga o de descarga por la resistencia interna. De tal forma que cuando se inicia la carga, la tensión en bornes es mayor que la tensión en circuito abierto, y se produce un aumento de la tensión, mientras que cuando se descarga ocurre de forma inversa, y el salto de tensión se produce hacia un menor valor. Al finalizar la carga o descarga ocurre de forma inversa, ya que deja de "actuar" la resistencia interna debido a que deja de circular corriente.

En todos estos casos ensayados y simulados, **se ha realizado un ajuste** de calor específico de la batería y del coeficiente de transmisión de calor por convección, para que las gráficas de la temperatura calculada se ajusten con la experimental de una forma más correcta.

Para hacer ese ajuste óptimo en la batería NCR, los valores del C_p y de la U se han modificado con un factor de 0,8 y 1,4 respectivamente (partiendo de un C_p 1000 J/kg·K y una U dependiente de θ de aproximadamente de 2 W/m²·K). El hecho de partir de un C_p de 1000 J/kg·K es debido a que, en la bibliografía utilizada, la mayor parte de artículos indicaban que las baterías de iones de litio presentan un C_p aproximado de ese valor, pero en algunos otros casos ese C_p podía llegar a los 800 J/kg·K, y puesto que no se tenía ese valor sobre la batería utilizada, se ha optado por utilizarlo para realizar un mejor ajuste. Por otro lado, con respecto al coeficiente de transmisión U , se ha de comentar que este varía en gran medida dependiendo de la diferencia de temperatura inicial entre la temperatura ambiente y de la batería, con lo que, realizar un cálculo para que se ajuste a la realidad es bastante complicado. Por ello se ha utilizado un factor que hace que se ajuste de forma relativamente fiel a la temperatura experimental, y a su vez que este valor pueda ser un valor real para una convección natural de la batería. La relación entre el C_p y la U es de 0,5714, y con esta relación y la utilización de un valor de R_{int} de 60mOhm, valor ajustado también debido a los resultados experimentales que muestran que la R_{int} es aproximadamente el doble que la que indica su hoja de características, permiten obtener unos resultados aceptables y similares a los experimentales.

Además de la complejidad de los cálculos debido a las propiedades termodinámicas cambiantes y a la generación de calor de la batería (ya sea por la uniformidad en la batería supuesta constante, como por la entropía supuesta nula), estas baterías no se encuentran completamente libres, sino que van situadas en un portapilas, que interfiere algo en la evacuación del calor (conducción e incluso radiación supuesta nula).

También, los contactos de las pilas con las baterías tienen un importante efecto según bibliografía, ya que aumentan la resistencia y por ello la generación de calor de la batería, no solo en los contactos sino extendiéndose por la batería y afectando a la temperatura medida [Saw, 2013].

5.4 Programa de carga y descarga de baterías (resultados comparativos y análisis de los mismos)

A partir de un libro excel de cálculo de procesos de carga y descarga de baterías, se han realizado ciertas modificaciones para adaptarlo a este trabajo. Esta herramienta permite la **simulación de la descarga a corriente constante** (I_{cte}) de una batería, y la **carga en dos fases, a corriente constante - tensión constante** ($I_{cte} - V_{cte}$) de la misma. El programa toma los datos necesarios para la simulación de las baterías de la tabla normalizada de la propia batería, y permite la selección e introducción manual de otros datos para la simulación de estos procesos en diferentes condiciones (configuración serie/paralelo, corrientes de carga/descarga, inicios y finales de carga por SOC, estado de salud SOH, diferentes intervalos de tiempo, calor específico de la batería, coeficiente de transmisión de calor...

Los resultados principales que permite obtener son las tensiones en circuito abierto y en terminales, tanto del pack como de la celda individual (considerando o no resistencia de cableado), valores de la intensidad y resistencia interna de las simulaciones, la potencia descargada y la potencia perdida con la que se ha calculado el rendimiento, y los términos de generación de calor y evacuación del mismo con los que se determina la temperatura de la batería para cada paso de tiempo establecido.

Todos estos resultados son calculados a partir de las curvas de descarga V_t -Capacidad de la batería, relacionando la capacidad con el SOC y la tensión V_t con la V_{oc} , y a partir de éstos, y por correlación multilínea se calcula el polinomio, de tal forma que V_{oc} depende del SOC. Con el valor de V_{oc} calculado a partir del SOC, se calculan los demás valores descritos anteriormente de forma iterativa.

A continuación, se muestran los apartados de descarga y carga con un resumen de los principales resultados obtenidos de los estudios, el interfaz del programa y un ejemplo de gráfico obtenido. El estudio detallado de los resultados y análisis de éstos se encuentra en el Anexo 6 del presente trabajo.

5.4.1 Descarga

Se han realizado simulaciones para diversas situaciones (ver tabla 6), en las que se toma como referencia la descarga normal (a **corriente constante**) de la batería NCR26650A (primera fila de la tabla) con las condiciones iniciales que se indican a continuación en la fig. 43, y a partir de la cual se realizan las variaciones.

Condiciones iniciales de referencia.

Programa de Descarga Batería Li-ion
 Seleccione los parámetros de entrada empezando por el tipo de batería (desplegable) y el resto de parámetros y variables iniciales y finales del proceso. Tras cada cambio, SIEMPRE ES NECESARIO Pulsar "INICIAR"

Curva escalada a Chen 2006: NO Componentes escalados: NO

INICIAR

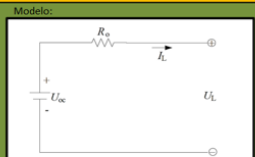
Batería: Grado del Polinomio: SOC de parada: SOH: Reduce la Q_{nom} y aumenta R_{int}

SOC inicial: Elementos serie: Resistencia cableado: SOHc: Reduce la Q_{nom}

Corriente en C: Elementos paralelo: Salto de tiempo: SOHr: Aumenta la R_{int}
 $I_s = 2,778E-04 h$

B: NCR26650A	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	0,00	0,00	101,46	-316,29	885,75	-236,59	81,49	-17,89	3,24	3,04

Cap. Nom. Celda: 5000 mAh R. Int. Nom: 30 mΩ I desc celda: 5 A
 Capacidad pack: 5000 mAh Rint pack+Cal: 30 mΩ I desc pack: 5 A
 V. nominal pack: 3,7 V V. máx. pack: 4,2 V V. mín. pack: 2,6 V

Modelo: 

Coeficientes de escalado
 Vbat/Vref
 Qref/Qbat
 C. A-E

Cálculo Temperatura batería

θ_{ini} : K
 T_{amb} : K
 $T_{bat ini}$: K
 U : W/(m².K)
 C_p : J/(kg.K)
 τ : s

Masa: kg
 Área: m²

Figura 43. Condiciones iniciales de referencia para la simulación de descarga de la batería NCR26650A.

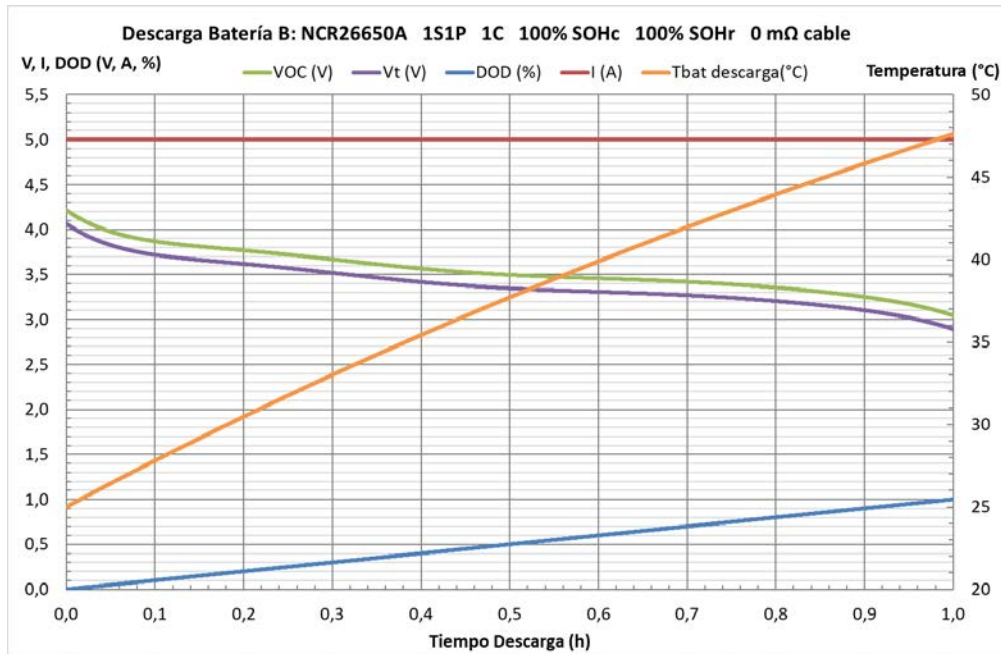


Figura 44. Gráfico ejemplo del resultado de la descarga normal de la batería NCR26650.

El hecho de **augmentar la resistencia de cableado**, provoca una disminución de la tensión en bornes del pack, ya que se produce caída de tensión en el cableado y la potencia perdida depende de esta resistencia, mientras que la potencia descargada solo depende de la R_{int} . La temperatura de la batería, por ende, no se ve afectada. A mayor resistencia, mayor caída de potencial, con lo que menor rendimiento de descarga.

El hecho de simular un envejecimiento por pérdida de capacidad (**Disminuir el SOHc**) afecta a la capacidad de la batería, con lo que, si se mantiene la intensidad de descarga, esta batería proporciona menor energía y se descarga en un tiempo más pequeño. Esto supondría una disminución de la autonomía en el vehículo para una misma potencia requerida. Además, la temperatura de la batería alcanza niveles más bajos de temperatura ya que el periodo de descarga, al ser menor, genera menos calor. A menor SOHc (menor capacidad), peores características.

Por otro lado, **disminuir el SOHr** de la batería debido al envejecimiento hace que aumente la R_{int} , disminuyendo la tensión en bornes y empeorando el rendimiento. En este caso aumenta la temperatura ya que la descarga sigue siendo de una hora. A menor SOHr (mayor R_{int}), peores características.

En el caso un envejecimiento provocado por ambos SOH, las características son aún peores ya que se combinan ambos factores.

En el cambio de **configuración serie/paralelo**, aumentar únicamente las celdas en serie hace que aumente la tensión total de la batería, lo que permite mejorar o aumentar la energía y la potencia para una misma intensidad de descarga. Esto también hace que aumente la resistencia interna del pack, pero lo hace de forma proporcional ya que aumenta el voltaje, por lo que no tiene efecto negativo en este caso.

En caso de aumentar únicamente las celdas en paralelo, la intensidad total de descarga y la capacidad de la batería aumentan, mientras que la resistencia interna total del pack disminuye. Este aumento de intensidad y capacidad hace que al igual que en el caso anterior, se pueda proporcionar mayor energía y potencia.

En caso de utilizar tanto celdas en serie como en paralelo, se produce de igual manera un aumento de la intensidad y de la tensión, todo ello beneficioso para el vehículo. En los últimos tiempos, se está tendiendo hacia los packs de baterías de alto voltaje, llegando a los 800V en el caso del Porsche Taycan, frente a los 400 habituales que por ejemplo que Tesla introduce en sus vehículos. Esto

provoca que se pueda reducir el peso del vehículo (menor sección de cableado), proporcionando grandes potencias y con menores pérdidas óhmicas ya que la intensidad disminuye para una misma potencia.

Las temperaturas calculadas son las individuales de cada celda sin que les afecte la temperatura de las adyacentes, es decir, como si solo se descargara esa batería.

Todo este suponiendo que las celdas se encuentren perfectamente balanceadas, es decir, que tengan la misma tensión, y que descarguen de igual manera.

La **disminución de la corriente** de descarga se provoca que la batería tarde más en descargarse, disminuyendo su potencia, pero mejorando su rendimiento ya que las pérdidas generadas son menores. También la temperatura generada es menor, lo cual es beneficioso para la batería. Por otro lado, el **aumento de la corriente** hace que la potencia aumente, algo que va en contra de la autonomía (hace que el término pérdidas sea mayor empeorando su rendimiento, y descargándose en menor tiempo), y la temperatura de la batería que, si aumenta a valores muy altos, puede verse perjudicada.

Por último, se realiza la simulación para dos baterías más, la **INR18650-29E** y la **GBS-LFP100Ah-A**. La primera presenta un rendimiento mayor que la celda NCR. Esto se debe a que, aunque la resistencia interna es mayor ($0,045\Omega$ frente a $0,03\Omega$), la intensidad a 1C es menor (2,85A frente a 5A), y puesto que es una relación entre la potencia perdida y la potencia descargada, la intensidad afecta en mayor medida que la R_{int} , por lo que el rendimiento es mayor que en la batería NCR. Respecto a la segunda, ésta presenta un alto rendimiento debido a su muy pequeña R_{int} ($0,6m\Omega$). Existe una pequeña diferencia entre la tensión en circuito abierto y la tensión en bornes debido a este hecho, y el aumento de temperatura no es muy grande debido a la misma razón.

Los resultados obtenidos de las simulaciones se pueden ver en la tabla 6:

Tabla 6. Comparativa de los resultados de las simulaciones de descarga.

DESCARGA A INTENSIDAD CONSTANTE (0%DOD-100%DOD)			Batería	Tasa de descarga	Capacidad (mAh)	Intensidad (A)	Rint (Ω)	Tiempo proceso (h)	Voc inicial (V)	Voc final (V)	Vt inicial (V)	Vt final (V)	T ^a inicial celda (°C)	T ^a final celda (°C)	η descarga (%)
Normal			NCR26650A	1C	5000	5	0,03	1	4,216	3,043	4,066	2,893	25,0	47,6	95,58
Normal			INR18650-29E	1C	2850	2,85	0,045	1	4,203	2,669	4,075	2,54	25,0	45,2	96,9
Normal			GBS-LFP100Ah-A	1C	100000	100	0,0006	1	3,65	2,559	3,59	2,499	25,0	31,9	98,3
Variaciones sobre la simulación normal de la batería NCR26650A	Rcableado	14,06m Ω	NCR26650A	1C	5000	5	0,03	1	4,216	3,043	3,995	2,823	25,0	47,6	93,37
		42,19m Ω		1C	5000	5	0,03	1	4,216	3,043	3,855	2,683	25,0	47,6	88,66
	SOH	SOHc 80%		1C	4000	5	0,03	0,8	4,216	3,043	4,066	2,893	25,0	43,9	95,58
		SOHc 50%		1C	2500	5	0,03	0,5	4,216	3,043	4,066	2,893	25,0	37,7	95,58
		SOHr 80%		1C	5000	5	0,036	1	4,216	3,043	4,036	2,863	25,0	52,1	94,65
		SOHr 50%		1C	5000	5	0,06	1	4,216	3,043	3,991	2,818	25,0	58,9	93,22
	Configuración serie/paralelo	2s1p		1C	5000	5	0,06	1	8,431	6,807	8,131	5,787	25,0	47,6	95,58
		1s2p		1C	10000	10	0,015	1	4,216	3,043	4,066	2,893	25,0	47,6	95,58
		4s1p		1C	5000	5	0,12	1	16,862	12,174	16,262	11,574	25,0	47,6	95,58
		1s4p		1C	20000	20	0,0075	1	4,216	3,043	4,066	2,893	25,0	47,6	95,58
		2s2p		1C	10000	10	0,03	1	8,431	6,087	8,131	5,787	25,0	47,6	95,58
	Intensidad	0,5C		0,5C	5000	2,5	0,03	2	4,216	3,044	4,141	2,969	25,0	34,1	97,84
		3C		3C	5000	15	0,03	0,33	4,216	3,025	3,766	2,6	25,0	104,3	85,46

5.4.2 Carga

De la misma forma, se realizan simulaciones de carga para la batería NCR26650A. Este proceso de carga se realiza en **dos fases, corriente constante y tensión constante** (una vez ha alcanzado la tensión máxima de la batería). Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 7. Las condiciones de referencia o condiciones iniciales son las mostradas en la fig.45. y a partir de ellas, se realizan diversas variaciones con el fin de estudiar su influencia en la carga de la batería.

Condiciones iniciales de referencia.

Programa de Carga Batería Li-ion
 Seleccione los parámetros de entrada empezando por el tipo de batería (desplegable) y el resto de parámetros y variables iniciales y finales del proceso. Tras cada cambio, SIEMPRE ES NECESARIO Pulsar "INICIAR"

Curva escalada a Chen2006: SI Componentes escalados: NO

INICIAR

Batería: Grado del Polinomio: Corriente de parada: SOH: Reduce la Qnom y aumenta Rint

SOC inicial: Elementos serie: Resistencia cableado: SOHC: Reduce la Qnom

Corriente en C: Elementos paralelo: Salto de tiempo: SOHR: Aumenta la Rint
Is=2,778E-04 h

B: NCR26650A									
9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0,00	0,00	101,46	-316,29	385,75	-236,59	81,49	-17,89	3,24	3,04

Cap. Nom. Celda: R. Int. Nom: I desc. celda: Coeficientes de escalado

Capacidad pack: Rint pack+Cab: I desc. pack: Vbat/Vref: Qref/Qbat: C. A-E: V. min. pack: V. max. pack:

Modelo: 

Cálculo Temperatura batería

θini: Tamb: Tbat ini: U: Cp: Tau:

Masa: Área:

Figura 45. Condiciones iniciales de referencia para la simulación de carga de la batería NCR26650A.

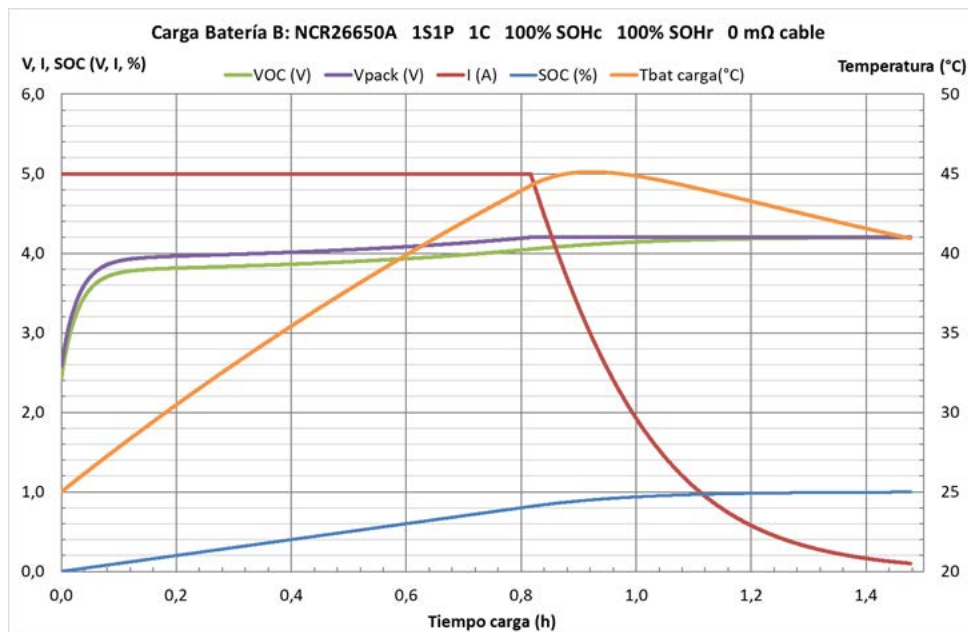


Figura 46. Gráfico ejemplo del resultado de la carga normal de la batería NCR26650.

El hecho de **aumentar la resistencia de cableado**, aumenta la caída de tensión en bornes (V_t). Esto supone que se llega antes a la tensión máxima en bornes, con lo que se pasa antes a la fase de tensión constante, a pesar de que la tensión en circuito abierto es menor. Se reduce así la eficiencia

global del proceso de carga. Además, el tiempo total de carga aumenta a pesar de que el tiempo de I_{cte} sea menor, ya que el SOC se encuentra a un nivel más bajo en el cambio de fase, y puesto que la intensidad se reduce, el tiempo en V_{cte} aumenta considerablemente. Ese acortamiento del tiempo en I_{cte} hace que la temperatura máxima sea menor, y que la final al prolongarse el tiempo a menor intensidad, sea menor también.

El hecho de simular un envejecimiento por pérdida de capacidad (**Disminuir el SOHc**) afecta a la capacidad de la batería, con lo que, la batería puede absorber menor energía (fenómenos físicos y químicos). Los tiempos de carga son menores, y esto se debe a la relación Voc-SOC. Si para una carga en Ah aceptada, el SOC es mayor en la batería envejecida, la tensión Voc es mayor que en la batería nueva para la misma carga en Ah aceptada (que representaría un SOC menor y una Voc también menor). La temperatura es menor, también debido a los menores tiempos de la fase de carga a intensidad constante.

Por otro lado, **disminuir el SOHr** de la batería debido al envejecimiento hace que aumente la **Rint**, aumentando la tensión en bornes y empeorando el rendimiento. El tiempo I_{cte} disminuye ya que la tensión máxima se alcanza antes, mientras que el tiempo V_{cte} se alarga debido a que el SOC se encuentra a un nivel más bajo y la corriente se reduce a lo largo del tiempo, y este SOC ha de llegar al 100%. Se produce un aumento de la temperatura al existir una mayor resistencia interna.

En el caso un envejecimiento provocado por ambos SOH, las características son aún peores ya que se combinan ambos factores.

En el cambio de **configuración serie/paralelo**, se observa como varían las tensiones y corrientes del pack, si se quiere alimentar individualmente cada celda de la misma forma que se hace una individual. Los resultados de la simulación respecto a tensiones, rendimientos y temperaturas son iguales.

La **disminución de la corriente** hace que la fase de carga a corriente constante se prolongue, ya que la intensidad se ve reducida. Sin embargo, el tiempo a tensión constante se ve disminuido, y esto es debido a que, al haber menor caída de tensión interna, el SOC es mayor que en el caso normal y en consecuencia el Voc. Por ello, aunque después se reduzca la intensidad, al tener un mayor Voc, el tiempo para completar la carga es menor que en el caso normal. El rendimiento es mayor debido a la menor caída de potencial en la resistencia interna. También genera menor cantidad de calor, y con ello una menor temperatura de la batería. Sin embargo, el **aumento de la corriente** hace que que la caída de tensión por efecto de la resistencia interna es bastante mayor, provocando unos malos rendimientos de carga. En este caso, el tiempo en fase I_{cte} es menor, debido a la gran caída de potencial en la Rint, haciendo que se llegue a la tensión máxima en menor espacio de tiempo. Esto provoca que el tiempo a tensión constante se alargue ya que el SOC es muy menor que en el caso normal, y debe llegar al 100%. También el calor generado es mayor, pudiendo alcanzar (dependiendo de la corriente) temperaturas muy altas de la batería.

Por último, se realiza la simulación para dos baterías más, la **INR18650-29E** y la **GBS-LFP100Ah-A**. La primera presenta un rendimiento mayor que la celda NCR. Esto se debe a que, aunque la resistencia interna es mayor ($0,045\Omega$ frente a $0,03\Omega$), la intensidad a 1C es menor ($2,85A$ frente a $5A$), y puesto que es una relación entre la energía perdida y la energía aportada, la intensidad afecta en mayor medida que la Rint, por lo que el rendimiento es mayor que en la batería NCR. Respecto a la segunda, ésta presenta un alto rendimiento debido a su muy pequeña Rint ($0,6m\Omega$). Existe una pequeña diferencia entre la tensión en circuito abierto y la tensión en bornes debido a este hecho, y el aumento de temperatura no es muy grande debido a la misma razón.

Los resultados obtenidos de las simulaciones se pueden ver en la tabla 7:

Tabla 7. Comparativa de los resultados de las simulaciones de carga.

CARGA CTE - V CTE (0%SOC - 100%SOC)		Batería	Tasa de descarga	Capacidad (mAh)	Intensidad (A)	Rint (Ω)	t_{final} Icte (h)	t_{final} Vcte (h)	Voc inicial (V)	Voc cambio (V)	Voc final (V)	Vt inicial (V)	Vt final (V)	T ^a máx celda (°C)	T ^a final celda (°C)	η carga Icte (%)	η carga Vcte (%)	
Normal		NCR26650A	1C	5000	5	0,03	0,82	1,48	2,431	4,05	4,197	2,581	4,2	45,1	40,9	96,23	98,08	
Normal		INR18650-29E	1C	2850	2,85	0,045	0,85	1,33	2,431	4,072	4,196	2,559	4,2	43,4	39,8	96,77	98,35	
Normal		GBS-LFP100Ah-A	1C	100000	100	0,0006	0,92	1,48	2,055	3,49	3,55	2,115	3,55	31,7	31,2	98,2	99,13	
Variaciones sobre la simulación normal de la batería NCR26650A	Rcableado	14,06m Ω	NCR26650A	1C	5000	5	0,03	0,70h	1,72h	2,431	3,98	4,196	2,651	4,2	43,7	38,2	94,52	97,08
		42,19m Ω		1C	5000	5	0,03	0,31h	2,27h	2,431	3,839	4,193	2,792	4,2	39,8	33,5	91,07	94,66
	SOH	SOHc 80%		1C	4000	5	0,03	0,65h	1,18h	2,431	4,05	4,197	2,581	4,2	41,8	39,1	96,23	98,08
		SOHc 50%		1C	2500	5	0,03	0,41h	0,74h	2,431	4,05	4,197	2,581	4,2	36,3	35,2	96,23	98,08
		SOHr 80%		1C	5000	5	0,036	0,77h	1,58h	2,431	4,02	4,196	2,611	4,2	48,4	42,7	95,5	97,66
	Configuración serie/paralelo	SOHr 50%		1C	5000	5	0,06	0,69h	1,74h	2,431	3,975	4,196	2,656	4,2	52,8	44,6	94,41	97,01
		2s1p		1C	5000	5	0,06	0,82	1,48	4,862	8,1	8,394	5,162	8,4	45,1	40,9	96,23	98,08
		1s2p		1C	10000	10	0,015	0,82	1,59	2,431	4,05	4,199	2,581	4,2	45,1	40,1	96,23	98,09
		4s1p		1C	5000	5	0,12	0,82	1,48	9,725	16,2	16,788	10,325	16,8	45,1	40,9	96,23	98,08
		1s4p		1C	20000	20	0,0075	0,82	1,69	2,431	4,05	4,199	2,581	4,2	45,1	39,3	96,23	98,10
	Intensidad	2s2p		1C	10000	10	0,03	0,82	1,59	4,862	8,1	8,397	5,162	8,4	45,1	40,1	96,23	98,09
		0,5C		0,5C	5000	2,5	0,03	1,83	2,36	2,431	4,125	4,197	2,506	4,2	33,7	32,1	98,09	99,05
		3C		3C	5000	15	0,03	0,03	1,07	2,431	3,75	4,197	2,881	4,2	69,7	59,2	88,35	93,75

6 CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones.

En la actualidad, el hecho de **electrificar la flota de vehículos** se debe a las necesidades de los fabricantes de reducir las emisiones de CO₂, para cumplir con las **normativas medioambientales** impuestas por las instituciones, con el principal fin de **reducir los gases de efecto invernadero**.

