



MASTER EN INGENIERÍA DE AUTOMOCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

BATERÍAS DE TRACCIÓN PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Autor: D. Elsa Triana Barreda

Tutor: D. Daniel Moríñigo Sotelo

Valladolid, febrero de 2017

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



BATERÍAS DE TRACCIÓN PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

RESUMEN BREVE

Palabras clave: Batería de tracción, Vehículo eléctrico, Potencia, Autonomía, Movilidad Sostenible.

Actualmente la movilidad sostenible está tomando cada vez más importancia debido, por una parte a la concienciación social y por otra parte a las políticas anticontaminación entre las que se encuentran restricciones de la entrada al centro de las ciudades para vehículos contaminantes, afectando al propietario, o unos valores de emisiones máximos permitidos cada vez más estrictos, afectando al fabricante.

Dentro de este marco se encuentra el vehículo eléctrico, que puede ser una posible solución ya sea en su forma pura o en forma de vehículo eléctrico híbrido.

El gran reto de este vehículo es conseguir que, a ojos del consumidor, sea comparable con el motor de combustión interna. Es decir, es necesario conseguir unas especificaciones de potencia y autonomía competitivas. En este punto entran en juego las baterías de tracción, siendo el elemento clave para conseguir estas especificaciones buscadas.

TRACTION BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLES

SHORT ABSTRACT

Keywords: Traction battery, Electric Vehicle, Power, Range, Sustainable Mobility

Today, sustainable mobility is becoming more and more important due to two factors. On the one hand, social awareness makes people care about the environment, and on the other hand, anticontamination policies by the government. These policies affects both, the consumer and the manufacturer.

At this point, electric vehicles are available, which are a possible solution either as an electric vehicle or an hybrid electric vehicle.

The big challenge of this type of vehicles is to obtain a performance comparable to the internal combustion vehicle. In this way, the electric vehicle will be really competitive. It is necessary to obtain the same power and range. The key element to reach this benefits, is the traction battery.

BATERÍAS DE TRACCIÓN PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

RESUMEN EJECUTIVO

La sociedad actual está cada vez más concienciada con la contaminación y el cambio climático, siendo los vehículos de combustión interna el principal causante de las emisiones en las ciudades europeas. Por su parte, el gobierno introduce normativas cada vez más restrictivas, tanto a nivel nacional como las emisiones máximas de los vehículos de nueva fabricación, como a nivel local, que en algunas ciudades restringen la entrada de vehículos contaminantes en ciertas zonas. En este marco, tanto fabricantes como investigadores centran sus esfuerzos en obtener un medio de transporte no contaminante, que satisfaga por una parte al consumidor y por otra parte que cumpla las normativas. El vehículo eléctrico es una de las soluciones encontradas y que más implementada está actualmente.

Un vehículo eléctrico, de manera simple, sustituye el motor de combustión interna por un motor eléctrico y, por lo tanto, reemplaza el combustible por energía eléctrica. Es en este punto donde está la clave que hará que el vehículo eléctrico gane el pulso al convencional de combustión interna. La manera de almacenar la energía eléctrica necesaria para hacer funcionar el motor, es usando baterías de tracción. Obtener una potencia y una autonomía equiparables a las de los motores de diésel o gasolina es fundamental para obtener su supremacía.

Las baterías de tracción no son un invento nuevo, pero en los últimos años los esfuerzos de los investigadores y entidades han dado sus frutos, haciendo que sean capaces de almacenar más energía. En la actualidad existen varios tipos de baterías usadas en vehículos eléctricos, la elección del tipo de batería a implementar depende del fabricante. Los tipos fundamentalmente usados en automoción son las baterías de plomo-ácido, tanto selladas como inundadas, las de Níquel Metal Hidruro (NiMH), las de ion-Litio y, en menor medida, las de polímero de Litio.

El principio de funcionamiento de las baterías es siempre el mismo, durante la carga se produce la reacción de reducción y, durante la descarga, la de oxidación. En función de los elementos usados como ánodo, cátodo y electrolito, estas reacciones variarán. Aquí reside la razón por la que cada tipo de batería va a ofrecer unas propiedades diferentes. Por ejemplo, las baterías de ion-Litio presentan mayor energía específica y potencia de salida que las de NiMH; podría entenderse que los fabricantes se declinaran por esta opción. Sin embargo, las baterías de NiMH no necesitan una estructura de refrigeración, su gestión es más sencilla y no deben ser sobredimensionadas, reduciendo así el tamaño, peso y coste de las mismas. Aquí puede verse que depende del fabricante y la estrategia a seguir el usar un tipo de baterías u otro.