Para ello, el **vehículo eléctrico está apostando fuertemente por las baterías electroquímicas** como medio de almacenamiento de energía para la tracción del vehículo, especialmente dos tipos de químicas de iones de litio, las **baterías NMC y LFP**. Estas baterías poseen algunas ventajas que las impulsan a ser más utilizadas que otras existentes en el mercado. Las primeras presentan una gran energía específica que se traduce a una muy buena autonomía, además de otros parámetros con buenas condiciones como son la vida útil, la potencia específica y la seguridad, a un precio moderado. Se trata de las baterías más equilibradas. Las LFP, que muestran un crecimiento en su uso actualmente, presentan un precio similar a las anteriores, mejoras respecto a potencia específica (que se traduce en aceleración del vehículo), seguridad y ciclo de vida (son más estables químicamente), pero presentan una menor energía específica en contra de las NMC.

Las **baterías en estudio más prometedoras** son las baterías de **estado sólido**, que ofrecen mayores densidades de energía debido a su menor volumen al introducir electrolito sólido, y unos tiempos de carga muy pequeños en comparación con las baterías actuales.

Respecto al **estado del arte** del vehículo eléctrico y de las baterías electroquímicas:

- Se ha informado de la historia y situación actual del vehículo eléctrico, permitiendo obtener una visión general sobre éste.
- Se han descrito diferentes sistemas de almacenamiento, haciendo especial hincapié en las baterías electroquímicas, de las cuales se ha explicado su funcionamiento, las partes que las componen, sus diferentes geometrías, químicas y parámetros más importantes.

Todo eso permite proporcionar la obtención de unas ideas más claras sobre funcionamiento de las baterías, y dar a conocer las diferentes ventajas que presentan unas frente a otras, permitiendo discernir qué químicas son más o menos apropiadas para sus diferentes usos. Además, esto podría ser utilizado en las prácticas de la asignatura de Sistemas de Propulsión del Máster en Ing^a de Automoción como elemento de aprendizaje.

Respecto a las **herramientas creadas** para la enseñanza:

- El **Banco de datos de las baterías** permite tener una visión global de las características de éstas, y con los gráficos comparativos y el conocimiento de los rangos de varios parámetros (tensión nominal, corrientes de carga o descarga, densidades de energía...), saber diferenciar con un vistazo rápido entre unas baterías y otras.
- El **libro excel sobre la influencia de la temperatura en los cables de conexionado** según su longitud y sección, permite conocer al alumno como afectan estos parámetros a la resistencia al paso de corriente eléctrica que ofrece el cableado. Además, esta resistencia, puede añadirse a la herramienta de simulación de carga y descarga.
- El **programa para el modelado de la temperatura** es otra herramienta que permite según las condiciones de corriente (carga o descarga a diferente o misma intensidad), hacerse una idea de la evolución de la temperatura de la batería a lo largo de estos procesos. Esto aporta información adicional, y junto con los conocimientos de temperatura de almacenamiento y operación de las baterías, permite conocer si se podrían encontrar en rangos peligrosos de temperatura, o si su funcionamiento se podría ver afectado o perjudicado. También, se pueden hacer comparativas de la evolución de la temperatura de la batería con el banco físico de

ensayos de la Escuela. Además, el cálculo de la temperatura se incluye también en el programa de simulación de carga y descarga

- Por último, el **programa de simulación de carga y descarga** es una herramienta que permite, a partir de los datos obtenidos de las baterías del Banco de datos, realizar simulaciones de carga y descarga en muy diferentes condiciones mediante la variación de parámetros. Proporciona resultados cuantitativos sobre el comportamiento general de la batería en estos procesos, ya que permite realizar simulaciones de packs de baterías de vehículos eléctricos, u otros dispositivos, y ver la influencia de los diferentes parámetros (SOC inicial, intensidades de carga o descarga, efecto del envejecimiento, con deterioro de la capacidad o la resistencia interna, etc.).

6.2 Principales aportaciones del autor del TFM

A lo largo del desarrollo del Trabajo Fin de Master se ha realizado una amplia revisión sobre el estado del arte de las baterías electroquímicas, especialmente sobre las baterías de iones de litio, enfocándose principalmente al vehículo eléctrico. Así mismo, se han descrito diversas tecnologías que pueden ser de interés y que, en algunos casos, ya se están desarrollando como alternativa de estas baterías. Se ha recopilado un elevado número de hojas de características de las baterías, presentando sus valores en un formato estandarizado. De esta forma, se pretende dar una visión de cuáles son las baterías más recomendables en el vehículo eléctrico.

Esta revisión ha servido para realizar diversas herramientas didácticas para la enseñanza del alumnado sobre las baterías electroquímicas, como son la creación de un Banco de datos de las características de las baterías con sus tablas normalizadas, un libro Excel sobre la influencia de la temperatura en el cableado de conexión de baterías, un libro Excel que permite modelar la temperatura de la batería para la carga y descarga (con la realización de un estudio de sensibilidad que permite observar cómo afectan los factores principales a la temperatura), así como compararlo con ensayos realizados en el banco de baterías de la Escuela, y por último, se ha realizado la adaptación de un programa de simulación de carga y descarga de las baterías realizado por Iván Rodríguez, y un estudio de cómo afectan los diferentes parámetros de las baterías a estos procesos.

6.3 Sugerencias para trabajos futuros

De cara a complementar y ampliar los recursos aportados en este trabajo, se pueden plantear una serie de desarrollos adicionales:

- Introducción del cálculo de la variación de entropía de la batería en el modelado de la temperatura (apartado 5.3), ya que, aunque ésta despreciables en general pequeña, permitirá ajustarse más a la realidad.
- Cálculo dinámico de la temperatura del cable dependiente del aislamiento que éste posee, y con el aumento de temperatura provocado por el paso de corriente.
- Obtención o vinculación de los parámetros de las baterías directamente desde el Banco de datos al Programa de carga y descarga.
- Desarrollo de un procedimiento que permita realizar automáticamente estudios paramétricos de efectos de variables relevantes: intensidades de carga o descarga, resistencias internas, envejecimiento, estados de carga iniciales, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berg, H. (2015). *Batteries for Electric Vehicles*. Cambridge University Press.
- Buchman, I. (2016). *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers*. 4th ed. Cadex Electronics.
- Chapman, A. J., (1977). *Transmisión del calor*. 4a ed. Interciencia.
- Chian, T. Y., et al. (2019). *A Review on Recent Progress of Batteries for Electric Vehicles*. International Journal of Applied Engineering Research, 14 (December 2019), 4441-4461.
- Damay, N., et al. (2017). *Thermal modeling of a large prismatic LiFePO₄ / graphite battery. Coupled thermal and heat generation models for characterization and simulation*. Journal of Power Sources, Elsevier, 2015, 283, pp.37-45.
- Dhameja, S. (2001). *Electric vehicle battery systems*. Newnes.
- Diariomotor.com. (2013). Tecnología M-KERS: analizamos al mayor rival del híbrido a baterías | Tecmovia. Consultado el 26 de abril de 2020, en <https://www.diariomotor.com/tecmovia/2013/09/08/tecnologia-m-kers-analizamos-al-mayor-rival-del-hibrido-a-baterias/>
- Forococheselectricos.com. (2019). Geometrías de las baterías para coches eléctricos. Consultado el 26 de abril de 2020, en <https://forococheselectricos.com/>
- Huggins, R. A. (2016). *Energy storage: Fundamentals, materials and applications*. 2nd ed. Springer.
- IEA. (2019). Global EV Outlook 2019 to electric mobility. International Energy Agency. Consultado en www.iea.org/publications/reports/globalevoutlook2019/
- IEC. (2011). *Electrical Energy Storage*. International Electrotechnical Commission (Vol. 2).
- Jeon, D. H. (2011). *Thermal modeling of cylindrical lithium ion battery during discharge cycle*. Energy Conversion and Management, 52(8-9), 2973-2981.
- Kiehne, H. (2003). *Battery technology handbook*. 2nd ed. Marcel Dekker.
- Kreith, F., Manglik, R. M., & Bohn, M. S. (2011). *Principles of Heat Transfer*. 7th ed. Cengage Learning.
- Larminie, J., & Lowry, J. (2012). *Electric vehicle technology explained*. John Wiley & Sons.
- Luo, X., Wang, J., & Dooner, M. (2014). *Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation*. Applied Energy, 137, 511-536.
- Maxwell. (2019). ¿Por qué Tesla ha comprado uno de los mayores fabricantes de supercondensadores? Consultado el 19 de abril de 2020, en <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/sector/tesla-ha-comprado-mayores-fabricantes-supercondensadores/20190214194700025631.html>
- Miao, Y., et al. (2019). *Current li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements*. Energies, 12(6).
- Míguez, C. (2018). *Análisis de la evolución del diseño del automóvil desde sus inicios hasta la actualidad*, Trabajo Fin de Grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.

- Motor.es.** (2017). *Coches Rarunos: Sebring-Vanguard CitiCar, el inesperado éxito del coche eléctrico* - Motor.es. Consultado el 18 de abril de 2020, en <https://www.motor.es/noticias/sebring-vanguard-citicar-201521965.html>
- Ottaviano, D.** (2011). *Technical Assessment and Modeling of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles*.
- OVEMS.** (2020). *Observatorio del Vehículo Eléctrico y Movilidad Sostenible – Universidad Pontificia Comillas – IIT*. Consultado el 18 de abril de 2020, en <https://evobservatory.iit.comillas.edu/>
- Pistoia, G.** (2014). *Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications*. Elsevier.
- Rufer, A.** (2009). *Energy storage, Systems and Components*. Taylor.
- Saw, L. H., Ye, Y., & Tay, A. A. O.** (2013). *Electrochemical-thermal analysis of 18650 Lithium Iron Phosphate cell*. *Energy Conversion and Management*, 75, 162-174.
- Scrosati, B., Garche, J., & Tillmetz, W.** (2015). *Advances in battery technologies for electric vehicles*. Elsevier.
- Tesla.** (2020). *Model 3 | Tesla*. Consultado el 18 de abril de 2020, en https://www.tesla.com/es_es/model3
- Tinaut, F.**, (2019) *Apuntes de asignatura Sistemas de Propulsión Alternativos*. Máster en Ingeniería de Automoción. Universidad de Valladolid.
- Tipler, P., Mosca, G.** (2009). *Física para la ciencia y la tecnología. 2, Electricidad y magnetismo, Luz, Física moderna*. 5a ed. Reverté.
- Toyota.** (2020). *Toyota Mirai | Sistema de Pila de combustible*. Consultado entre el abril y mayo de 2020, en <https://www.toyota.es>
- Triana, E.** (2017). *Tracción para vehículos eléctricos*. Trabajo Fin de Máster, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.
- Vidyanandan, K. V.** (2019). *Batteries for Electric Vehicles*. *Energy Scan: A House e-Journal of Corporate Planning*, NTPC Ltd, I (20, 1-7).
- Viera Pérez, J. C.** (2008). *Carga rápida de baterías de Ni-Cd y Ni-MH de media y gran capacidad. Análisis, síntesis y comparación de nuevos métodos*. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo.
- Viswanathan, V. et al.** (2010). *Effect of entropy change of lithium intercalation in cathodes and anodes on Li-ion battery thermal management*. *Journal of Power Sources*, 195(11), 3720-3729.
- Wang, C., et al.** (2019). *Recent progress of metal-air batteries-A mini review*. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9 (14), 1-22.
- Wang, Q., Jiang, B., Li, B., & Yan, Y.** (2016). *A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 106-128.
- Zubi, G., & Dufo-López, R.** (2018). *The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89 (April 2017), 292-308.

LECTURAS RECOMENDADAS

Puesto que el presente trabajo está enfocado a la formación sobre las baterías electroquímicas, se proponen ahora algunos libros que pueden ser de interés. Estos se encuentran ordenados por niveles de complejidad.

Nivel introductorio. Se trata de libros interesantes que se pueden entender sin tener conocimientos específicos.

- **Dhameja, S.** (2001). *Electric vehicle battery systems*. Newnes.
- **Buchman, I.** (2016). *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers*. 4th ed. Cadex Electronics.
- **Root, M.** (2011). *The Tab Battery Book*. Mc Graw Hill.

Nivel medio. Para entender estos libros ya se deben tener unos conocimientos, principalmente químicos y eléctricos.

- **Berg, H.** (2015). *Batteries for Electric Vehicles*. Cambridge University Press.
- **Scrosati, B., Garche, J., & Tillmetz, W.** (2015). *Advances in battery technologies for electric vehicles*. Elsevier.
- **Thaler, A., & Watzenig, D.** (2014). *Automotive Battery Technology*. Springer

Nivel avanzado. Se han de tener conocimientos específicos, ya que son libros que profundizan mucho en la materia.

- **Huggins, R. A.** (2009). *Advanced batteries: Materials science aspects*. Springer.
- **Pistoia, G.** (2014). *Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications*. Elsevier

ANEXOS

Aquí se adjuntan los documentos que han permitido obtener las conclusiones con resultados completos, así como otros necesarios para el correcto desarrollo del trabajo:

Anexo 1. Tabla normalizada de las características de la batería

BATERÍAS ELECTROQUÍMICAS			
TABLA RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS			
TIPO	(Tamaño)		(Química)
Marca			
Modelo Comercial			
Hoja de características	(Hipervínculo a datasheet)		
Capacidad Nominal	Q _{nom}		Ah
Capacidad Mínima	Q _{min}		Ah
Condiciones (0.2C, 2.50 V descarga)			
Tensión nominal	V _{nom}		V
Tensión máxima carga	V _{max}		V
Tensión mínima descarga	V _{min}		V
Resistencia interna	R _{int}		mΩ (<=)
Corriente nominal para 1h	C ó C1	0,0	A
Energía nominal	E _{nom}	0,0	Wh
Proceso de Carga			
Corriente nominal carga	I _{cnom}		C
		0,0	A
Tiempo nominal carga	t _{cnom}		h
Corriente máxima carga	I _{cmax}		C
		0,0	A
Tiempo máximo carga	t _{cmax}		h
Tensión máxima carga	V _{cmax}	0,00	V
Corriente final carga	I _{cfin}		C
		0	A
Proceso de Descarga			
Corriente máxima descarga continua	I _{dmax}		C
		0,0	A
Tensión mínima descarga	V _{dmin}	0,00	V
Corriente límite descarga discontinua	I _{dlim}		C
		0,0	A
Temperaturas min-max			
Almacenamiento	T _{min}		°C
	T _{max}		°C
Carga	T _{min}		°C
	T _{max}		°C
Descarga	T _{min}		°C
	T _{max}		°C
Dimensiones y peso			
Altura	H _{max}	0,00	mm
Longitud	L _{max}	0,00	mm
Grosor	B _{max}	0,00	mm
Volumen	Vol	0,0	mm ³
Peso	m	0,1	kg
Densidad aparente	p		kg/L
Coste (IVA excl.)	Coste		€
	Coste/E	0,00	€/kWh
Energía específica	E/m	0,0	Wh/kg
	E/Vol		Wh/L
Potencia máx. @ 3C	P	0,0	W
Potencia específica @ 3C	P/m	0,0	W/kg
Potencia máx. @ η=2/3	P _{max}		W
Pot. max. espec. @ η=2/3	P _{max} /m	0,0	W/kg
Nº Ciclos descarga	80%DOD		>
	70%DOD		>
¿Circuito de protección?			

Anexo 2. Cálculo del coeficiente transmisión de calor por convección.

Para los cálculos realizados con el fin de obtener la temperatura de la batería, es necesario el cálculo del coeficiente de transmisión de calor por convección, que varía según la temperatura del aire. Aquí se explica el procedimiento seguido para su cálculo.

Se toman como referencia las propiedades termodinámicas del aire seco a presión atmosférica, y a partir de ahí se realizan unas interpolaciones para sacar los valores característicos como son el calor específico, el coeficiente de conducción (k_f), el número de Prandtl (Pr), la viscosidad cinemática y el coeficiente de expansión [Chapman, 1977].

A partir de este coeficiente se calcula el **número de Grashof** determinado por la siguiente expresión:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu^2}$$

Donde g es la constante de gravitación universal (m/s^2), β es el coeficiente de expansión ($1/K$), ΔT es la diferencia de temperatura entre la temperatura de la batería y la temperatura ambiente (K), L es la longitud característica del cuerpo (m) y ν es la viscosidad cinemática.

A partir de ahí se obtiene el Rayleigh multiplicando a Gr por Pr :

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

Y a partir del Rayleigh se obtiene el Nusselt por medio de la ecuación:

$$Nu = 0,53 \cdot \sqrt[4]{Ra}$$

Por último, para obtener el coeficiente de transmisión de calor por convección U :

$$U = \frac{Nu \cdot k_f}{L}$$

A partir del valor inicial de U , en los cálculos realizados en el trabajo, este valor se actualiza para las diferentes condiciones, excepto que se haya considerado como constante.

Todas estas fórmulas son aproximaciones que se realizan a partir de bibliografía, y son válidas para unos ciertos rangos, en los que se ha comprobado que se cumplen para el presente trabajo.

Anexo 3. Influencia de la temperatura, y longitud y de sección a los cables de conexionado de la batería.

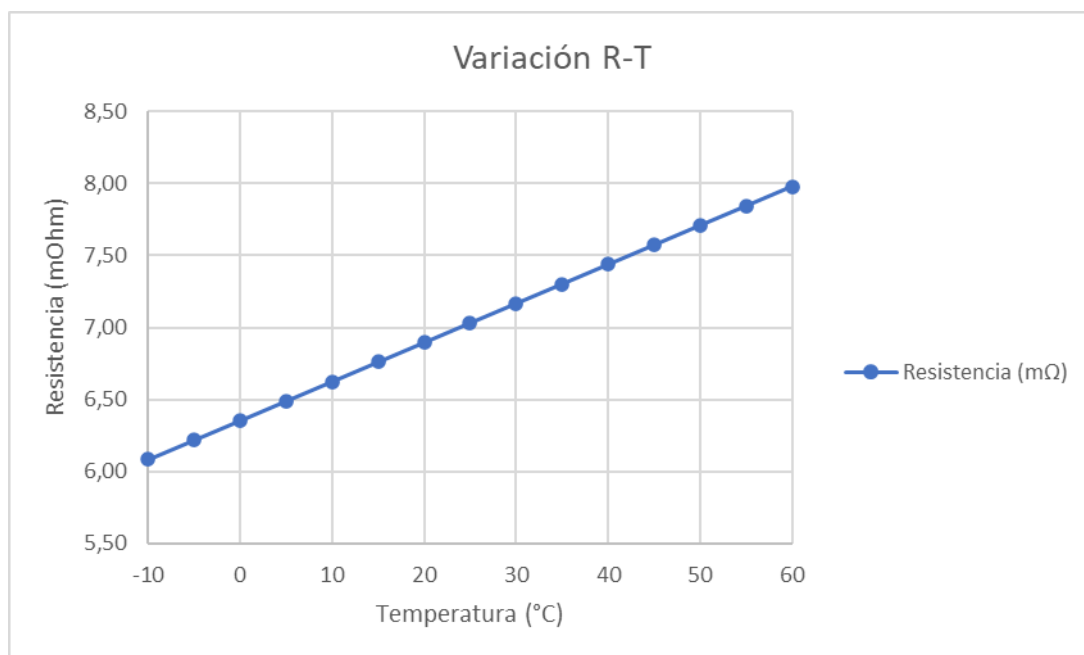
Se anexan en este caso algunos cálculos para diferentes situaciones de longitud, sección y temperatura del cableado:

Cálculo de la resistencia en función de la temperatura, longitud y sección de un cable de cobre.

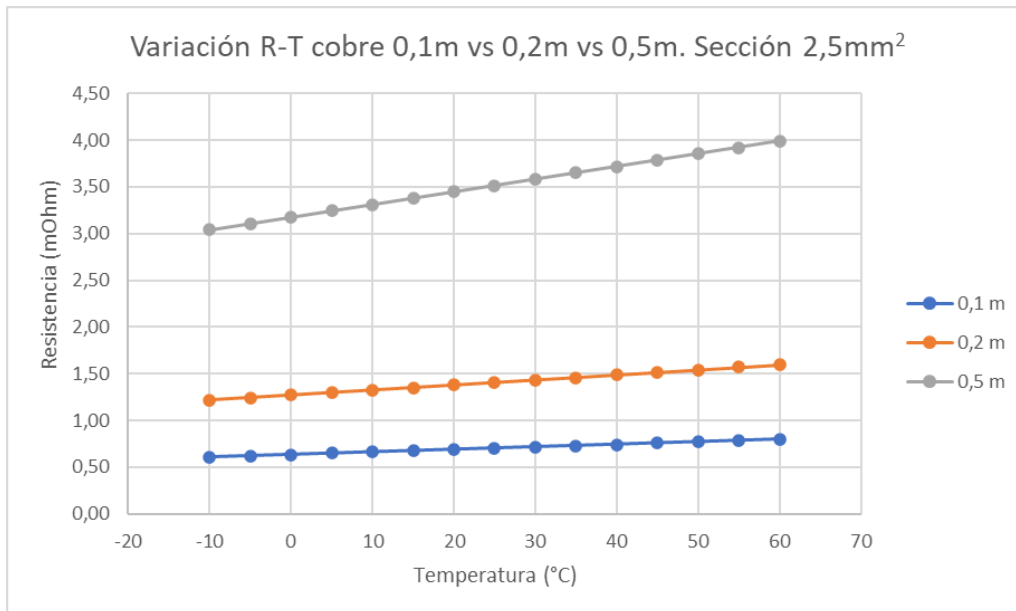
En la siguiente tabla se muestra una relación entre la temperatura y la resistencia de un cable de cobre de una longitud de 1 metro y una sección de 2,5mm². El rango de temperatura utilizada corresponde con los valores que suelen permitir las celdas Li-ion en la descarga.

Temperatura (°C)	Longitud (m)	Sección (mm ²)	Resistividad (Ωmm ² /m)	Resistencia (mΩ)
-10	1	2,5	1,52E-02	6,02
-5	1	2,5	1,55E-02	6,22
0	1	2,5	1,59E-02	6,35
5	1	2,5	1,62E-02	6,49
10	1	2,5	1,66E-02	6,63
15	1	2,5	1,69E-02	6,76
20	1	2,5	1,72E-02	6,90
25	1	2,5	1,76E-02	7,03
30	1	2,5	1,79E-02	7,17
35	1	2,5	1,83E-02	7,30
40	1	2,5	1,86E-02	7,44
45	1	2,5	1,89E-02	7,57
50	1	2,5	1,93E-02	7,71
55	1	2,5	1,96E-02	7,85
60	1	2,5	2,00E-02	7,98

También se adjunta una gráfica que muestra la relación de la tabla anterior. Se puede observar que a medida que aumenta la temperatura, aumenta la resistencia del cable.

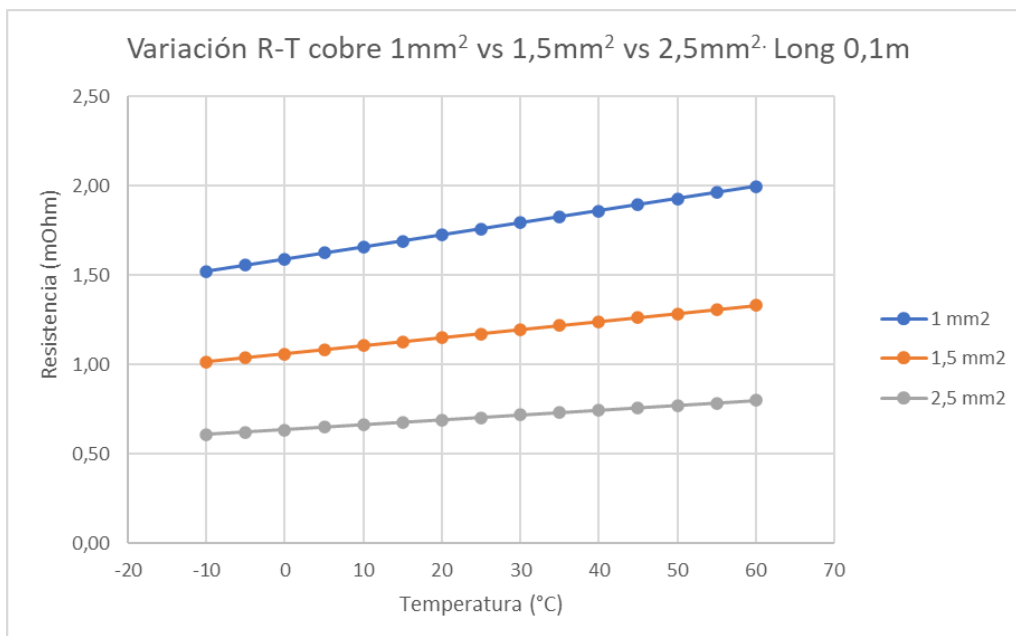


Ahora se procede a realizar una comparativa de cables con diversas longitudes y misma sección para las temperaturas anteriormente mostradas.



Se puede observar que, a medida que la longitud aumenta, aumenta la resistencia que ofrece el cableado, y que ésta lo hace a su vez a la vez que aumenta la temperatura. Esto es debido a que, a mayor longitud, mayor probabilidad de choques de los electrones y, además, al encontrarse más agitados, éstos se obstaculizan en mayor medida produciéndose un aumento en el número de choques.

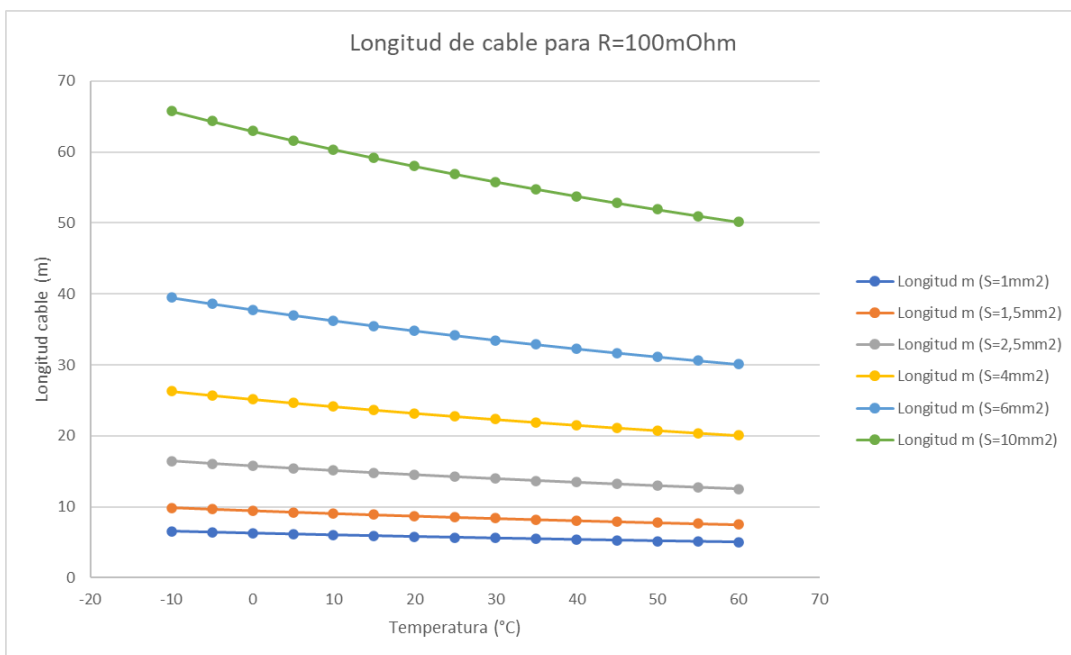
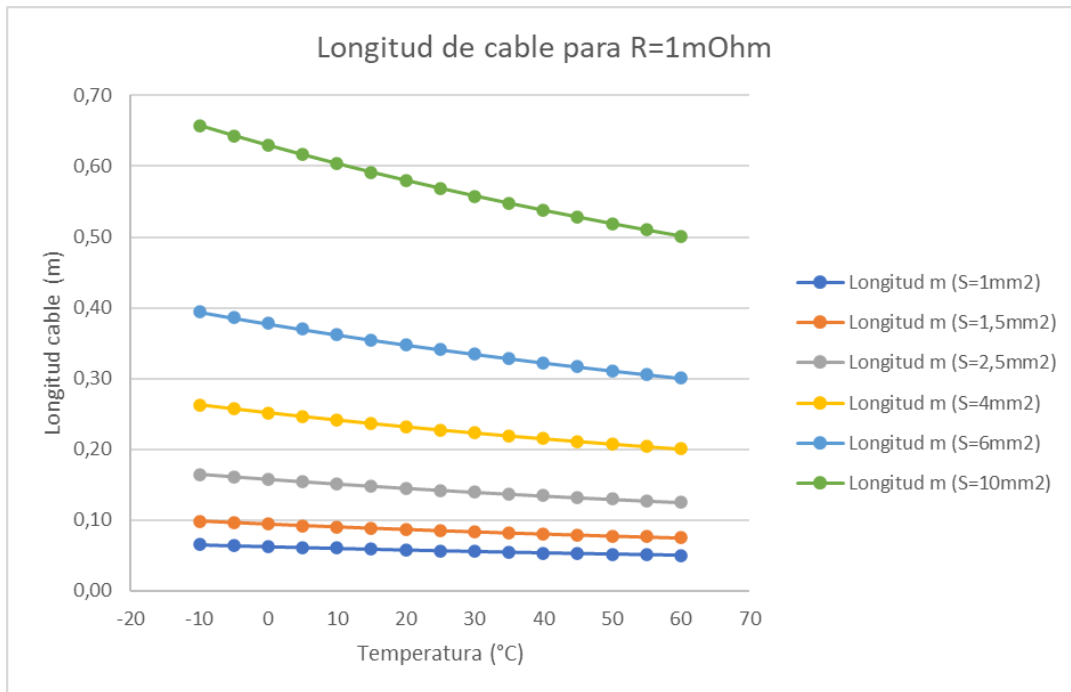
En la gráfica mostrada a continuación, se comparan 3 cables de una longitud de 0,1m con diferentes secciones.



Se puede ver que a medida que la sección del cable disminuye, la resistencia de estos aumenta, ya que los electrones tienen menos espacio por el que discurrir, y a misma cantidad de electrones en un espacio más reducido, mayor número de choques y por ello, mayor resistencia eléctrica.

Cálculo de la longitud de cable necesaria para alcanzar una resistencia de 1mΩ y 100mΩ.

Empleando las mismas fórmulas anteriormente utilizadas, pero en este caso con el objetivo de obtener la longitud del cable que, para una resistencia establecida ofrecen diferentes secciones de cable, se pueden observar las siguientes gráficas:

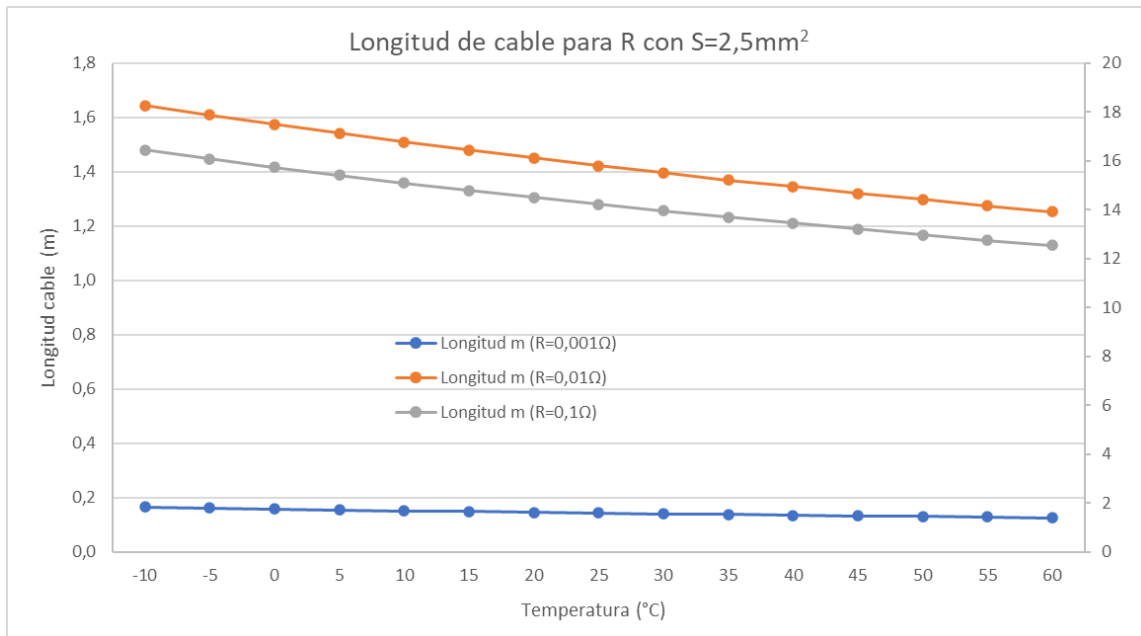


Se ve que, a medida que la sección aumenta, la longitud necesaria para alcanzar la resistencia requerida, es mayor, ya que los electrones circulan más libremente por el material disminuyéndose los choques. También, a medida que aumenta la temperatura, esa longitud de cable para llegar a la resistencia requerida es menor, ya que, al agitarse los electrones, los choques aumentan llegando a obtener la resistencia en una menor longitud.

A su vez, se observa que existe una relación lineal a la hora de obtener una resistencia de 100mΩ, en la que se multiplica por 100 el valor de la longitud.

Cálculo de la longitud de cable para obtener diferentes resistencias según una sección dada.

En este caso, se ha realizado para unas resistencias menores de 1Ω, ya que los valores obtenidos se multiplican linealmente por 10 a medida que se aumenta la resistencia de la misma forma y la gráfica mostraría los valores de una forma poco apreciable. La línea referente a la resistencia 0,1mΩ está referida al segundo eje.



A medida que aumenta la temperatura, la longitud de los cables disminuye para obtener esos valores de resistencia en los cables. A menor resistencia, y misma sección, menor longitud de cable.

Anexo 4. Estudio paramétrico de sensibilidad de la temperatura de la batería.

Se muestra en este análisis el estudio paramétrico de sensibilidad de la temperatura de la batería del cual se extraen las conclusiones que se muestran en el apartado 5.3.2. Permite conocer cómo afectan las diferentes variables en el proceso de carga o descarga de una batería. A continuación, se muestran las variaciones realizadas a partir de las condiciones iniciales con los resultados en datos y gráficos correspondientes.

Condiciones iniciales

Tamb (K)	Cp fluido (J/kg·K)	U (W/m ² ·K)	k fluido (W/m·K)	Rint (Ohm)
293	1012,24	4,73	0,0250	0,050
Área pila (m ²)	Masa (kg)	Cp bat (J/kg·K)	Vt (V)	Capacidad (Ah)
0,0042	0,05	1000	4	3

Área pila cilíndrica	
Diámetro	0,018 m
Altura	0,065 m
Área lateral	0,00368 m ²
Área total	0,0042 m ²

Área pila prismática	
Anchura	0,040 m
Altura	0,065 m
Grosor	0,020 m
Área lateral	0,0078 m ²
Área total	0,0094 m ²

t inicial	2526,6 s
Tbat0	296
θ inicial	3,000

$$T_{bat} = T_{amb} + \frac{R_{int} \cdot I^2}{U \cdot A}$$

$$\tau = \frac{m_{bat} \cdot Cp_{bat}}{U \cdot A}$$

$$\theta_{bat_{i+1}} = \theta_{bat_i} + \left[\frac{R_{int}}{(m \cdot Cp)_{bat}} \cdot I_{i+1}^2(t) - \frac{U_i \cdot A}{(m \cdot Cp)_{bat}} \cdot \theta_{bat_i} \right] \cdot \Delta t_{i+1}$$

Temp aire	20 °C
Temp aire	293 K
Viscosidad aire	1,57E-05 m ² /s
Conductividad aire	0,0250 W/(mK)

Prandtl	0,71 cte
Longitud caract.	0,018 Diámetro o grosor (m)

$$Ra_D = \frac{g\beta\Delta TD^3}{\nu^2} Pr \quad Ra = GrPr$$

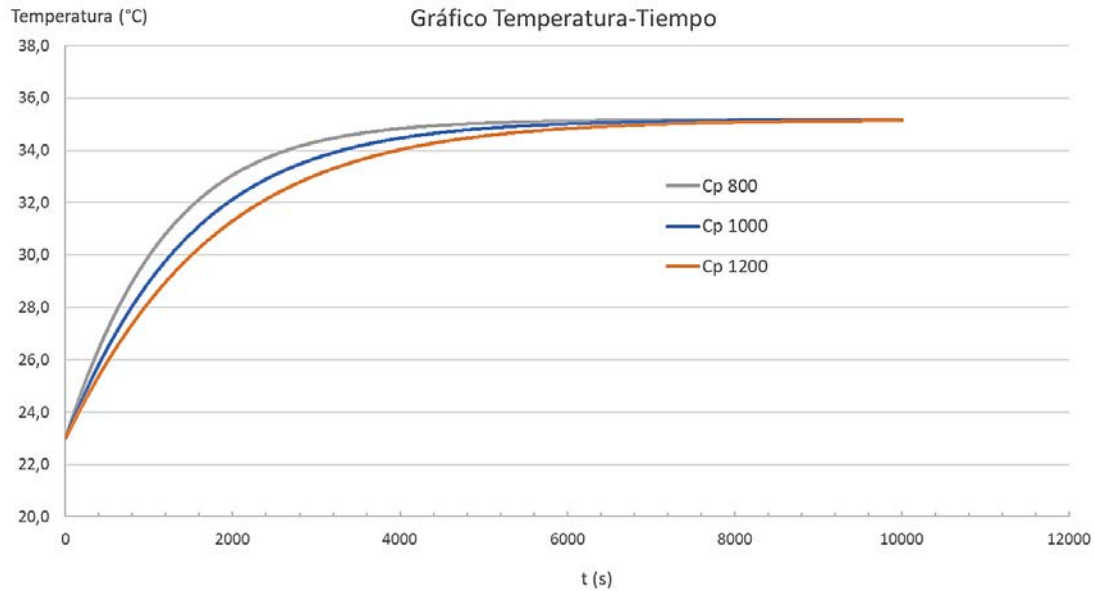
Variación Cp

Se introduce una variación del calor específico manteniendo todos los demás valores constantes.

t = 1s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Cp 800	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,01125	1703,49	3,40	4,73	2021,29	0,00148	3,01	23,01
Cp 1000	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,00900	1703,49	3,40	4,73	2526,61	0,00119	3,01	23,01
Cp 1200	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,00750	1703,49	3,40	4,73	3031,93	0,00099	3,01	23,01

t = 2000s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Cp 800	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,01125	7411,31	4,92	6,83	1399,55	0,00933	13,05	33,05
Cp 1000	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,00900	6886,40	4,83	6,71	1781,86	0,00681	12,13	32,13
Cp 1200	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,00750	6418,84	4,74	6,59	2176,15	0,00519	11,31	31,31

t = 10000s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Cp 800	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,01125	8610,53	5,11	7,09	1348,05	0,01125	15,16	35,16
Cp 1000	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,00900	8606,59	5,10	7,09	1685,25	0,00899	15,16	35,16
Cp 1200	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,00750	8595,16	5,10	7,09	2022,97	0,00748	15,14	35,14



Cp = 1200 (factor 1,2)

Aumentando el Cp bat hasta 1200, inicialmente el término de generación por Joule es bastante mayor que el de evacuación, por lo que la temperatura crece rápidamente. Pero, a medida que pasa el tiempo, durante el transitorio, el valor del término de evacuación aumenta de tal forma que el aumento de temperatura se hace más gradual, hasta que se igualan los dos términos en el estacionario, haciendo que la temperatura se estabilice. Esto es debido al aumento del coeficiente de película provocado por el aumento de temperatura de la batería.

Cp = 800 (factor 0,8)

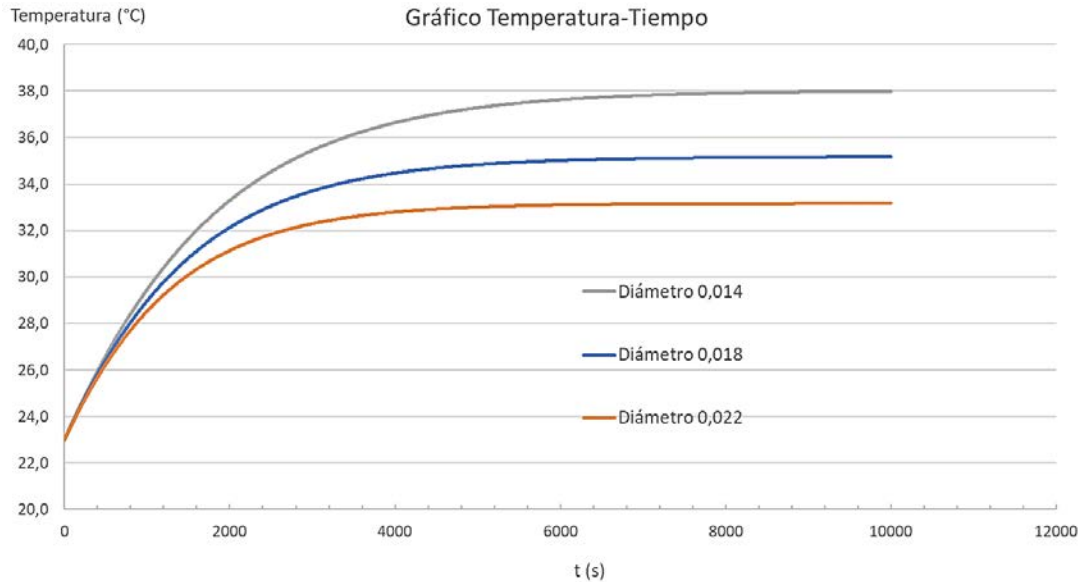
Ocurre al contrario que en el caso anterior. Al disminuir el Cp, aumenta en mayor medida el término inicial de Joule, que el de evacuación, haciendo que la temperatura de la batería sea mayor al principio, y a medida que pasa el tiempo se vaya estabilizando.

Variación Área de transmisión

En este caso hay que tener en cuenta tanto la altura, como el diámetro (si la batería es cilíndrica) o el espesor (si es prismática). El caso del espesor y diámetro es más influyente ya que, además de afectar al área que afecta directamente al Tau, al ser la longitud característica con la que se calcula el coeficiente U, también se ha de tener en cuenta.

Variando Diámetro

t = 1s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Diametro 0,014	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,00900	801,51	2,82	5,04	3135,42	0,00096	3,01	23,01
Diametro 0,018	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,00900	1703,49	3,40	4,73	2526,61	0,00119	3,01	23,01
Diametro 0,022	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,00900	3110,21	3,96	4,50	2116,38	0,00142	3,01	23,01
t = 2000s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Diametro 0,014	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,00900	3550,29	4,09	7,31	2161,25	0,00615	13,29	33,29
Diametro 0,018	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,00900	6886,40	4,83	6,71	1781,86	0,00681	12,13	32,13
Diametro 0,022	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,00900	11545,24	5,49	6,24	1524,72	0,00730	11,14	31,14
t = 10000s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Diametro 0,014	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,00900	4806,61	4,41	7,88	2003,60	0,00898	17,99	37,99
Diametro 0,018	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,00900	8606,59	5,10	7,09	1685,25	0,00899	15,16	35,16
Diametro 0,022	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,00900	13642,34	5,73	6,51	1462,41	0,00900	13,16	33,16



Diámetro = 0,022m (factor 1,2 aprox)

Se observa una temperatura menor que con las condiciones iniciales, ya que existe una mayor evacuación de calor para un mismo término de generación por Joule. El término U se ve disminuido, así como el área, lo cual lo justifica.

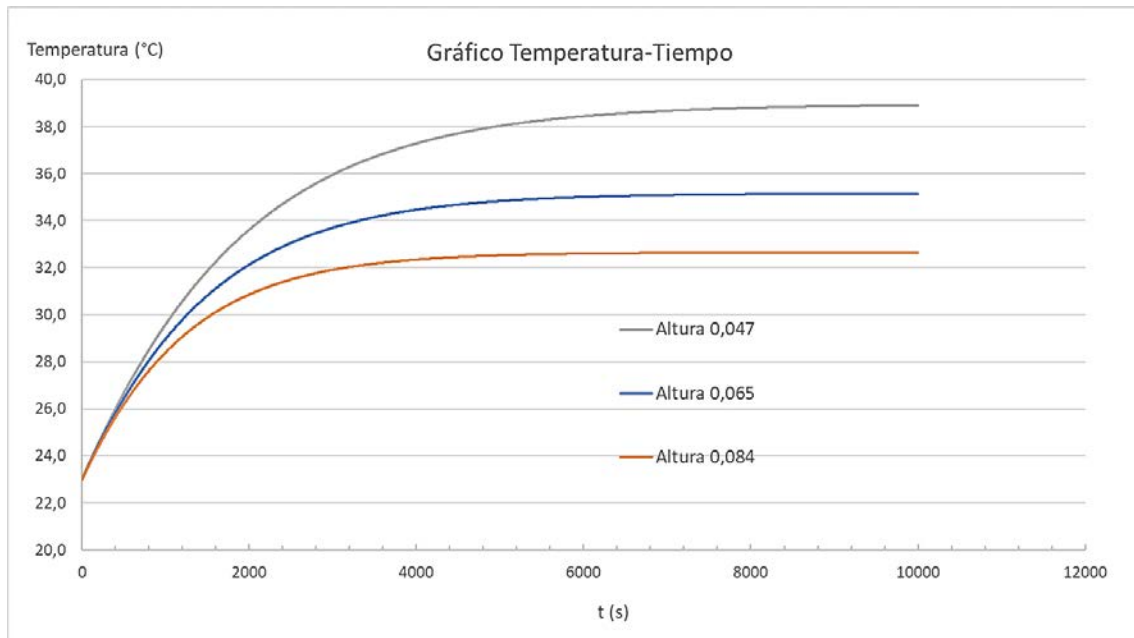
Diámetro = 0,014m (factor 0,8 aprox)

La temperatura aumenta, ya que tanto el término coeficiente de transmisión U como el área, disminuyen, con lo que la evacuación de calor es menor.

En ambos casos, en tiempos iniciales las temperaturas son más parecidas debido a que existe menor diferencia entre los U, pero a medida que avanza el tiempo, esta diferencia se va acrecentando dando lugar a las diferencias finales cuando los términos generación por Joule y evacuación de calor se igualan.

Variando altura para mismas áreas que en el caso anterior:

t = 1s	I (A)	Pot descarga	Pot I ² Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Altura 0,047	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,00900	1703,49	3,40	4,73	3338,73	0,00090	3,01	23,01
Altura 0,065	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,00900	1703,49	3,40	4,73	2526,61	0,00119	3,01	23,01
Altura 0,084	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,00900	1703,49	3,40	4,73	2014,75	0,00149	3,01	23,01
t = 2000s	I (A)	Pot descarga	Pot I ² Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Altura 0,047	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,00900	7729,87	4,97	6,90	2287,56	0,00595	13,62	33,62
Altura 0,065	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,00900	6886,40	4,83	6,71	1781,86	0,00681	12,13	32,13
Altura 0,084	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,00900	6165,06	4,70	6,52	1460,74	0,00743	10,86	30,86
t = 10000s	I (A)	Pot descarga	Pot I ² Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Altura 0,047	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,00900	10734,99	5,39	7,49	2107,25	0,00897	18,91	38,91
Altura 0,065	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,00900	8606,59	5,10	7,09	1685,25	0,00899	15,16	35,16
Altura 0,084	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,00900	7183,94	4,88	6,78	1405,94	0,00900	12,65	32,65



El término U varía mínimamente a medida que pasa el tiempo en comparación con los casos de variación del diámetro. Esto es debido a que, como se ha mencionado, la altura no es longitud característica, por lo que no afecta al término U directamente.

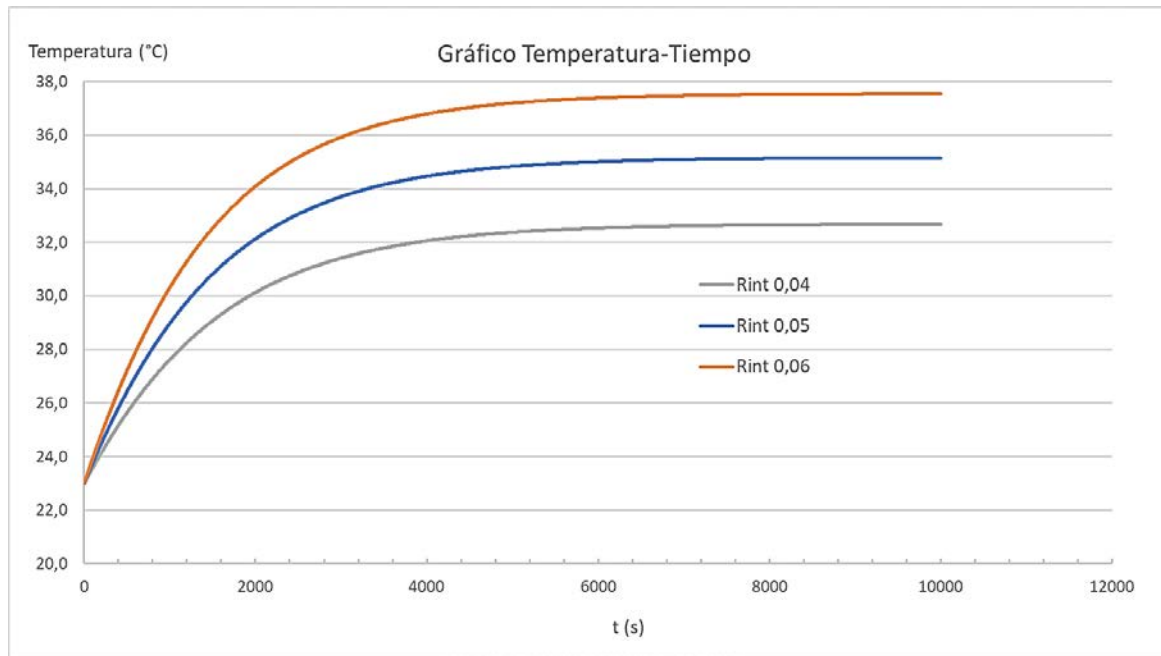
En el caso de aumentar la altura hasta 0,084m, que hace que aumente el área, el término de evacuación de calor aumenta mientras se mantiene el término de generación por Joule, ya que no le afecta el área de la pila.

A la hora de disminuir la altura a 0,047m, el área disminuye, por lo que también lo hace el término de evacuación manteniéndose constante el de generación de Joule, por lo que la temperatura asciende en mayor medida.

En ambos casos de la variación de altura, en comparación con la variación del diámetro, las temperaturas finales son mayores ya que, aunque tienen la misma área, la U es menor en el caso de la variación de altura, por lo que evacúa menos calor, y la temperatura es mayor.

Variación Rint

t = 1s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Rint 0,04	3,00	12,00	0,36	1	0,02	0,00720	1703,49	3,40	4,73	2526,61	0,00119	3,01	23,01
Rint 0,05	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,00900	1703,49	3,40	4,73	2526,61	0,00119	3,01	23,01
Rint 0,06	3,00	12,00	0,54	1	0,02	0,01080	1703,49	3,40	4,73	2526,61	0,00119	3,01	23,01
t = 2000s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Rint 0,04	3,00	12,00	0,36	2000	33,33	0,00720	5749,26	4,62	6,41	1864,10	0,00543	10,13	30,13
Rint 0,05	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,00900	6886,40	4,83	6,71	1781,86	0,00681	12,13	32,13
Rint 0,06	3,00	12,00	0,54	2000	33,33	0,01080	8000,41	5,01	6,96	1716,30	0,00821	14,09	34,09
t = 10000s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Rint 0,04	3,00	12,00	0,36	10000	166,67	0,00720	7198,31	4,88	6,78	1762,24	0,00719	12,68	32,68
Rint 0,05	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,00900	8606,59	5,10	7,09	1685,25	0,00899	15,16	35,16
Rint 0,06	3,00	12,00	0,54	10000	166,67	0,01080	9959,23	5,29	7,35	1624,86	0,01079	17,54	37,54



Rint = 60mΩ (factor 1,2)

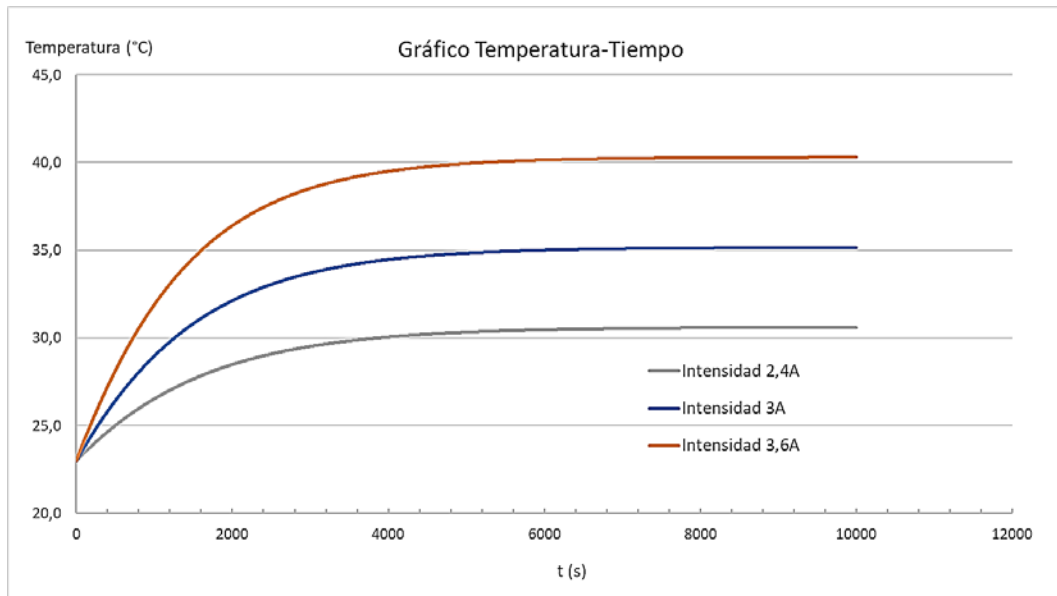
El término que se modifica principalmente en este caso es el de pérdidas de Joule ya que afecta de tal forma que, respecto de las condiciones iniciales, este valor se multiplica por el factor 1,2, haciendo que la temperatura de la batería aumente en consecuencia proporcionalmente, o casi proporcionalmente debido a la mínima variación de U.

Rint = 40 mΩ (factor 0,8)

En este caso el término de generación por Joule se divide entre 1.2 respecto al inicial, con lo que la temperatura de la batería aumenta de forma más lenta, hasta una temperatura final menor debido a su menor Rint.

Variación Intensidad

t = 1s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Intensidad 2,4 A	2,40	9,60	0,29	1	0,02	0,00576	1703,49	3,40	4,73	2526,61	0,00119	3,00	23,00
Intensidad 3 A	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,00900	1703,49	3,40	4,73	2526,61	0,00119	3,01	23,01
Intensidad 3,6 A	3,60	14,40	0,65	1	0,02	0,01296	1703,49	3,40	4,73	2526,61	0,00119	3,01	23,01
t = 2000s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Intensidad 2,4 A	2,40	9,60	0,29	2000	33,33	0,00576	4819,93	4,42	6,13	1948,10	0,00436	8,49	28,49
Intensidad 3A	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,00900	6886,40	4,83	6,71	1781,86	0,00681	12,13	32,13
Intensidad 3,6 A	3,60	14,40	0,65	2000	33,33	0,01296	9311,16	5,21	7,23	1652,42	0,00992	16,40	36,40
t = 10000s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Intensidad 2,4 A	2,40	9,60	0,29	10000	166,67	0,00576	6020,32	4,67	6,48	1842,76	0,00575	10,60	30,60
Intensidad 3A	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,00900	8606,59	5,10	7,09	1685,25	0,00899	15,16	35,16
Intensidad 3,6 A	3,60	14,40	0,65	10000	166,67	0,01296	11524,25	5,49	7,63	1566,64	0,01295	20,30	40,30



Intensidad 3,6 A (factor 1,2)

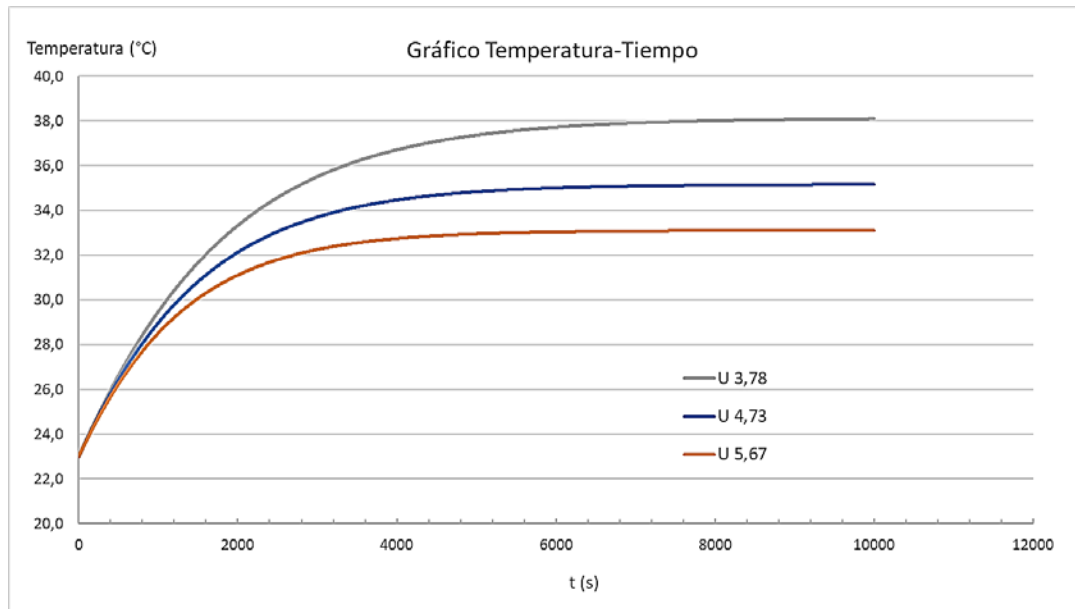
Al multiplicar la intensidad por un factor de 1,2 y estar elevada al cuadrado, las pérdidas de Joule aumentan considerablemente, con variaciones pequeñas del término de evacuación, por lo que el aumento de temperatura es muy notable, hasta los 40 grados aproximadamente. En este caso el valor del coeficiente de transmisión de calor únicamente se ve afectado por el aumento de la temperatura de la batería, y no por cualquier otro parámetro que afecte a este. La temperatura final al aumentar la corriente, aumenta consecuentemente.

Intensidad 2,4 A (factor 0,8)

Las pérdidas de Joule ahora son menores a las iniciales por lo que, la batería además de alcanzar una menor temperatura, lo hace de una forma más lenta.

Variación U

t = 1s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
U 3,78	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,00900	1703,49	3,40	3,78	3158,26	0,00095	3,01	23,01
U 4,73	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,00900	1703,49	3,40	4,73	2526,61	0,00119	3,01	23,01
U 5,67	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,00900	1703,49	3,40	5,67	2105,51	0,00142	3,01	23,01
t = 2000s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
U 3,78	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,00900	7567,13	4,94	5,49	2175,45	0,00613	13,33	33,33
U 4,73	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,00900	6886,40	4,83	6,71	1781,86	0,00681	12,13	32,13
U 5,67	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,00900	6306,88	4,72	7,87	1517,88	0,00732	11,11	31,11
t = 10000s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
U 3,78	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,00900	10274,57	5,34	5,93	2015,31	0,00898	18,09	38,09
U 4,73	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,00900	8606,59	5,10	7,09	1685,25	0,00899	15,16	35,16
U 5,67	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,00900	7441,35	4,92	8,20	1456,39	0,00900	13,10	33,10



U_{inicial} 5,67 (factor 1,2)

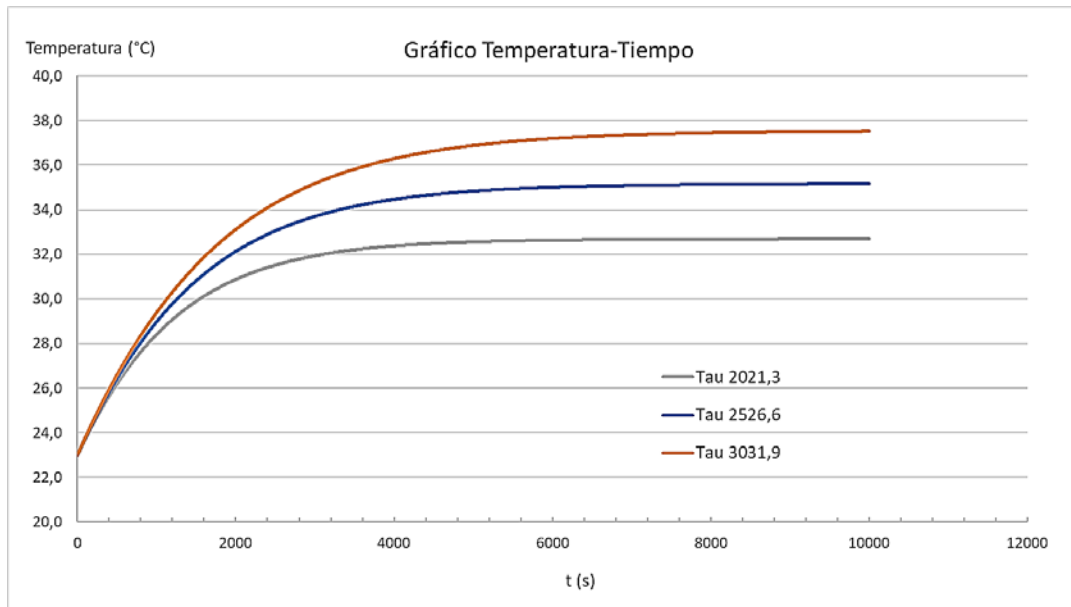
Aumentar U aumenta el término de evacuación de calor mientras que el de Joule se mantiene estable, por lo que la temperatura disminuye. Además, la temperatura final también disminuye debido a la variación el término U.

U_{inicial} 3,78 (factor 0,8)

Al contrario que en el caso anterior, el término de evacuación de calor disminuye, así como el de temperatura final debido a la reducción de la U_{inicial}.

Variación Tau

t = 1s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Tau 2021,3	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,00900	1703,49	3,40	4,73	2021,29	0,00148	3,01	23,01
Tau 2526,6	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,00900	1703,49	3,40	4,73	2526,61	0,00119	3,01	23,01
Tau 3031,9	3,00	12,00	0,45	1	0,02	0,00900	1703,49	3,40	4,73	3031,93	0,00099	3,01	23,01
t = 2000s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Tau 2021,3	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,00900	6175,49	4,70	6,53	1464,85	0,00742	10,88	30,88
Tau 2526,6	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,00900	6886,40	4,83	6,71	1781,86	0,00681	12,13	32,13
Tau 3031,9	3,00	12,00	0,45	2000	33,33	0,00900	7445,69	4,92	6,84	2096,90	0,00625	13,12	33,12
t = 10000s	I (A)	Pot descarga	Pot I2Rint	t (s)	t (min)	Término generación Joule	Ra	Nu	U	τ	Término calor perdido	Teta Caso variable (°C)	Tbat (°C)
Tau 2021,3	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,00900	7202,56	4,88	6,78	1409,58	0,00900	12,68	32,68
Tau 2526,6	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,00900	8606,59	5,10	7,09	1685,25	0,00899	15,16	35,16
Tau 3031,9	3,00	12,00	0,45	10000	166,67	0,00900	9948,11	5,29	7,35	1950,38	0,00898	17,52	37,52



Aumentando 1,2 veces Tau

No afecta a pérdidas de Joule, pero sí al término de calor perdido, con lo que aumentando tau disminuye la evacuación y con ello aumenta la temperatura de la batería.

Disminuyendo 1,2 veces Tau

Ocurre al contrario que en el caso anterior

Anexo 5. Estudio comparativo de los resultados de temperatura obtenidos experimental y teóricamente.

Como se ha indicado en el apartado 5.3.2, se muestra en este anexo el estudio comparativo completo de los diferentes resultados de temperatura obtenidos experimentalmente y los calculados con el modelo. La distribución de los experimentos es la siguiente:

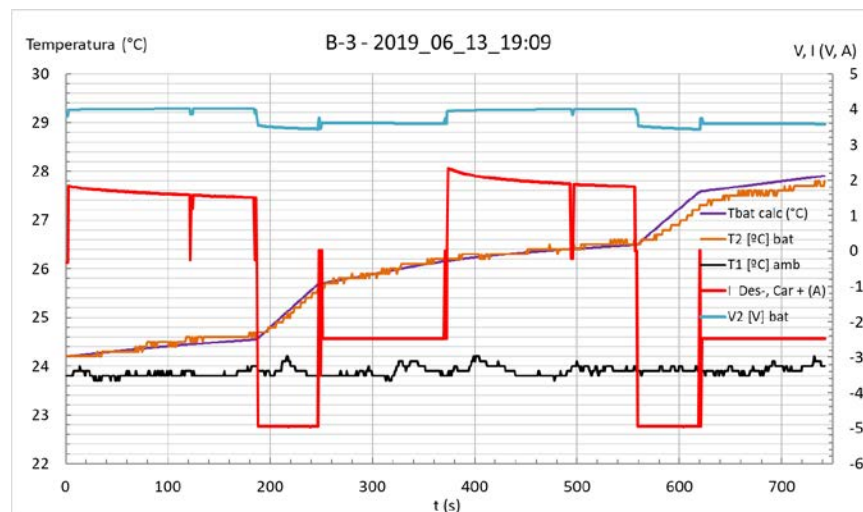
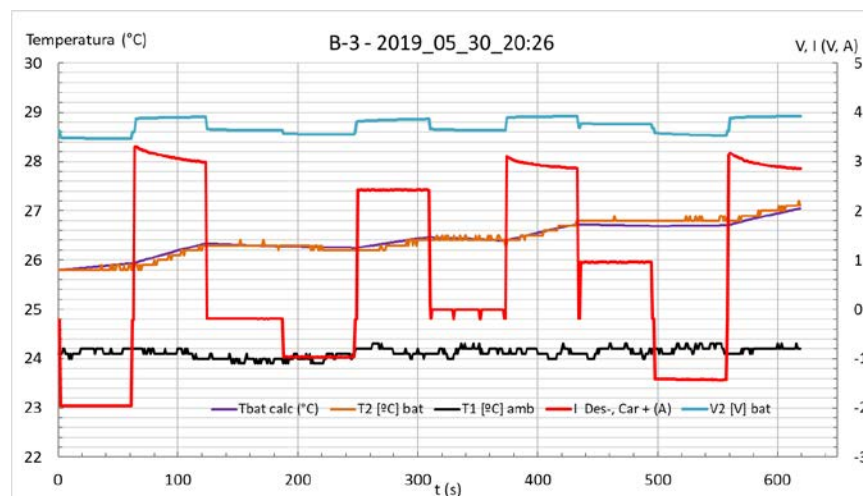
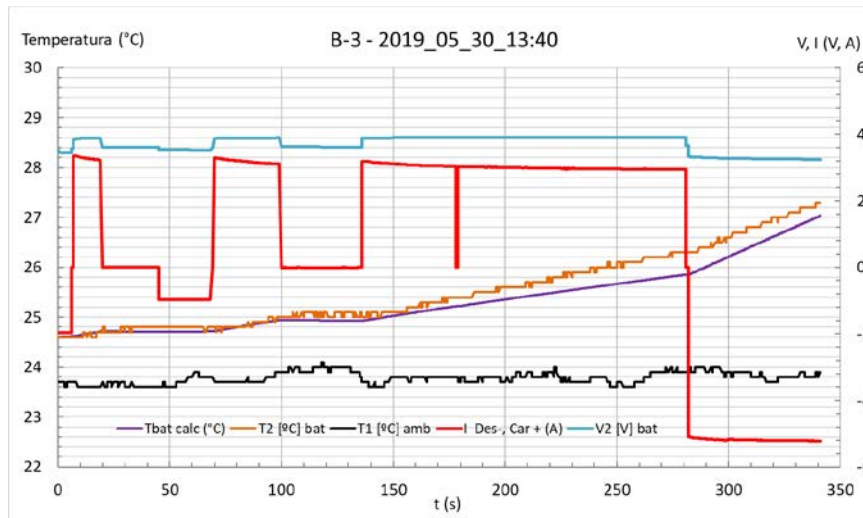
- Experimentos de carga/descarga combinada con tiempos de proceso más cortos (mayo y junio de 2019)
- Experimentos de carga (0,5C y V cte) y descarga (1C) individuales con tiempo de proceso mayor (4 de junio de 2020)
- Experimentos de carga (0,5C) y descarga (0,5C) individuales con tiempo de proceso mayor (11 de junio de 2020)

Todos ellos se han realizado con la misma batería B-3 NCR26650A Panasonic de 5000mAh de capacidad nominal. En las siguientes imágenes se adjuntan fotos de los ensayos:



Experimentos carga/descarga combinados

Se reproducen experimentos de cortos periodos de tiempo en el que se combinan cargas y descargas con situaciones en circuito abierto. En todos los casos se parte de que la temperatura de la batería es superior a la temperatura ambiente.



En las fases de carga (intensidad por encima de 0A) se observa que la intensidad va decreciendo, y esto se debe a que el proceso se encuentra en la fase de tensión constante en el que la batería ya ha llegado a su máxima tensión, con lo que se produce una disminución de la intensidad para alcanzar el SOC máximo y no estresar la batería. La temperatura en estos casos de carga aumenta. En las fases de intensidad 0A se observa que la tensión permanece constante y la temperatura de la batería

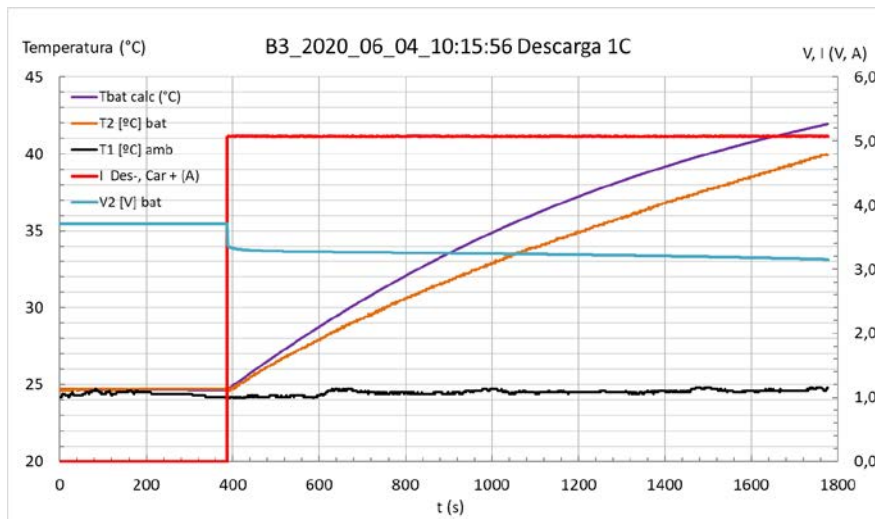
disminuye mínimamente para los tiempos de proceso utilizados, tanto en la temperatura calculada como en la medida. En las fases de descarga, se produce un descenso de la tensión debido a la disminución del estado de carga SOC, y es mayor cuanto mayor es la corriente de descarga. En los casos en los que las intensidades son mayores, el aumento de temperatura de la batería consecuentemente es mayor.

Los saltos de tensión en los momentos en los que la intensidad pasa de cero amperios a algún valor, o de algún valor a cero amperios, son debidos a que cuando no existe corriente, la tensión está midiéndose en circuito abierto, por lo que no afecta la resistencia interna de la batería. Esto hace que, en los procesos de carga, la V_t sea mayor que la V_{oc} , y en los procesos de descarga, la V_{oc} sea mayor que la V_t , con lo que, en los primeros, al inicio del proceso se producirá un salto hacia mayor tensión, y en los segundos, un salto a una menor tensión. Y cuando finalice ese proceso hacia una intensidad de cero amperios ocurra al revés.

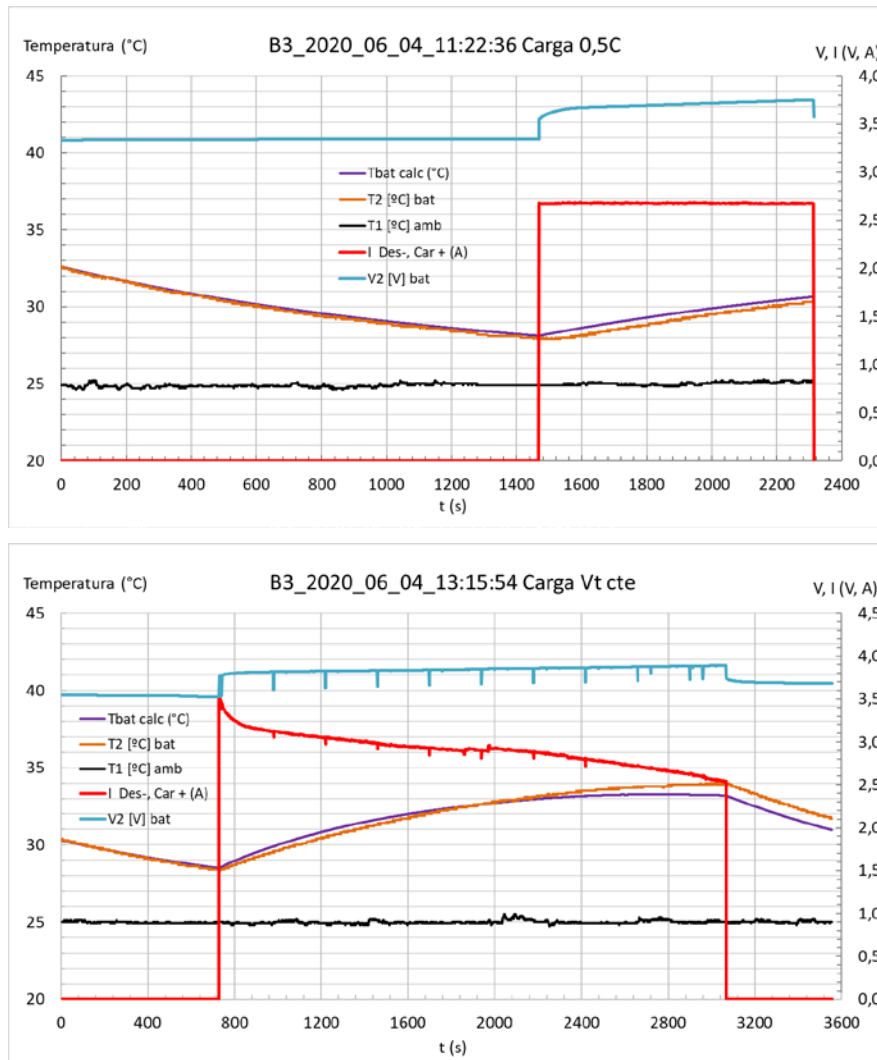
Los periodos utilizados son cortos y en algunos momentos no se puede apreciar correctamente el desarrollo de las tensiones o temperaturas, pero se puede observar que la temperatura calculada con el modelo sigue de manera fiel la temperatura medida por medio de los termopares,

Experimentos carga (0,5C y V constante) y descarga (1C) individuales

En este caso los experimentos se realizan durante un tiempo más largo, y en estos solo se utiliza un proceso, o bien la carga o bien la descarga a partir de una situación de circuito abierto. En el caso de la descarga a 1C, se puede observar que la temperatura inicial de la batería coincide prácticamente con la temperatura ambiente, mientras que, en los otros dos casos, la temperatura de superficial de la batería es bastante mayor que la ambiente debido a que procede de otro proceso de carga o descarga anterior.



En el **ensayo de descarga** a 1C, inicialmente la corriente es cero y por ello la temperatura se mantiene prácticamente constante ya que es similar a la temperatura ambiente y la transmisión de calor es prácticamente inapreciable. Sin embargo, cuando se inicia la descarga a 5A, se observa que el aumento de la temperatura es bastante mayor que los casos de las cargas a 0,5C o de intensidad decreciente. Esto es debido al término de generación de calor por efecto Joule en los que interviene la resistencia interna de la batería y la intensidad. A mayor intensidad, suponiendo resistencia constante, mayor generación de calor, con lo que mayor temperatura de la batería, a pesar de que aumente el coeficiente de película.



Por otro lado, en los **ensayos de carga**, el gráfico muestra que cuando la intensidad es cero, debido a que la temperatura de la batería es bastante mayor que la ambiente, existe un proceso de enfriamiento de esta por convección natural hasta que se inicia el proceso de carga.

También, se puede observar de mejor manera que en los ensayos combinados, en la activación de los procesos, se producen esos saltos de tensión. Y en la desactivación del proceso (ensayo a tensión constante) existe una pequeña relajación de la batería, en el que la batería después de haber sido cargada, experimenta un decremento de la tensión hasta que se estabiliza a una tensión constante. Es por ello que cuando en el proceso de carga la batería ha alcanzado la tensión constante determinada, se va reduciendo la corriente, para que obtenga el 100% del SOC y provocar que la batería no se estrese.

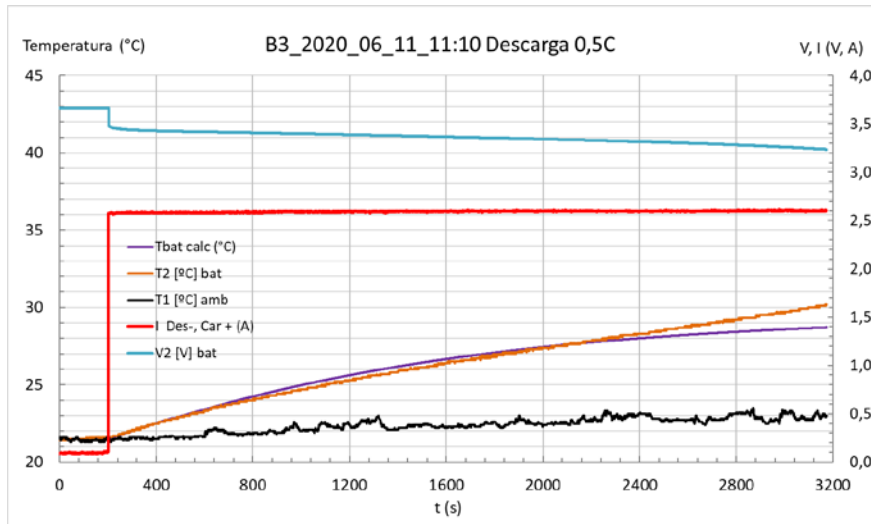
También se observa en el último ensayo, que a medida que se reduce la intensidad la temperatura crece en menor medida.

Experimentos carga (0,5C) y descarga (0,5C) individuales

Se producen experimentos similares al caso anterior.

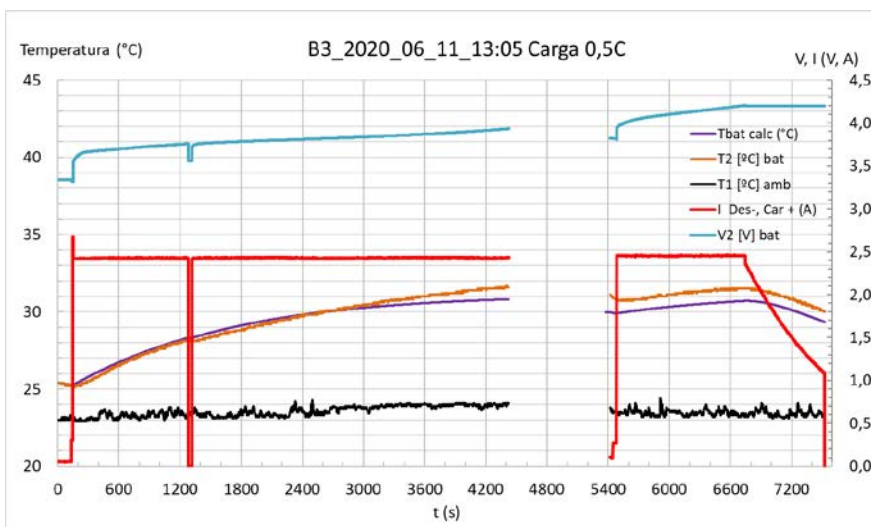
En el primero, descarga a 0,5C, se observa que la tensión de la batería decrece a la vez que la temperatura aumenta. Cabe a destacar que, en este caso, a diferencia con la descarga a 1C ensayada anteriormente, la temperatura crece de una forma mucho menor en la batería a pesar de que el tiempo de ensayo es más prolongado. De ahí que se haya de tener mucho cuidado y control en las intensidades de carga y descarga, que afectan grandemente a las temperaturas y con ello a la seguridad de la batería.

En este caso también parece ser más fiel el seguimiento de la temperatura, y esto puede deberse a la dificultad de calcular el coeficiente de película dinámico de forma analítica. En la parte final, pasa de que la temperatura calculada es mayor que la experimental, a ser menor, y esto es debido a que el coeficiente de película es mayor que el real, suponiendo que la resistencia interna y el Cp fueran los correctos.



En este segundo **ensayo de carga a 0,5C**, existe un lapso de tiempo en el que el programa dejó de tomar datos, por lo que se muestra ese hueco.

Inicialmente evoluciona de igual manera que en el caso de carga anterior, aumentando la tensión de la batería, pero ahora en este caso, se puede observar que en un cierto momento (sobre el segundo 6200) la intensidad decrece, y eso es debido a que se ha alcanzado el nivel de tensión máxima de la batería, y se pasa a la fase de tensión constante de la carga. Finalmente, esta carga no llega a completarse del todo ya que, para ello, la intensidad debería llegar a 0,02C establecidos en el programa, y en este caso se ha interrumpido antes llegar a ese momento. Se observa de igual manera que la línea de temperatura calculada sigue de forma similar la curva de la experimental.



Anexo 6. Resultados y análisis del programa de carga y descarga de baterías.

En este anexo se muestran y se analizan los resultados obtenidos mediante el programa de carga y descarga. Estos resultados son fruto de diversas simulaciones en las cuales se varían algunos de los parámetros de las baterías con el fin de observar cómo afectan.

Anexo 6.a. Programa de descarga

CONDICIONES INICIALES DE REFERENCIA

Programa de Descarga Batería Li-ión
 Seleccione los parámetros de entrada empezando por el tipo de batería (desplegable) y el resto de parámetros y variables iniciales y finales del proceso. Tras cada cambio, SIEMPRE ES NECESARIO Pulsar "INICIAR"

Curva escalada a Chen 2006: NO Componentes escalados: NO

INICIAR

Batería: B: NCR26650A Grado del Polinomio: 7 SOC de parada: 0% SOH: Reduce la Qnom y aumenta Rint

SOC inicial: 100% Elementos serie: 1 S Resistencia cableado: 0 SOHc: 100% Reduce la Qnom

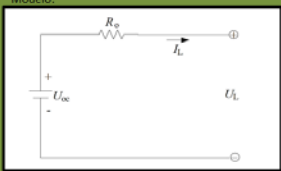
Corriente en C: 1 Elementos paralelo: 1 P Salto de tiempo: 2,78E-04 h SOHr: 100% Aumenta la Rint
 $I_s = 2.778E-04$ h

B: NCR26650A	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	0,00	0,00	101,46	-316,29	883,75	-236,59	81,49	-17,89	8,24	3,04

Cap. Nom. Celda: 5000 mAh R. Int. Nom: 30 mΩ I desc celda: 5 A
 Capacidad pack: 5000 mAh Rint pack+Cal: 30 mΩ I desc pack: 5 A
 V. nominal pack: 3,7 V V. máx. pack: 4,2 V V. mín. pack: 2,6 V

Coefficientes de escalado
 Vbat/Vref
 Qref/Qbat
 C. A-E

Modelo:



Cálculo Temperatura batería	
θini	0,0 K
Tamb	298 K
Tbat ini	298 K
U:	2,0 W/(m2.K)
Cp:	1.000 J/(kg.K)
Tau:	7.192,6 s
Masa:	0,094 kg
Área:	0,0065 m2

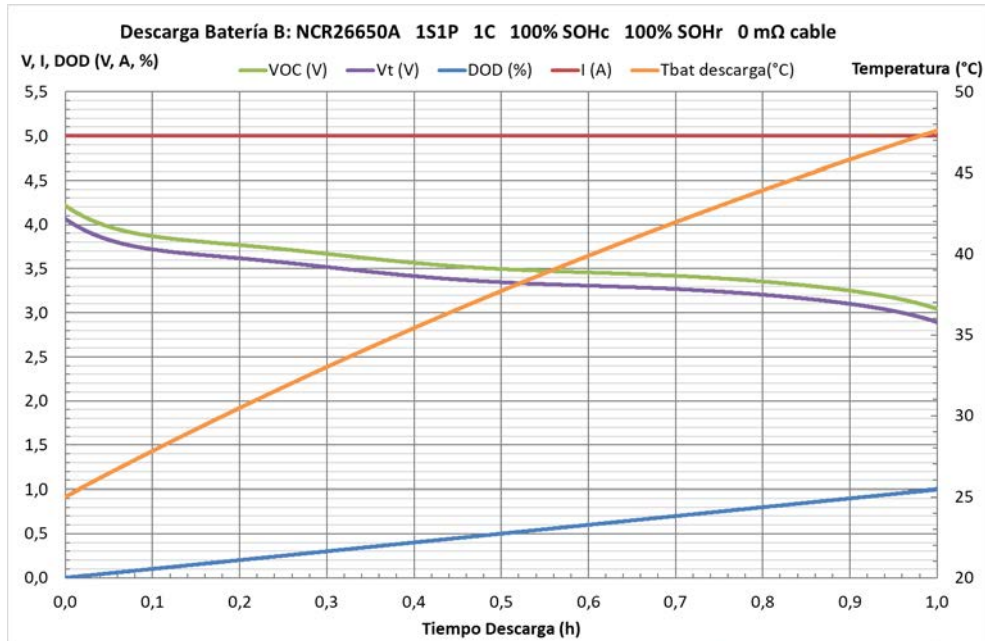
DESCARGA NORMAL (0%DOD-100%DOD) BATERÍA 26650 5000mAh 100%SOH 1C

Se realiza una simulación de **descarga total** de una batería 26650, es decir, del 0% del DOD se pasa al 100% del DOD, con una intensidad de 5A (1C), con lo cual, el proceso de descarga tardaría en condiciones ideales una hora.

Se parte de 4,216V (tensión correspondiente al cálculo polinomial para 0%DOD) en circuito abierto hasta 3,043V, es decir del 100% del SOC al 0% del SOC. Sin embargo, la V_t de la batería comienza en 4,066V y finaliza en 2,893V, y esta disminución de la tensión se debe, como se ha dicho en anteriores apartados, al efecto de la resistencia interna al paso de corriente. Se puede observar también que, para una temperatura inicial de 25°C, y supuesta una misma temperatura ambiente, el aumento de temperatura es grande debido a la generación de calor por Joule, pasando de 25°C a 47,6°C.

Todo ello se muestra en el gráfico siguiente. Se adjunta además una tabla con los valores considerados más relevantes para una fácil comparativa.

Tiempo proceso	V_{oc} inicial (V)	V_{oc} final (V)	V_t inicial (V)	V_t final (V)	T^a inicial (°C)	T^a final (°C)	$\eta_{descarga}$ (%)
1h	4,216	3,043	4,066	2,893	25,0	47,6	95,58

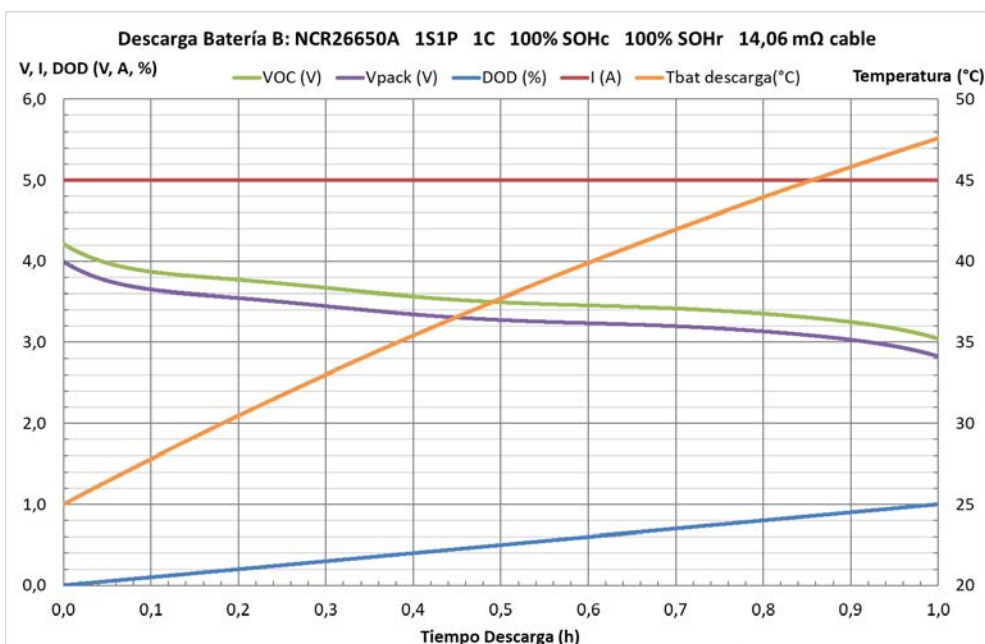


EFFECTOS DE DISTINTAS VARIABLES DE LA BATERÍA Y SUS CONEXIONES

RESISTENCIA CABLEADO

Suponiendo un cableado de 2 metros y sección 2,5mm² a 25°C → 14,06 mΩ

Tiempo proceso	V _{oc} inicial (V)	V _{oc} final (V)	V _t inicial (V)	V _t final (V)	T ^a inicial (°C)	T ^a final (°C)	n _{descarga} (%)
1h	4,216	3,043	3,995	2,823	25,0	47,6	93,37

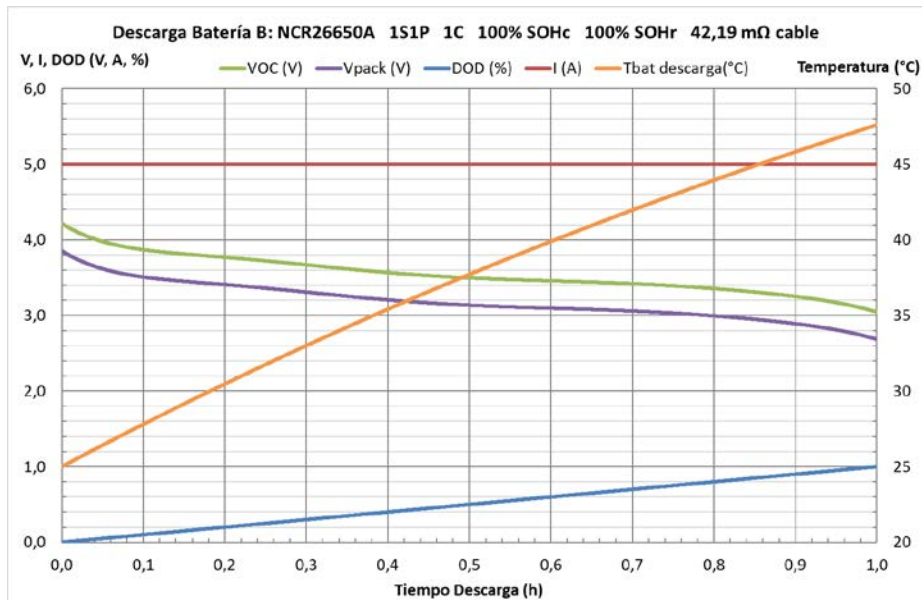


Al aumentar la resistencia de cableado, aumenta la caída de tensión en bornes de la carga (V_t), pero los demás parámetros de la batería se mantienen constantes. La temperatura de la batería no se ve afectada ya que la R_{int} de la batería permanece constante y la corriente también. Destacar que se produce una pérdida de rendimiento de aproximadamente un 2% debido a la caída de potencial en los cables.

Suponiendo cableado de 6 metros y sección 2,5mm² a 25°C → 42,19 mΩ

En este caso se triplica la longitud del cableado, y con ello la resistencia ya que es directamente proporcional.

Tiempo proceso	Voc inicial (V)	Voc final (V)	Vt inicial (V)	Vt final (V)	T ^a inicial (°C)	T ^a final (°C)	ηdescarga (%)
1h	4,216	3,043	3,855	2,683	25,0	47,6	88,66



Se observa ahora que la diferencia entre la Voc y la Vt es mayor que en las dos anteriores, corroborándose la influencia de la resistencia de cableado, mientras los demás parámetros de la gráfica permanecen igual. El rendimiento de descarga, considerando el cableado, de la misma forma disminuye.

ESTADO DE SALUD DE LA BATERÍA SOH

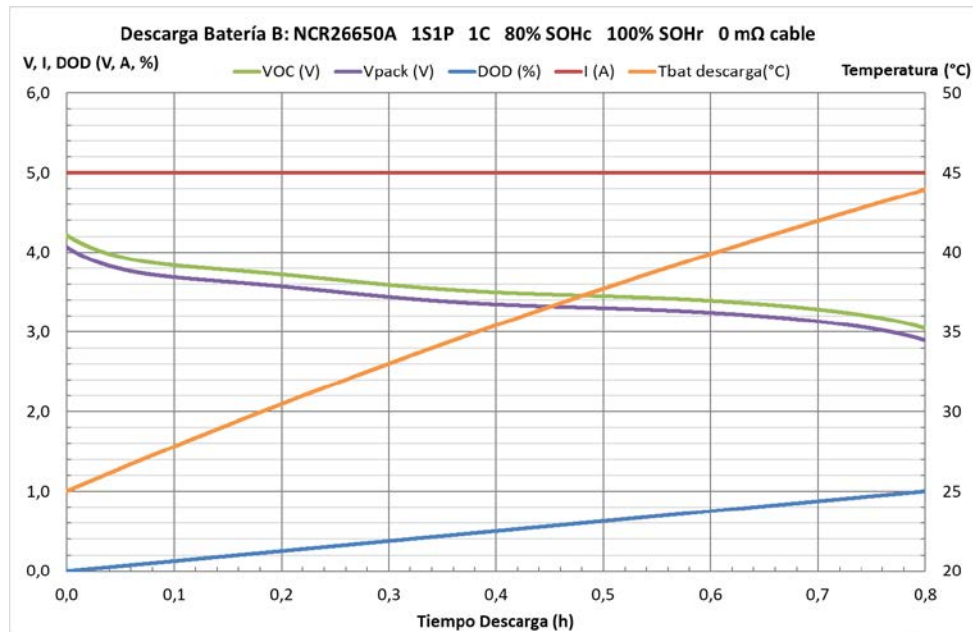
En este caso, la herramienta dispone de dos formas de modificar el estado de salud SOH de la batería. El primero de ellos es modificar la capacidad de la batería (SOHc) disminuyéndola, y el segundo de ellos es modificando la Rint de la batería (SOHr). Todo ello, asemejándolo a un envejecimiento de la batería por un gran número de ciclos de carga, pasivización, o una incorrecta utilización de la batería (altas temperaturas, sobrecargas y sobredescargas...).

SOHc

Suponiendo un SOHc del 80% respecto al nominal de 5000mAh → Capacidad = 4000mAh → 1C

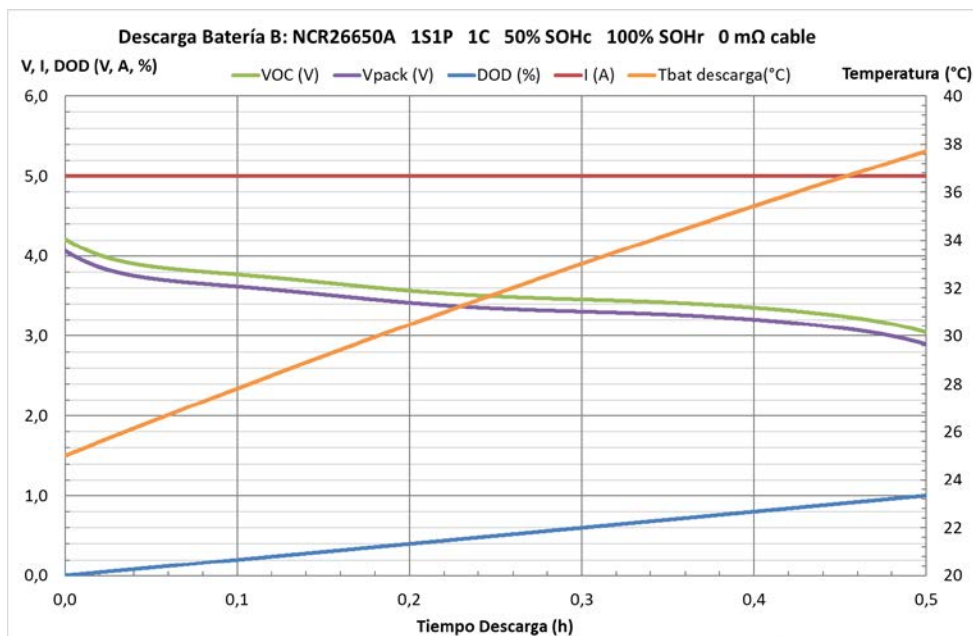
Tiempo proceso	Voc inicial (V)	Voc final (V)	Vt inicial (V)	Vt final (V)	T ^a inicial (°C)	T ^a final (°C)	ηdescarga (%)
0,8h	4,216	3,043	4,066	2,893	25,0	43,9	95,58

En este caso, debido al envejecimiento la capacidad de la batería pasa a ser de un 80%, es decir, 4000mAh. Esto hace que la cantidad de energía aportada sea menor, ya que la batería, descargándola a 1C, se descarga en 0,8 horas, un 20% más rápido. Su temperatura final también es menor debido a que se descarga durante menos tiempo y por tanto la generación de calor es menor. El rendimiento del proceso en sí mismo no se ve afectado.



Suponiendo un SOHc del 50% respecto al nominal de 5000mAh → Capacidad = 2500mAh → 1C

Tiempo proceso	Voc inicial (V)	Voc final (V)	Vt inicial (V)	Vt final (V)	T ^a inicial (°C)	T ^a final (°C)	ηdescarga (%)
0,5h	4,216	3,043	4,066	2,893	25,0	37,7	95,58



Al igual que en el caso anterior, al reducir al 50% el SOHc, se reduce un 50% la capacidad de la batería, con la que ésta, puesto que se le aplica una corriente de descarga de tasa 1C, se descarga en media hora, y su temperatura asciende menos debido a que se descarga durante menos tiempo. Los demás valores no se ven afectados.

El principal problema de la reducción del SOHc se da en que, la batería aporta menor cantidad de energía, y con ello un vehículo eléctrico, para un mismo requerimiento de intensidad (potencia) vería una disminución de su autonomía. En caso de que la intensidad requerida fuera menor, esta batería podría suministrar energía durante mayor tiempo.

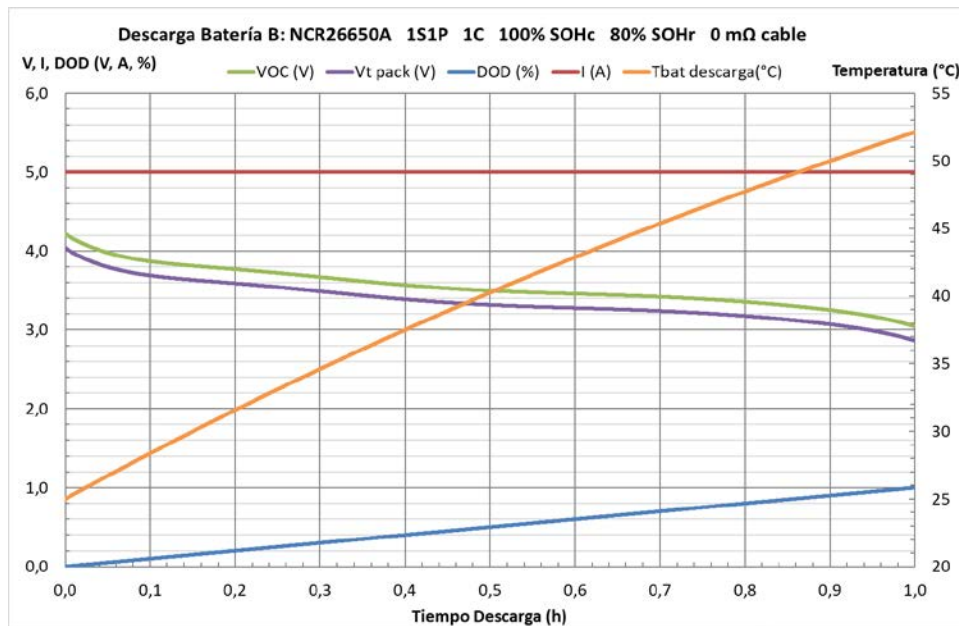
SOHr

Suponiendo un SOHr del 80% respecto a la nominal de $30\text{ m}\Omega \rightarrow R_{int} = 36\text{m}\Omega$

En este caso, suponer un SOHr del 80%, significa que la resistencia interna de la batería aumenta un 20%, y esto se ve reflejado en la tensión en bornes de la batería, que disminuye debido a la caída de potencial provocada por el paso de corriente por la batería con ese aumento de la R_{int} . Debido a ello, también aumenta la generación de calor por Joule, haciendo que la temperatura final de la batería aumente respecto al valor "habitual" (descarga normal). El rendimiento de la descarga también se ve afectado ya que la tensión en bornes disminuye por el aumento de R_{int} .

Se puede ver, que en este caso la temperatura de la batería sí que aumenta, y en el caso del aumento de la resistencia del cableado no. Esto se debe a que la R_{int} afecta a la batería y la $R_{cableado}$ solo afecta al cableado. Sí es cierto que el cableado sufre un aumento de temperatura debido al paso de corriente y a su aumento de resistencia, pero en este trabajo no se ha tenido en cuenta.

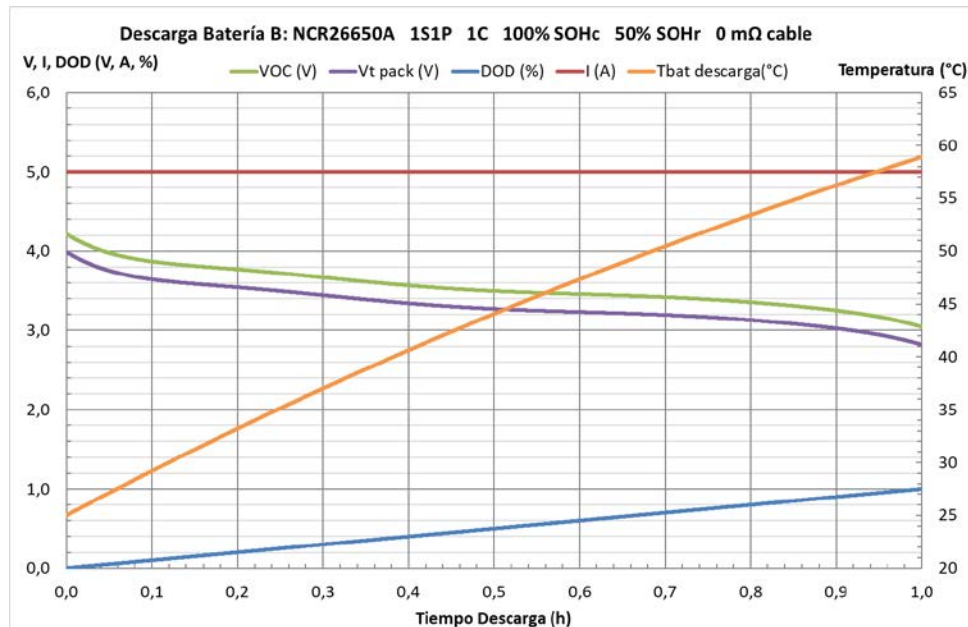
Tiempo proceso	Voc inicial (V)	Voc final (V)	Vt inicial (V)	Vt final (V)	Tª inicial (°C)	Tª final (°C)	$\eta_{descarga}$ (%)
1h	4,216	3,043	4,036	2,863	25	52,1	94,65



Suponiendo un SOHr del 50% respecto a la nominal de $30\text{ m}\Omega \rightarrow R_{int} = 60\text{m}\Omega$

Se produce un aumento de R_{int} hasta el doble de su R_{int} inicial.

Tiempo proceso	Voc inicial (V)	Voc final (V)	Vt inicial (V)	Vt final (V)	Tª inicial (°C)	Tª final (°C)	$\eta_{descarga}$ (%)
1h	4,216	3,043	3,991	2,818	25	58,9	93,22



De forma similar al anterior ensayo, la diferencia de tensión entre bornes y circuito abierto aumenta, y con ello descende el rendimiento de la descarga. Además, la temperatura sufre un mayor aumento, pudiendo causar problemas en la batería.

CONFIGURACIÓN SERIE/PARALELO

En este apartado se ha realizado una comparativa entre diferentes configuraciones serie paralelo, para observar cómo afecta esta variación respecto a los parámetros I, Rint, Voc, Vt, temperatura y rendimiento de descarga. Los parámetros iniciales son los mismos que en el ensayo de descarga normal, pero con la configuración de baterías correspondientes, y la temperatura calculada para una sola celda.

Config	Tiempo proceso	I (A)	Rint (Ω)	Voc inicial (V)	Voc final (V)	Vt inicial (V)	Vt final (V)	Tª final (°C)	ηdescarga (%)
1S1P	1h	5	0,03	4,216	3,043	4,066	2,893	47,6	95,58
2S1P	1h	5	0,06	8,431	6,807	8,131	5,787	47,6	95,58
1S2P	1h	10	0,015	4,216	3,043	4,066	2,893	47,6	95,58
4S1P	1h	5	0,12	16,862	12,174	16,262	11,574	47,6	95,58
1S4P	1h	20	0,0075	4,216	3,043	4,066	2,893	47,6	95,58
2S2P	1h	10	0,03	8,431	6,087	8,131	5,787	47,6	95,58

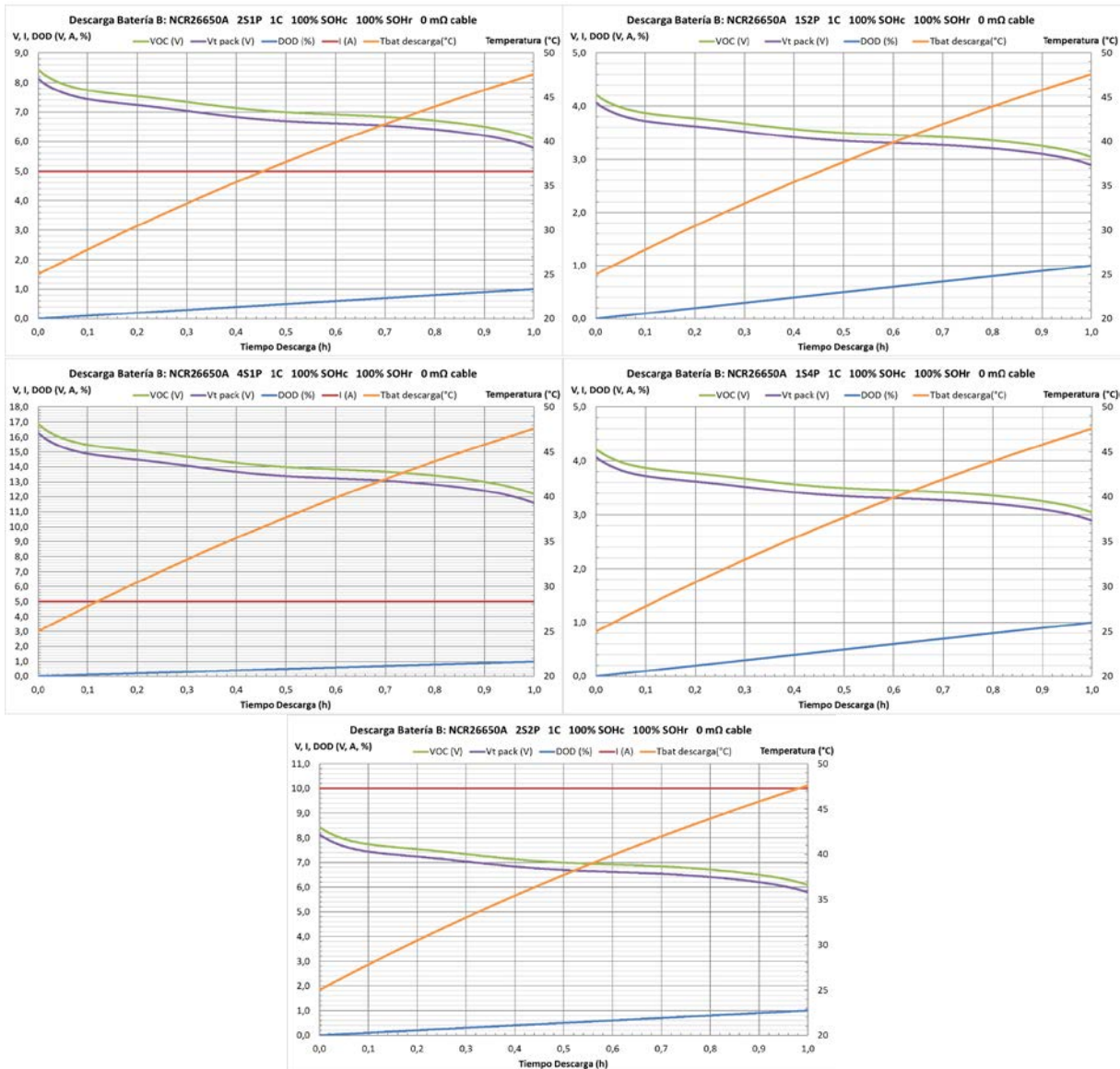
En estos casos, como puede verse en la tabla, lo que cambia son las intensidades, resistencias internas (del módulo) y las tensiones del módulo. La temperatura de la batería se calcula para una única batería, y los rendimientos son los mismos en todos los casos.

Para los casos de celdas en serie y ninguna en paralelo, la intensidad que circula por las mismas es la de descarga normal. Sin embargo, el módulo ve incrementada su resistencia interna, ya que estas resistencias se suman, al igual que lo hacen las tensiones.

En el caso de asociar las celdas en paralelo y ninguna en serie, se obtiene una suma de las corrientes de cada una de las ramas para el módulo, y una resistencia interna combinada, mientras que las tensiones permanecen constantes (iguales a las de una celda)

Por último, en caso de asociar más de una en serie y paralelo, se produce una combinación en que las corrientes son la suma de las ramas en paralelo, las resistencias una combinación entre la suma de las resistencias y su resultado posterior del paralelo, y las tensiones son la suma de las tensiones de

baterías en serie para una rama. Todo esto, suponiendo que las celdas se encuentren perfectamente balanceadas y equilibradas.



INTENSIDAD DE DESCARGA

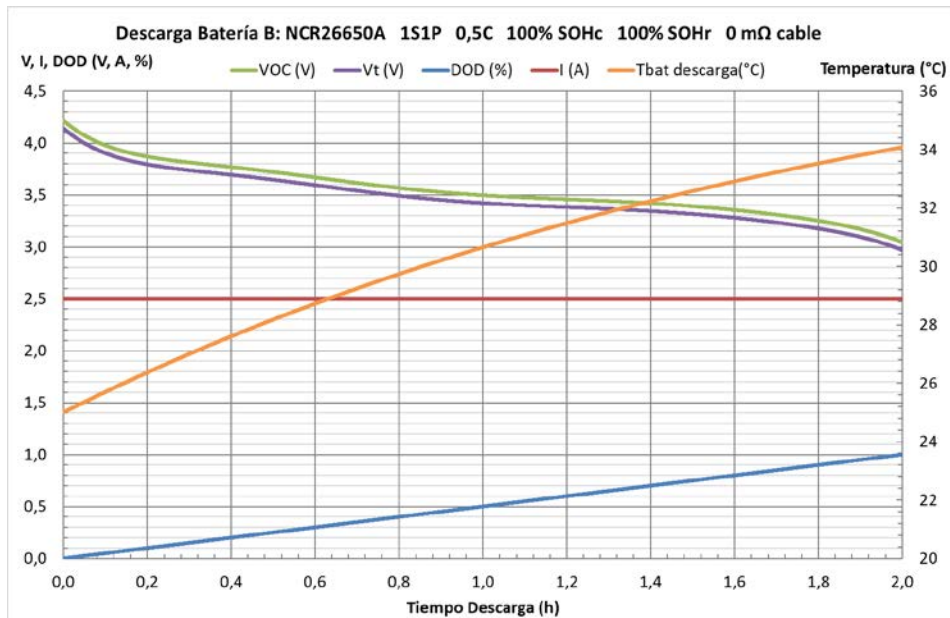
Se realizan dos variaciones de la intensidad de descarga 0,5C y 3C para analizar cómo afectan respecto a la descarga normal a 1C.

Descarga a 0,5C (2,5A)

El hecho de reducir la intensidad de descarga, hace que la batería se descargue nominalmente en 2 horas. También, puesto que la intensidad es menor, la diferencia entre la tensión de circuito abierto y la de terminales es menor, ya que la caída producida por la R_{int} es menor al pasar menos corriente. Esta menor diferencia entre tensiones hace que el rendimiento de descarga de la batería sea mayor.

Además, reducir la corriente de descarga provoca que el calor generado por efecto Joule sea menor y consecuentemente la temperatura final de la batería aumente en menor proporción que en el caso 1C.

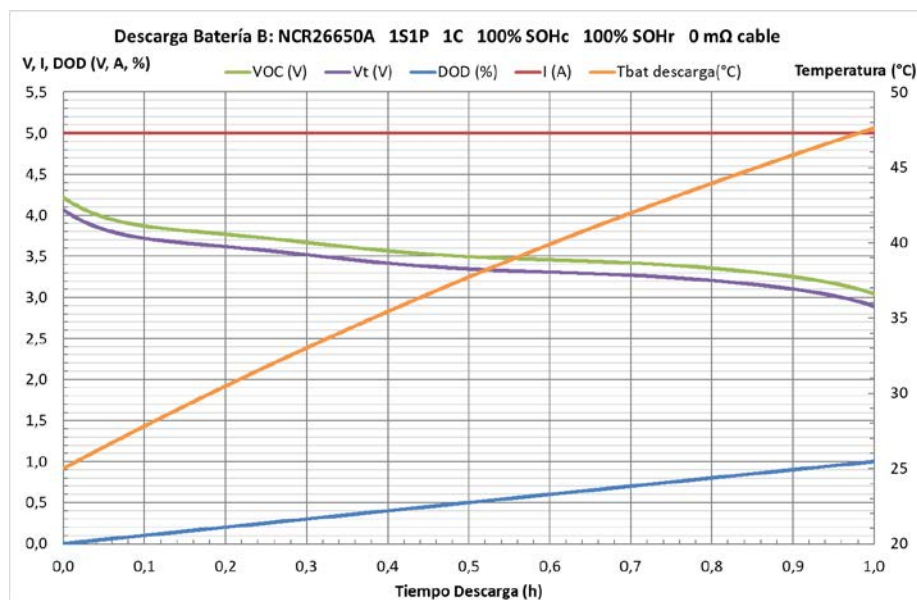
Tiempo proceso	Voc inicial (V)	Voc final (V)	Vt inicial (V)	Vt final (V)	T ^a inicial (°C)	T ^a final (°C)	ηdescarga (%)
2h	4,216	3,044	4,141	2,969	25	34,1	97,84



Descarga a 1C (5A)

Se muestran los resultados para la descarga a 1C.

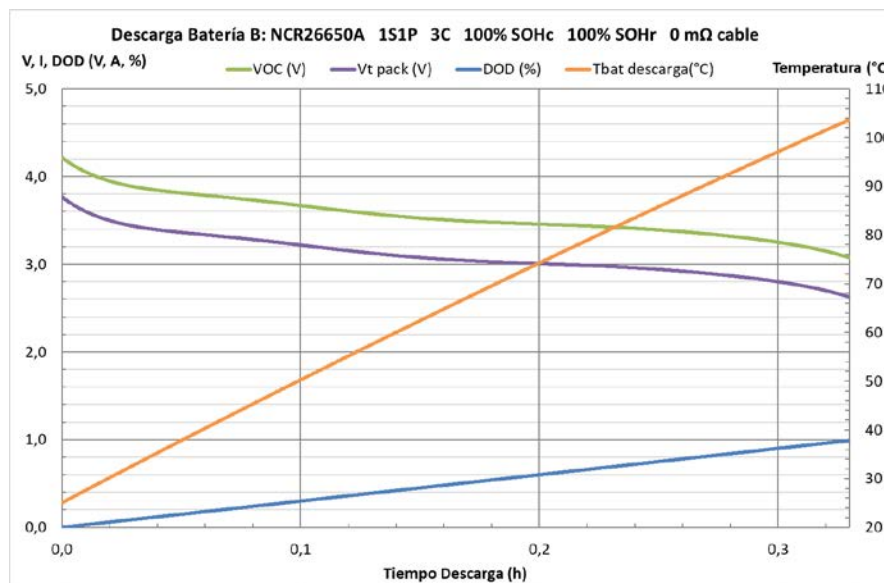
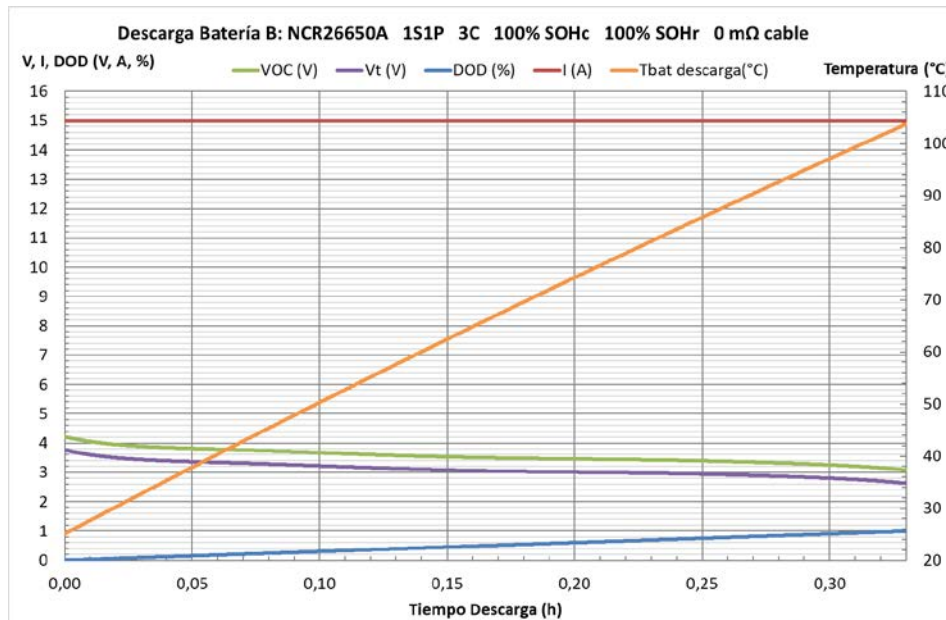
Tiempo proceso	Voc inicial (V)	Voc final (V)	Vt inicial (V)	Vt final (V)	Tª inicial (°C)	Tª final (°C)	η descarga (%)
1h	4,216	3,043	4,066	2,893	25	47,6	96,3



Descarga a 3C (15A)

Al contrario que en el caso de 0,5C, ahora la intensidad de descarga es mayor, con lo que la caída de tensión por efecto de la resistencia interna es bastante mayor, y esto provoca unos malos rendimientos de descarga de la batería. También el calor generado es mucho mayor, alcanzándose temperaturas muy altas de la batería que pueden llegar a ser perjudiciales. El tiempo de descarga de la batería disminuye en este caso a un tercio.

Tiempo proceso	Voc inicial (V)	Voc final (V)	Vt inicial (V)	Vt final (V)	Tª inicial (°C)	Tª final (°C)	η descarga (%)
0,33h	4,216	3,025	3,766	2,6	25	104,3	85,46

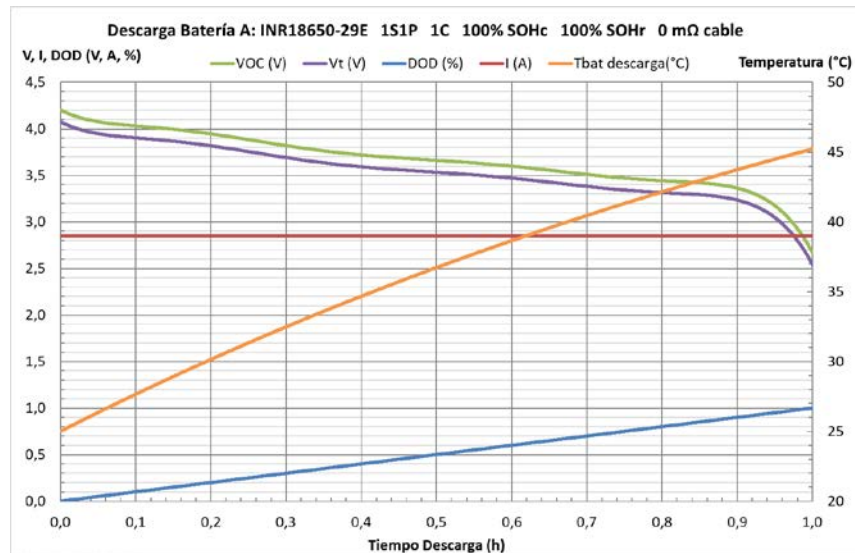


El hecho de poder proporcionar mayor cantidad de intensidad, hace que aumente la potencia que es capaz de suministrar la batería, y esto va en pro de la aceleración del vehículo. Pero este hecho, hace que la batería se descargue antes, disminuyendo la autonomía del vehículo, de forma análoga a como lo hace un vehículo de combustión, a mayor grado de carga, mayor potencia, pero antes se acaba la gasolina. En caso de utilizar una tasa de corriente inferior, beneficia a la autonomía perjudicando la potencia.

DESCARGA NORMAL (0%DOD-100%DOD) BATERÍA AZUL INR 18650 2850mAh 100%SOH 1C

Ahora se muestran los resultados obtenidos para otra celda disponible. En este caso, se trata de una celda de menor tamaño 18650 y menor capacidad 2850 mAh, con una mayor resistencia interna (45 mΩ).

Tiempo proceso	Voc inicial (V)	Voc final (V)	Vt inicial (V)	Vt final (V)	T ^a inicial (°C)	T ^a final (°C)	ηdescarga (%)
1h	4,203	2,669	4,075	2,540	25	45,2	96,37



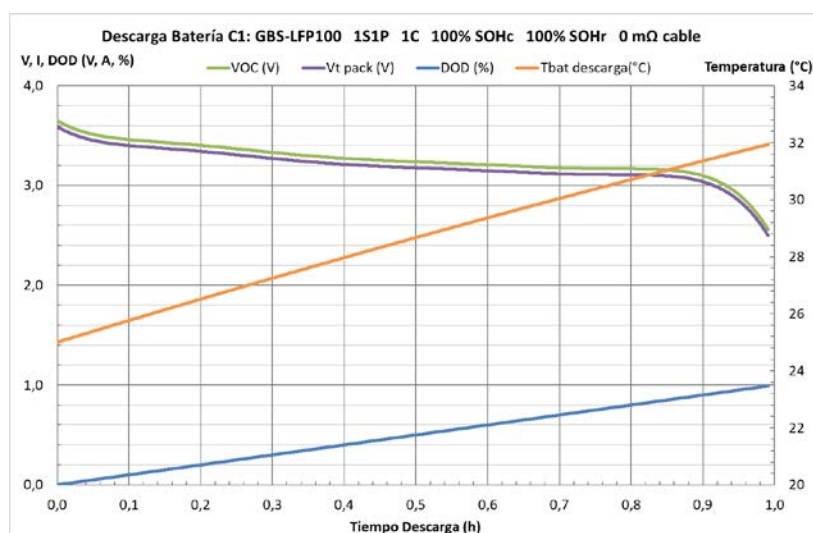
Se observa que el rendimiento en este caso es mayor que la celda NCR ensayada anteriormente. Esto se debe a que, aunque la resistencia interna es mayor ($0,045\Omega$ frente a $0,03\Omega$), la intensidad a 1C es menor (2,85A frente a 5A), y puesto que es una relación entre la potencia perdida y la potencia descargada, la intensidad afecta en mayor manera que la R_{int} , por lo que el rendimiento es mayor que en la batería NCR, pero mínimamente.

En este caso la tensión de la celda en la descarga, llega a la mínima tensión recomendada por el fabricante (2,65V), por lo que se decide finalizar la descarga.

DESCARGA NORMAL (0%DOD-100%DOD) BATERÍA LFP 100Ah 100%SOH 1C

En este caso se trata de una batería LFP con una capacidad de 100Ah y una tensión nominal de 3,2V.

Tiempo proceso	Voc inicial (V)	Voc final (V)	Vt inicial (V)	Vt final (V)	Tª inicial (°C)	Tª final (°C)	$\eta_{descarga}$ (%)
1H	3,650	2,559	3,590	2,499	25	31,9	98,12



Presenta un alto rendimiento debido a su muy pequeña R_{int} ($0,6m\Omega$). Existe una pequeña diferencia entre la tensión en circuito abierto y la tensión en bornes debido a este hecho, y el aumento de temperatura no es muy grande debido a la misma razón.

La descarga se da por finalizada cuando la tensión en bornes llega al mínimo establecido de 2,5V.

Anexo 6.b. Programa de carga

CONDICIONES INICIALES DE REFERENCIA

Programa de Carga Batería Li-ion
 Seleccione los parámetros de entrada empezando por el tipo de batería (desplegable) y el resto de parámetros y variables iniciales y finales del proceso. Tras cada cambio, SIEMPRE ES NECESARIO pulsar "INICIAR"

Curva escalada a Chen 2006: SI Componentes escalados: NO

INICIAR

Batería: Grado del Polinomio: Corriente de parada: A SOH: Reduce la Qnom y aumenta Rint

SOC inicial: Elementos serie: S Resistencia cableado: mΩ SOHC: Reduce la Qnom

Corriente en C: Elementos paralelo: P Salto de tiempo: h SOHR: Aumenta la Rint
IS=2.778E-04 h

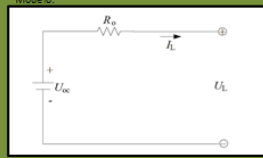
B: NCR26650A	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	0,00	0,00	101,46	-316,29	385,75	-236,59	81,49	-17,89	3,24	3,04

Cap. Nom. Celda: 5000 mAh R. Int. Nom: 30 mΩ I carga celda: 5 A Coeficientes de escalado

Capacidad pack: 5000 mAh Rint pack+Cal: 30 mΩ I carga pack: 25 A Vbat/Vref: 1,02364124

V. nominal pack: 3,7 V V. máx. pack: 4,2 V V. mín. pack: 2,6 V Qref/Qbat: 0,17

C. A-E: 0,1754386

Modo: 

Cálculo Temperatura batería

θini: K

Tamb: K

Tbat ini: K

U: W/(m2.K)

Cp: J/(kg.K)

Tau: s

Masa: kg

Área: m2

CARGA NORMAL (0%SOC-100%SOC) BATERÍA 26650 5000mAh 100%SOH 1C

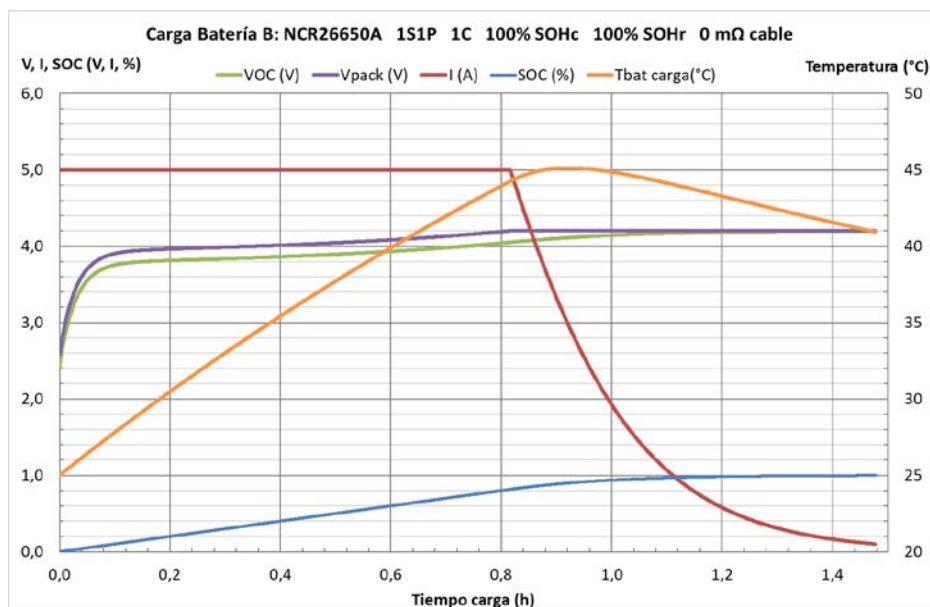
Se realiza una simulación de **carga total** de la batería 26650 mencionada, es decir, del 0% del SOC se pasa al 100% del SOC, con una intensidad de 5A (1C). El proceso presenta **dos fases**, una de **corriente constante** y otra de **tensión constante** una vez ha alcanzado la tensión máxima de la batería.

La fase de corriente constante dura 0,82 horas, mientras que la de tensión constante ocupa el periodo desde las 0,82 hasta las 1,48 horas. Se parte de 2,431V (tensión correspondiente al cálculo polinomial para 0%SOC) en circuito abierto hasta 4,197V, es decir del 100% del DOD al 0% del DOD. Por otro lado, la Vt de la batería comienza en 2,581V y finaliza en 4,200V. El hecho de que ahora la tensión en los terminales sea mayor, al contrario del caso de descarga, se debe a que la corriente fluye en sentido opuesto, de tal manera que si antes suministraba energía y su corriente iba al circuito externo, ahora la absorbe. Esto causa una caída de potencial provocada por la resistencia interna de la batería, haciendo que la tensión en circuito abierto sea menor que en terminales. A su vez, esa caída de tensión provoca una potencia perdida, que hace que el rendimiento de la batería disminuya inicialmente. El alto rendimiento final de la carga es provocado por el descenso continuo de la corriente para cargar totalmente la batería una vez se ha llegado a la Vmáx, ya que ahora la caída de potencial en la Rint es minúscula.

Se observa también que, para una temperatura inicial de 25°C, y supuesta una misma temperatura ambiente, el aumento de temperatura es grande debido a la generación de calor por Joule, pasando de 25°C a 40,9°C.

Todo ello se muestra en el gráfico siguiente. Se adjunta además una tabla con los valores considerados más relevantes para una fácil comparativa:

$t_{\text{final}}^{\text{Icte}}$	$t_{\text{final}}^{\text{Vcte}}$	$V_{\text{oc inicial}}$ (V)	$V_{\text{oc cambio}}$ (V)	$V_{\text{oc final}}$ (V)	$V_{\text{t inicial}}$ (V)	$V_{\text{t final}}$ (V)	$T^{\text{a máx}}$ (°C)	$T^{\text{a final}}$ (°C)	$\eta_{\text{carga Icte}}$ (%)	$\eta_{\text{carga Vcte}}$ (%)
0,82h	1,48h	2,431	4,050	4,197	2,581	4,200	45,1	40,9	96,23	98,08

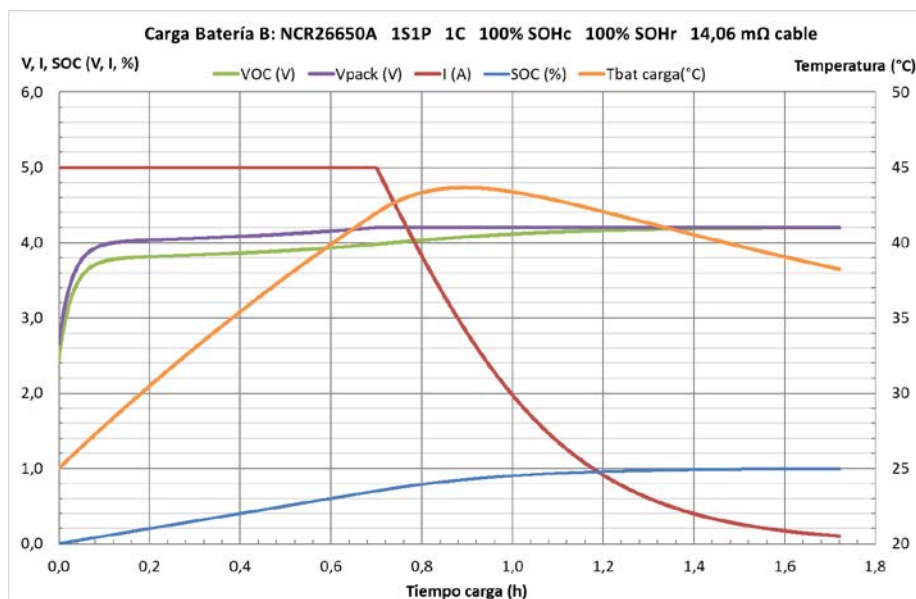


EFFECTOS DE DISTINTAS VARIABLES DE LA BATERÍA Y SUS CONEXIONES

RESISTENCIA CABLEADO

Suponiendo un cableado de 2 metros y sección 2,5mm² a 25°C → 14,06 mΩ

$t_{\text{final}}^{\text{Icte}}$	$t_{\text{final}}^{\text{Vcte}}$	$V_{\text{oc inicial}}$ (V)	$V_{\text{oc cambio}}$ (V)	$V_{\text{oc final}}$ (V)	$V_{\text{t inicial}}$ (V)	$V_{\text{t final}}$ (V)	$T^{\text{a máx}}$ (°C)	$T^{\text{a final}}$ (°C)	$\eta_{\text{carga Icte}}$ (%)	$\eta_{\text{carga Vcte}}$ (%)
0,70h	1,72h	2,431	3,980	4,196	2,651	4,200	43,7	38,2	94,52	97,08



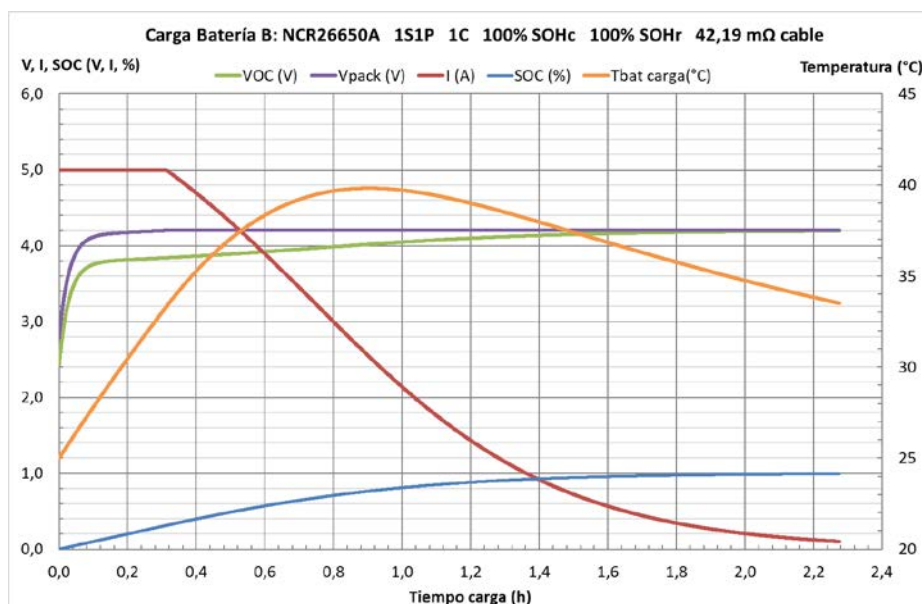
Al aumentar la resistencia de cableado, aumenta la caída de tensión en bornes (V_t). Esto supone que se llega antes a la tensión máxima en bornes, con lo que se pasa antes a la fase de tensión constante, a pesar que la tensión en circuito abierto es menor, reduciéndose la eficiencia global del proceso de carga. Además, el tiempo total de carga aumenta.

Al acortarse el periodo de carga a intensidad constante, la temperatura máxima y final de la batería son menores. Primeramente, porque no se calienta tanto ya que la intensidad de 5A circula durante menor tiempo, como finalmente porque la corriente es muy pequeña durante más tiempo, y evacúa más calor que el que genera. El incremento del tiempo de carga total se debe a que el SOC de la batería en el momento de pasar a tensión constante, es menor que en el caso anterior, y puesto que tiene que llegar al 100%, y que la intensidad se reduce con el tiempo, la batería tarda mayor tiempo en cargarse.

Suponiendo cableado de 6 metros y sección 2,5mm² a 25°C → 42,19 mΩ

En este caso se triplica la longitud del cableado, y con ello la resistencia ya que es directamente proporcional.

t _{final} (I _{cte})	t _{final} (V _{cte})	V _{oc} inicial (V)	V _{oc} cambio (V)	V _{oc} final (V)	V _t inicial (V)	V _t final (V)	T ^a máx (°C)	T ^a final (°C)	η _{carga} Icte (%)	η _{carga} Vcte (%)
0,31h	2,27h	2,431	3,839	4,193	2,792	4,200	39,8	33,5	91,07	94,66



De igual manera que en el caso anterior, al aumentar más la Rint, la tensión de 4,2V (tensión máxima) se alcanza antes, siendo menor aún la tensión en circuito abierto, y el rendimiento global se reduce. Esto provoca que el proceso se alargue más en el tiempo. Las temperaturas máxima y final también son menores por el mismo hecho comentado en el apartado anterior.

ESTADO DE SALUD DE LA BATERÍA SOH

Al igual que en apartado anterior, se procede a variar el SOH de la batería, tanto por envejecimiento con pérdida de capacidad (SOHc), como por aumento de resistencia interna (SOHr).

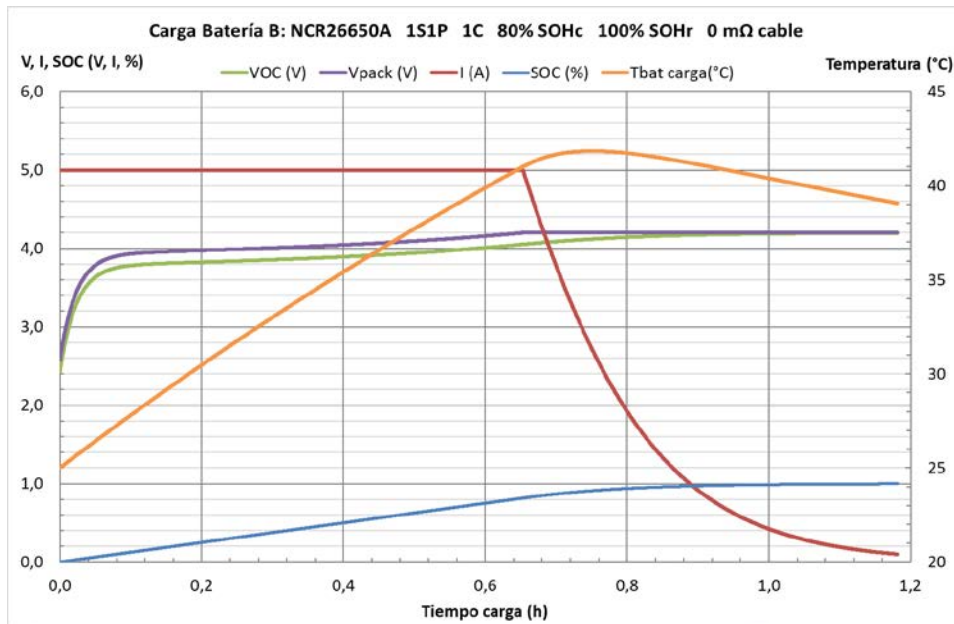
SOHc

Suponiendo un SOHc del 80% respecto al nominal de 5000mAh → Capacidad = 4000mAh → 1C

t _{final} (I _{cte})	t _{final} (V _{cte})	V _{oc} inicial (V)	V _{oc} cambio (V)	V _{oc} final (V)	V _t inicial (V)	V _t final (V)	T ^a máx (°C)	T ^a final (°C)	η _{carga} Icte (%)	η _{carga} Vcte (%)
0,65h	1,18h	2,431	4,050	4,197	2,581	4,200	41,8	39,1	96,23	98,08

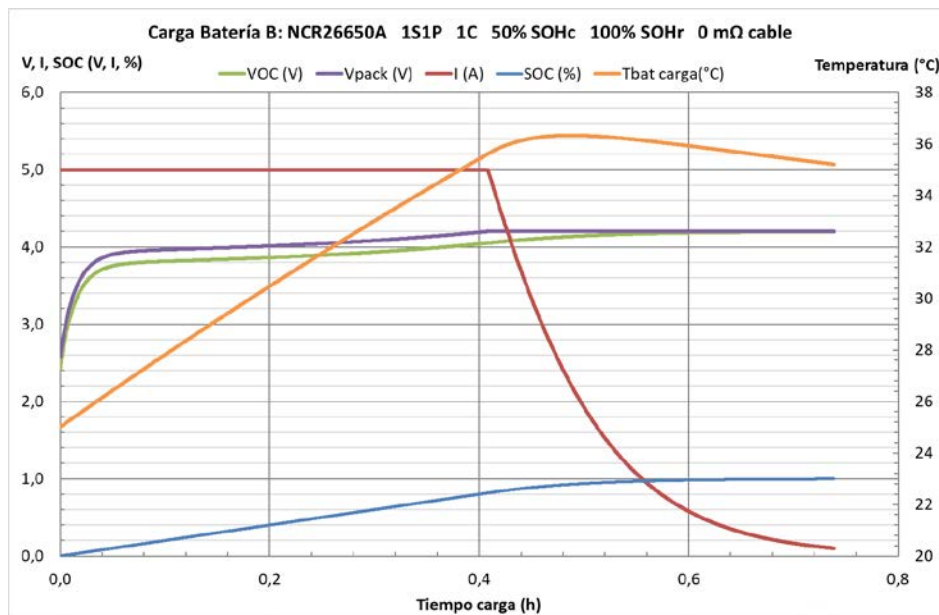
En este caso, debido al envejecimiento la capacidad de la batería pasa a ser de un 80%, es decir, 4000mAh. Esto hace que la cantidad de energía total que puede absorber y el tiempo de carga de la batería sean menores. La razón se debe a la relación Voc-SOC. Si para una carga en Ah aceptada, el SOC es mayor en la batería envejecida (de menor SOCmax), la tensión Voc es mayor que en la batería nueva para la misma carga en Ah aceptada (que representaría un SOC menor y una Voc también menor).

En este caso la temperatura es menor, también debido a los menores tiempos de la fase de carga a intensidad constante.



Suponiendo un SOHc del 50% respecto al nominal de 5000mAh → Capacidad = 2500mAh → 1C

$t_{\text{final}} (I_{\text{cte}})$	$t_{\text{final}} (V_{\text{cte}})$	$V_{\text{oc inicial}} (V)$	$V_{\text{oc cambio}} (V)$	$V_{\text{oc final}} (V)$	$V_{\text{t inicial}} (V)$	$V_{\text{t final}} (V)$	$T^{\text{a máx}} (°C)$	$T^{\text{a final}} (°C)$	$\eta_{\text{carga lcte}} (\%)$	$\eta_{\text{carga Vcte}} (\%)$
0,41h	0,74h	2,431	4,050	4,197	2,581	4,200	36,3	35,2	96,23	98,08



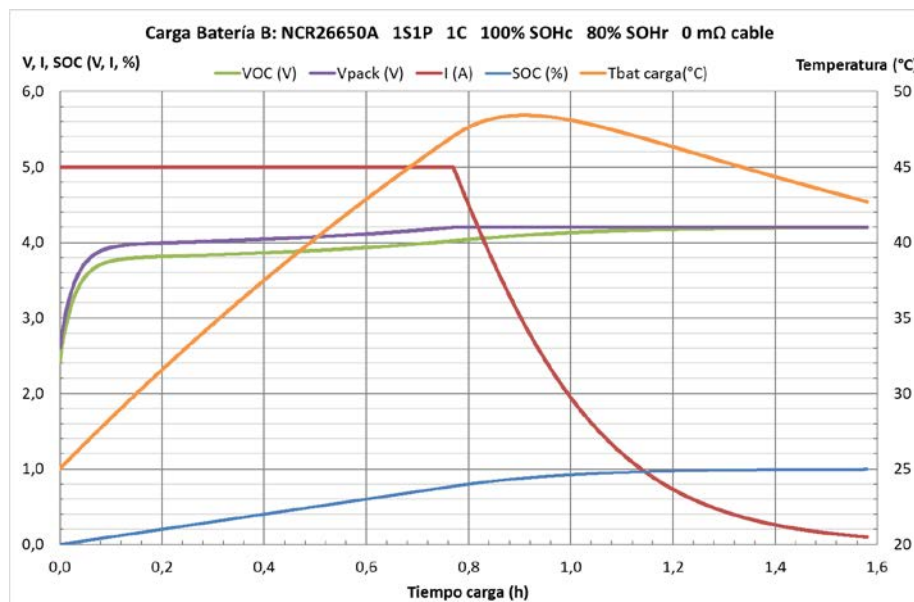
De igual forma que en el caso anterior, se ve que el tiempo total de carga se ha reducido, porque la carga aceptada en Ah, es del orden del 50% de la que aceptaría una batería nueva. Y las temperaturas son más bajas ahora.

SOHr

Suponiendo un SOHr del 80% respecto a la nominal de 30 mΩ → $R_{\text{int}} = 36\text{m}\Omega$

Suponer un SOHr del 80%, significa que la resistencia interna de la batería es aumentada hasta $36\text{m}\Omega$, y esto se ve reflejado en la tensión en bornes de la batería, que presenta un aumento respecto al valor de la carga normal provocado por la corriente que circula hacia la batería. Este aumento hace que el rendimiento sea menor, que la tensión máxima se alcance antes (paso de I_{cte} a V_{cte}). Al alcanzar esta tensión antes, la tensión en circuito abierto es menor, por lo que el tiempo de carga se alarga, ya que el SOC en el cambio de una fase a otra es menor, y la corriente se va reduciendo con el paso del tiempo. Por otro lado, se observa un aumento de temperatura, ya que, al existir una mayor resistencia interna, debido al paso de corriente se produce una generación de calor mayor.

$t_{\text{final}}^{\text{Icte}}$	$t_{\text{final}}^{\text{Vcte}}$	$V_{\text{oc inicial}}$ (V)	$V_{\text{oc cambio}}$ (V)	$V_{\text{oc final}}$ (V)	$V_{\text{t inicial}}$ (V)	$V_{\text{t final}}$ (V)	$T^{\text{a máx}}$ (°C)	$T^{\text{a final}}$ (°C)	$\eta_{\text{carga Icte}}$ (%)	$\eta_{\text{carga Vcte}}$ (%)
0,77h	1,58h	2,431	4,020	4,196	2,611	4,200	48,4	42,7	95,5	97,66

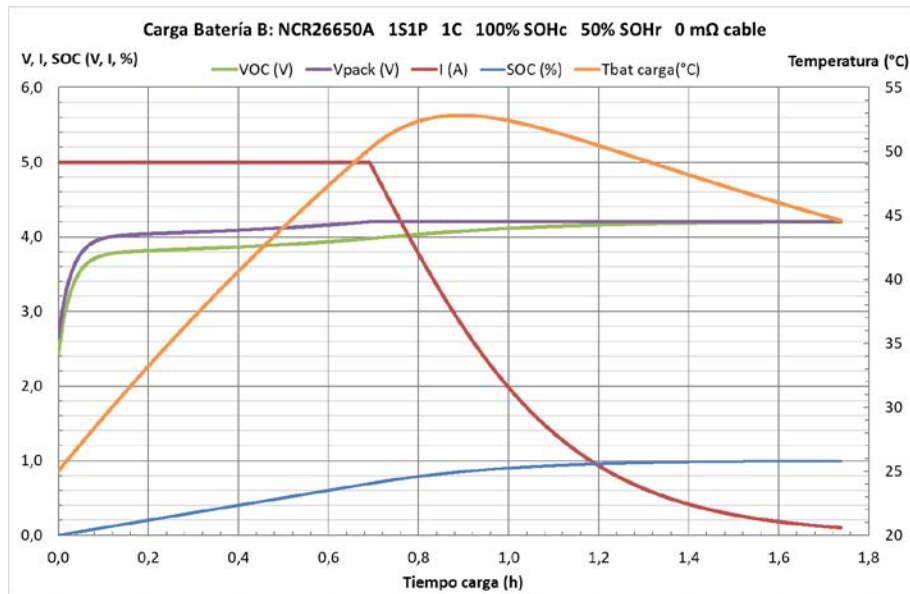


Suponiendo un SOHr del 50% respecto a la nominal de $30\text{m}\Omega \rightarrow R_{\text{int}} = 60\text{m}\Omega$

Se produce un aumento de R_{int} hasta el doble de su R_{int} inicial.

$t_{\text{final}}^{\text{Icte}}$	$t_{\text{final}}^{\text{Vcte}}$	$V_{\text{oc inicial}}$ (V)	$V_{\text{oc cambio}}$ (V)	$V_{\text{oc final}}$ (V)	$V_{\text{t inicial}}$ (V)	$V_{\text{t final}}$ (V)	$T^{\text{a máx}}$ (°C)	$T^{\text{a final}}$ (°C)	$\eta_{\text{carga Icte}}$ (%)	$\eta_{\text{carga Vcte}}$ (%)
0,69h	1,74h	2,431	3,975	4,196	2,656	4,200	52,8	44,6	94,41	97,01

De forma similar al anterior ensayo, la diferencia de tensión entre bornes y circuito abierto aumenta inicialmente, y con ello desciende el rendimiento de la carga. Por ello, el tiempo de carga a corriente constante disminuye, pero a tensión constante aumenta. Además, la temperatura sufre un mayor aumento, pudiendo causar problemas en la batería.

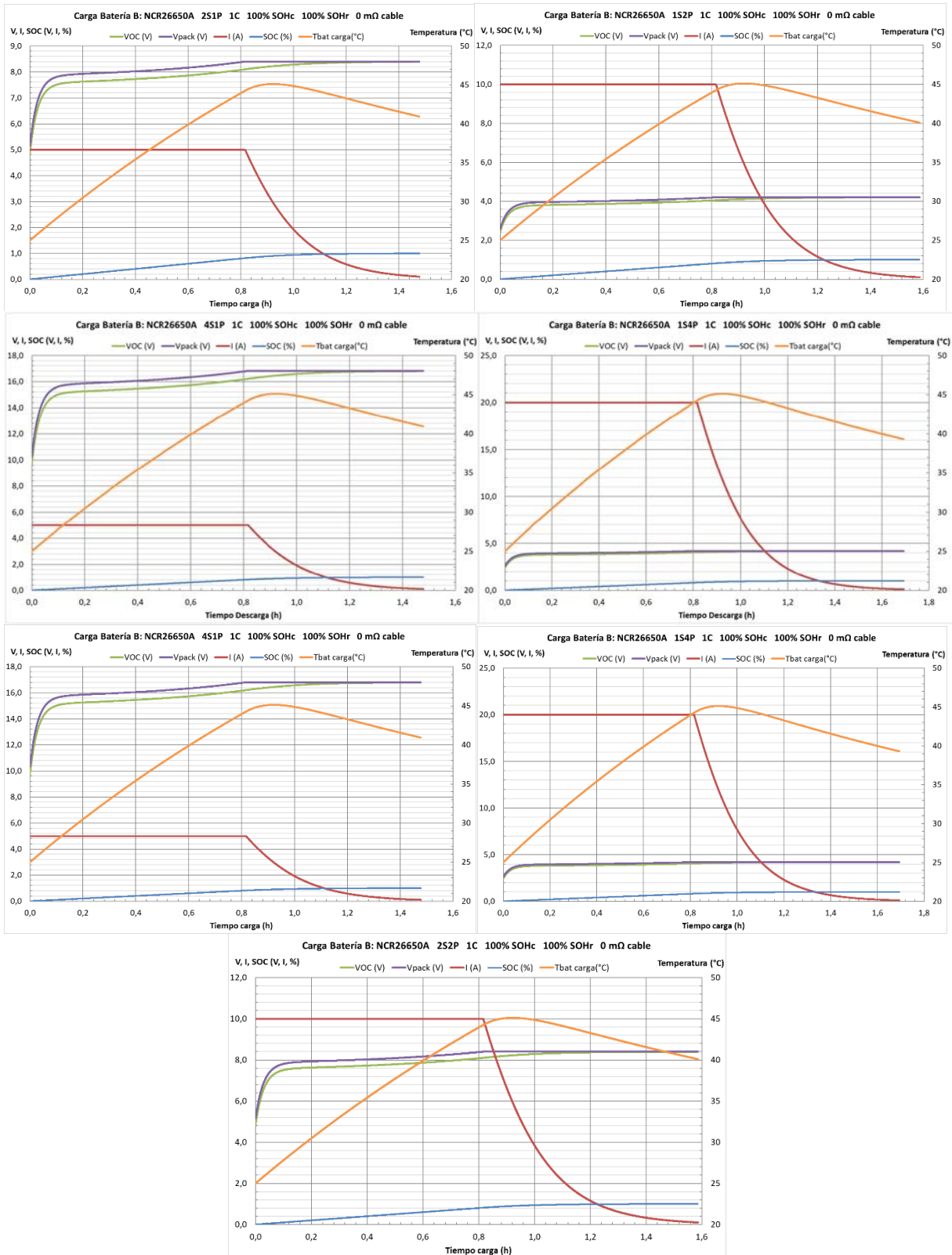


CONFIGURACIÓN SERIE/PARALELO

Se realiza una comparativa entre diferentes configuraciones serie paralelo, para observar cómo afecta esta variación respecto a los parámetros I , R_{int} , V_{oc} , V_t , temperatura y rendimiento de descarga. Los parámetros iniciales son los mismos que en el ensayo de carga normal, pero con la configuración de baterías correspondientes, y la temperatura calculada para una sola celda (de forma análoga al caso de la simulación de descarga)

Config	$T_{lcte-V_{cte}}^{final}$	I (A)	R_{int} (Ω)	V_{oc} inicial (V)	V_{oc} cambio (V)	V_{oc} final (V)	V_t inicial (V)	V_t final (V)	T^a máx ($^{\circ}C$)	T^a final ($^{\circ}C$)	η_{carga} lcte (%)	η_{carga} Vcte (%)
1S1P	0,82h-1,48h	5	0,03	2,431	4,050	4,197	2,581	4,200	45,1	40,9	96,23	98,08
2S1P	0,82h-1,48h	5	0,06	4,862	8,100	8,394	5,162	8,400	45,1	40,9	96,23	98,08
1S2P	0,82h-1,59h	10	0,015	2,431	4,050	4,199	2,581	4,200	45,1	40,1	96,23	98,09
4S1P	0,82h-1,48h	5	0,12	9,725	16,200	16,788	10,325	16,800	45,1	40,9	96,23	98,08
1S4P	0,82h-1,69h	20	0,0075	2,431	4,050	4,199	2,581	4,200	45,1	39,3	96,23	98,10
2S2P	0,82h-1,59h	10	0,03	4,862	8,100	8,397	5,162	8,400	45,1	40,1	96,23	98,09

En estos casos, como puede verse en la tabla, lo que cambia son las intensidades, resistencias internas (del módulo) y las tensiones del módulo frente a los parámetros de carga normal. La temperatura de la batería se calcula para una única batería (al igual que en la descarga), y puesto que en la etapa que más calor se genera es al final de la fase de corriente constante y se producen en todos los casos al mismo tiempo, la temperatura máxima es la misma. En el caso de la temperatura final, las pequeñas variaciones son debidas a los distintos tiempos de carga a tensión constante, siendo estas variaciones mínimas, al igual que las de los rendimientos. Estos tiempos de carga diferentes se deben a los cálculos que realiza el programa en la fase de tensión constante (a la hora de configurar el paralelo y de finalizar la carga), pero deberían ser los mismos.



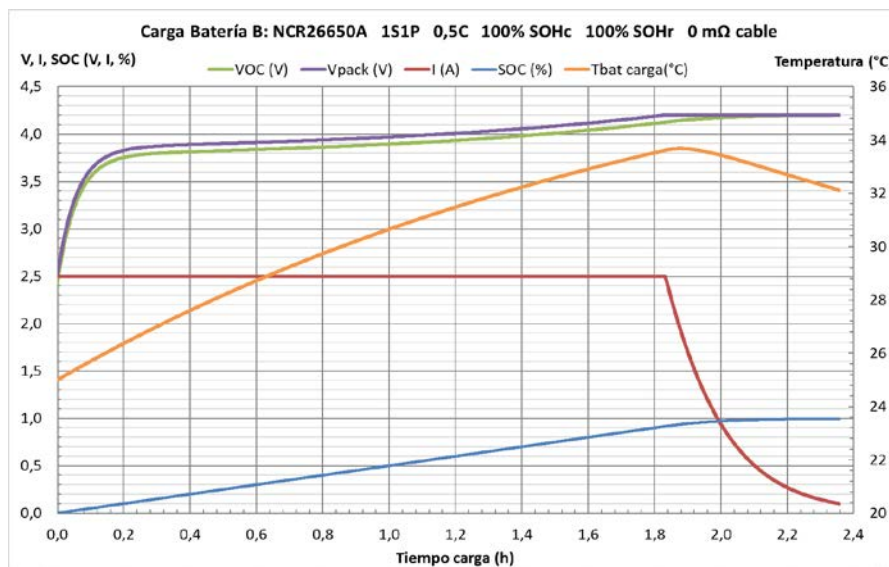
INTENSIDAD CONSTANTE EN LA PRIMERA FASE DE LA CARGA

Se realizan dos variaciones de la intensidad de carga 0,5C y 3C para analizar cómo afectan respecto a la carga normal a 1C.

Carga a 0,5C (2,5A)

El hecho de reducir la intensidad de carga, hace que la fase de carga a corriente constante se prolongue, ya que la intensidad se ve reducida a la mitad. Sin embargo, el tiempo a tensión constante se ve disminuido, y esto es debido a que, al haber menor caída de tensión interna, el SOC es mayor y en consecuencia el Voc, con lo que, aunque después se reduzca la intensidad, al tener un mayor Voc, el tiempo para completar la carga es menor que en el caso normal. El rendimiento es mayor debido a la menor caída de potencial en la resistencia interna. También genera menor cantidad de calor, y con ello una menor temperatura de la batería. Sin embargo, el tiempo total de carga, suma de las dos fases, es mayor que a la intensidad de 1C.

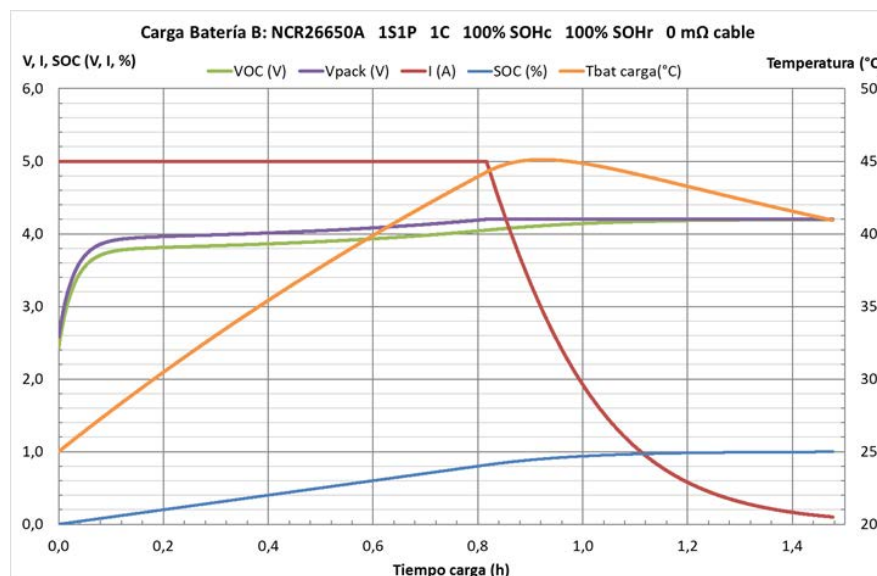
$t_{\text{final}}^{\text{Icte}}$	$t_{\text{final}}^{\text{Vcte}}$	$V_{\text{oc inicial}}$ (V)	$V_{\text{oc cambio}}$ (V)	$V_{\text{oc final}}$ (V)	$V_{\text{t inicial}}$ (V)	$V_{\text{t final}}$ (V)	$T^{\text{a máx}}$ (°C)	$T^{\text{a final}}$ (°C)	$\eta_{\text{carga Icte}}$ (%)	$\eta_{\text{carga Vcte}}$ (%)
1,83	2,36	2,431	4,125	4,197	2,506	4,200	33,7	32,1	98,09	99,05



Carga a 1C (5A)

Se muestran los resultados para la carga a 1C.

$t_{\text{final}}^{\text{Icte}}$	$t_{\text{final}}^{\text{Vcte}}$	$V_{\text{oc inicial}}$ (V)	$V_{\text{oc cambio}}$ (V)	$V_{\text{oc final}}$ (V)	$V_{\text{t inicial}}$ (V)	$V_{\text{t final}}$ (V)	$T^{\text{a máx}}$ (°C)	$T^{\text{a final}}$ (°C)	$\eta_{\text{carga Icte}}$ (%)	$\eta_{\text{carga Vcte}}$ (%)
0,82	1,48	2,431	4,050	4,197	2,581	4,200	45,1	40,9	96,23	98,08

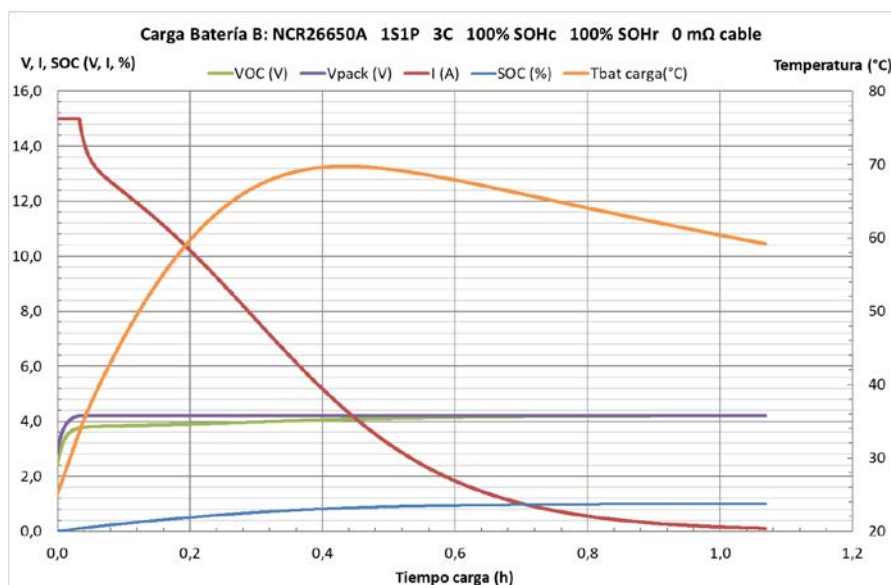


Carga a 3C (15A)

Al contrario que en el caso de 0,5C, ahora la intensidad de carga es mayor, con lo que la caída de tensión por efecto de la resistencia interna es bastante mayor, provocando unos malos rendimientos de carga de la batería. En este caso, el tiempo en fase a intensidad constante es mucho menor, pero esto se debe a la gran caída de potencial en la Rint (provocada por la alta corriente), haciendo que se llegue a la tensión máxima en muy corto espacio de tiempo. Esto provoca que el tiempo a tensión constante se alargue bastante ya que el SOC es muy pequeño (alrededor del 10% en esos instantes), y debe llegar al 100%.

También el calor generado es mucho mayor, alcanzándose temperaturas muy altas de la batería que pueden llegar a ser perjudiciales. Es interesante ver que el tiempo total de carga, de 1,07 h (64,2 min) sólo se ha reducido en 24,6 minutos respecto al tiempo total para 1C (1,47 h o 88,8 min), habiendo triplicado la corriente de carga.

$t_{\text{final}}^{\text{Icte}}$	$t_{\text{final}}^{\text{Vcte}}$	$V_{\text{oc inicial}}$ (V)	$V_{\text{oc cambio}}$ (V)	$V_{\text{oc final}}$ (V)	$V_{\text{t inicial}}$ (V)	$V_{\text{t final}}$ (V)	$T^{\text{a máx}}$ (°C)	$T^{\text{a final}}$ (°C)	$\eta_{\text{carga Icte}}$ (%)	$\eta_{\text{carga Vcte}}$ (%)
0,03	1,07	2,431	3,750	4,197	2,881	4,200	69,7	59,2	88,35	93,75

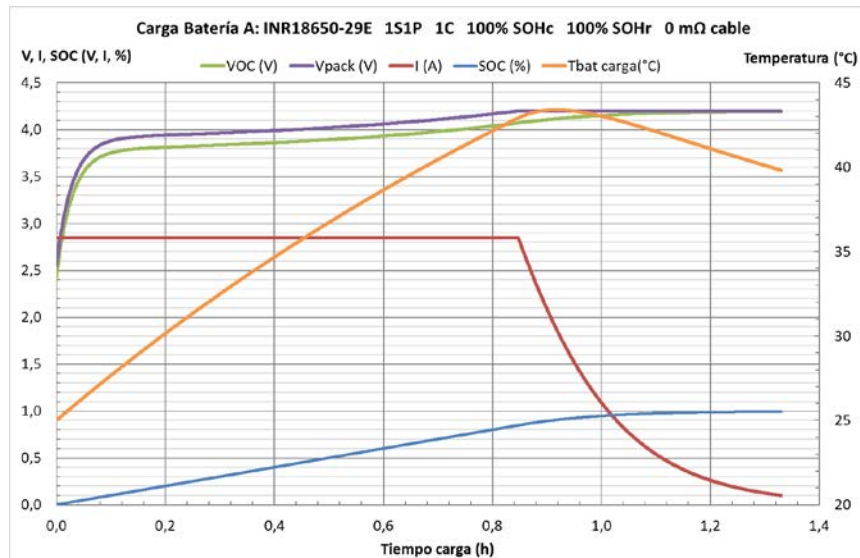


El hecho de poder absorber grandes cantidades de energía en poco tiempo permite al vehículo eléctrico o híbrido obtener energía del frenado regenerativo, para después utilizarla en la propulsión, aunque el rendimiento de esa obtención sea algo pobre.

CARGA NORMAL (0%DOD-100%DOD) BATERÍA AZUL INR 18650 2850mAh 100%SOH 1C

Ahora se muestran los resultados obtenidos para otra celda disponible. En este caso, se trata de una celda de menor tamaño 18650 y menor capacidad 2850 mAh, con una mayor resistencia interna (45 mΩ).

$t_{\text{final}}^{\text{Icte}}$	$t_{\text{final}}^{\text{Vcte}}$	$V_{\text{oc inicial}}$ (V)	$V_{\text{oc cambio}}$ (V)	$V_{\text{oc final}}$ (V)	$V_{\text{t inicial}}$ (V)	$V_{\text{t final}}$ (V)	$T^{\text{a máx}}$ (°C)	$T^{\text{a final}}$ (°C)	$\eta_{\text{carga Icte}}$ (%)	$\eta_{\text{carga Vcte}}$ (%)
0,85	1,33	2,431	4,072	4,196	2,559	4,200	43,4	39,8	96,77	98,35

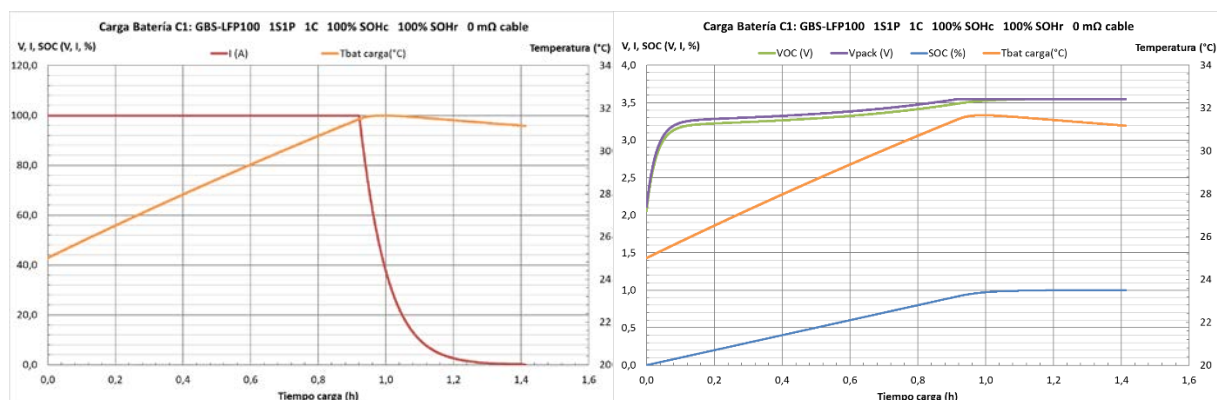


Se observa que el rendimiento en este caso es mayor que la celda NCR ensayada anteriormente. Esto se debe a que, aunque la resistencia interna es mayor ($0,045\Omega$ frente a $0,03\Omega$), la intensidad a 1C es menor (2,85A frente a 5A), y puesto que es una relación entre la potencia perdida y la potencia descargada, la intensidad afecta en mayor manera que la R_{int} , por lo que el rendimiento es mayor que en la batería NCR. El tiempo a corriente constante es un poco mayor, y se debe a que llega un poco después a los 4,2V de tensión máxima debido a su relación corriente-resistencia interna. Sin embargo, al haber llegado más tarde, su nivel de SOC es mayor, por lo que la fase a tensión constante, se realiza en menor tiempo ya necesita aumentar menos SOC hasta el 100%

CARGA NORMAL (0%DOD-100%DOD) BATERÍA LFP 100Ah 100%SOH 1C

En este caso se trata de una batería LFP con una capacidad de 100Ah y una tensión nominal de 3,2V.

t_{final} (t_{cte})	t_{final} (V_{cte})	V_{oc} inicial (V)	V_{oc} cambio (V)	V_{oc} final (V)	V_t inicial (V)	V_t final (V)	T^a máx (°C)	T^a final (°C)	η_{carga} I_{cte} (%)	η_{carga} V_{cte} (%)
0,92	1,48	2,055	3,490	3,550	2,115	3,550	31,7	31,2	98,2	99,13

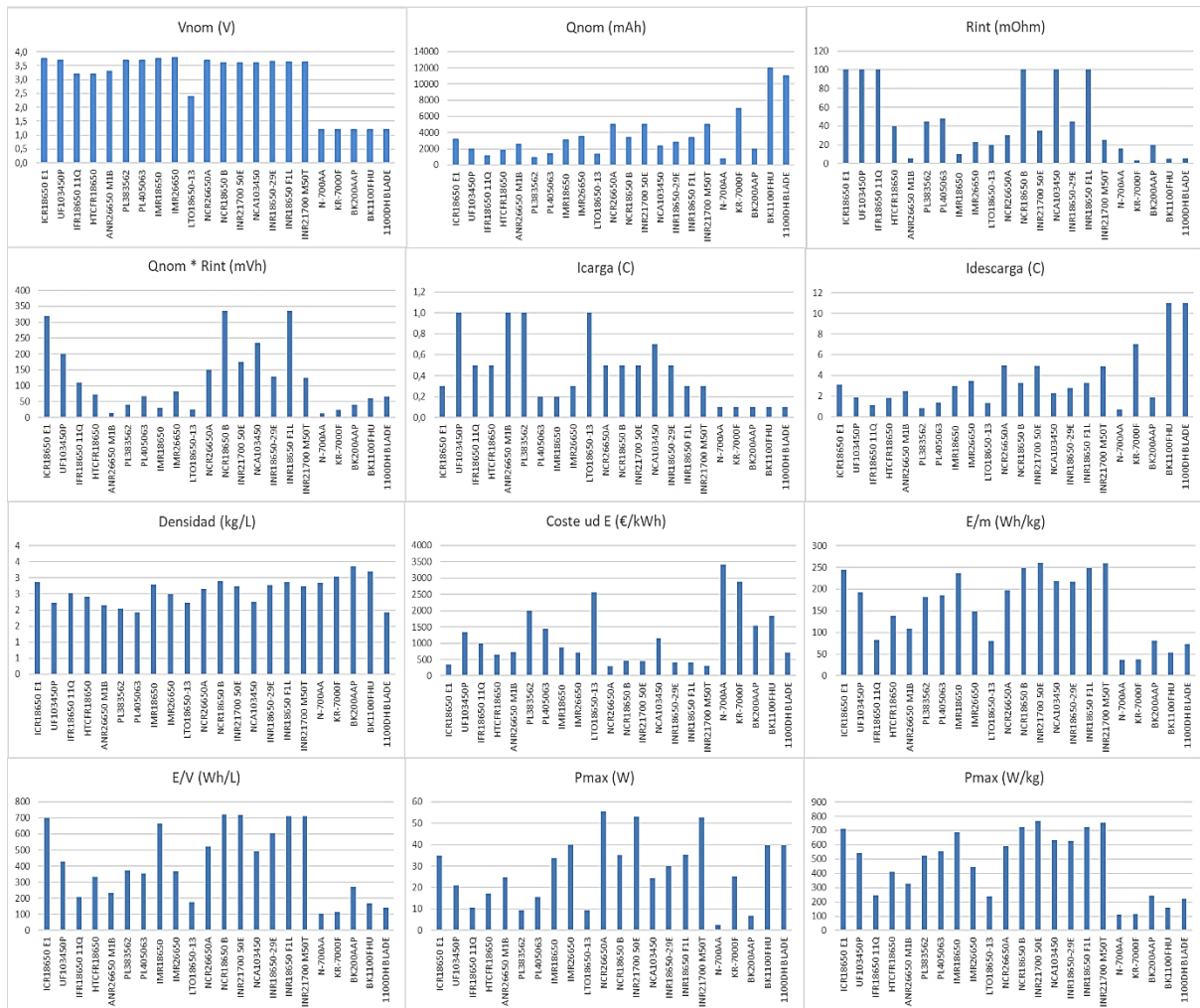


Al cargar a 1C, es decir, 100 amperios, la batería en caso de presentar una resistencia interna como las anteriores llegaría inmediatamente a la tensión máxima y solo se desarrollaría en la fase de tensión constante (caso similar al de descarga a 3C, pero en ese caso con una R_{int} alta). Pero puesto que la resistencia interna es muy pequeña no ocurre esta situación. De esta forma, el rendimiento de la batería es alto, no alcanza una gran temperatura debido a esta pequeña resistencia interna y tiene unos tiempos de carga normales.

Anexo 7. Gráficos comparativos de las baterías del libro de hoja de características y nomenclatura comercial de la química de las baterías.

Se añaden a este anexo los gráficos obtenidos del Banco de datos de características de baterías que permiten comparar entre unas y otras. Estos datos permiten ser agrupados por química de batería en orden alfabético

En el caso de que se quisieran añadir más baterías, únicamente habría que añadir la tabla correspondiente de esa batería, y pulsar el botón actualizar. En caso de no querer incluir alguna batería en los gráficos, bastaría con borrar la línea en la que se encuentra, o borrar la tabla de características (aunque en este último caso se perderían los datos)



También se añade una tabla indicativa de la nomenclatura comercial de las baterías de iones de litio, ya que habitualmente los fabricantes no indican la composición principal de éstas:

Nombre	Química característica	Cátodo	Ánodo	Nomenclatura	Nomenclatura comercial
Óxido de cobalto	LiCoO ₂	LiCoO ₂	Grafito	LCO	ICR
Óxido de manganeso	LiMn ₂ O ₄	LiMn ₂ O ₄	Grafito	LMO	IMR
Óxido Níquel Manganeso Cobalto	LiNiMnCoO ₂	LiNiMnCoO ₂	Grafito	NMC	INR
Óxido Níquel Cobalto Aluminio	LiNiCoAlO ₂	LiNiCoAlO ₂	Grafito	NCA	NCR o NCA
Ferrofosfato	LiFePo ₄	LiFePo ₄	Grafito	LFP	IFR
Titanato	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	Grafito	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	LTO	LTO