La gran necesidad de obtener características similares o incluso mejores que los vehículos con motor de combustión interna, impulsa el estudio y desarrollo de nuevos modelos de baterías. Existen dos vertientes en las investigaciones, por una parte se trabaja para mejorar las tipologías ya existentes, introduciendo nuevos materiales, fases o aleaciones en los elementos ya conocidos. Por otra parte se buscan nuevos modelos, baterías realizadas a partir de elementos completamente diferentes a los usados hoy en día, como son las baterías de grafeno, de magnesio o de kevlar.

Una vez seleccionado el tipo de batería que se va a usar, es necesario dimensionarla, es decir, realizar un diseño de la misma en cuanto al número de celdas y disposición de las mismas que cumpla con las especificaciones requeridas. Existen modelos de circuito equivalente que reducen los cálculos y hacen más sencillo el modelado de una batería pero, como a la hora de la elección de la tipología, también depende del fabricante la estrategia a seguir. Un pack de baterías se forma a partir de la unión de celdas unidad. Si se conecta a las celdas en serie, se suman sus tensiones y, si se conectan en paralelo lo harán sus corrientes. De esta manera, uniendo un cierto número de celdas en serie y en paralelo, se obtendrán los valores de tensión y corriente deseados, obtenidos en la fase del diseño. Existen fabricantes que optan por el menor número posible de celdas grandes o, por el contrario, un muy elevado

número de celdas pequeñas. En el caso de Tesla, que posiciona el pack de baterías en el suelo del vehículo, opta por más de 6500 celdas pequeñas, del tamaño de las convencionales AA.

Esta estrategia no solo afecta al modo de conexión o al posicionamiento en el vehículo. Para asegurar el correcto funcionamiento de la batería y no reducir su vida, es necesario implementar un sistema de gestión en el que se controlan la temperatura, el rendimiento y la carga entre otras variables. Esta gestión debe hacerse a nivel de celda por lo que, cabe esperar que el coste sea mucho más elevado siguiendo la estrategia de Tesla. El coste añadido presenta un gran inconveniente pero una gestión exhaustiva de la batería mejora su funcionamiento, seguridad y alarga su vida útil. Probablemente, el parámetro más importante para realizar esta gestión sea el estado de carga (SOC). El estado de carga se define como la capacidad restante de la batería y existen diferentes métodos para estimarlo, mediante medida directa que, al basarse en la hipótesis de una corriente de descarga constante es bastante inexacto, mediante la medida de la gravedad específica o densidad relativa, que no es capaz de determinar la capacidad total de la batería, mediante la medida de la impedancia interna, que es fuertemente dependiente de la temperatura por lo que tampoco da una medida precisa mediante estimaciones basadas en voltaje que es poco preciso debido a su comportamiento no lineal o mediante estimaciones basadas en corriente, que es el modo más empleado en la actualidad.

Una vez seleccionada la batería y la estrategia a seguir, se fabrica el vehículo. Para poder cargar la batería es necesario enchufarlo a la red. Existen tres estándares de conectores a nivel mundial y, el uso de uno u otro tipo dependerá del fabricante y del país de destino del vehículo. Si se pretende que el vehículo eléctrico se convierta en la mejor alternativa, es necesario realizar un estudio acerca de la carga y el impacto en la demanda de energía del mismo. Debe tenerse claro el comportamiento del propietario, si carga el vehículo cuando llega al trabajo, si lo hace en su propio hogar o si lo enchufa cuando dispone de un cargado. Tanto ayuntamientos como empresas energéticas deben aunar sus esfuerzos en este campo. Por un lado, si se pretende que el número de vehículos eléctricos se cada vez mayor, también deben serlo los puntos de recarga disponibles, en lugares públicos, centros comerciales, viviendas... pero también en gasolineras y estaciones de servicio. Por otro lado un aumento del uso de vehículos eléctricos conlleva a un aumento en la demanda de la energía eléctrica. Los propietarios conectarán su vehículo a la red en cualquier momento del día y esto no debe afectar al abastecimiento eléctrico de la ciudad ni a su calidad. En este sentido, debe realizarse un extenso análisis del impacto en la demanda energética y deben desarrollarse estrategias que aseguren que se cubrirá dicha demanda.

En el presente documento se realizará un análisis de las baterías de tracción para vehículos eléctricos desde los fundamentos de su funcionamiento, viendo los tipos usados en la actualidad y las tendencias futuras. Se hará un estudio de los parámetros más importantes a tener en cuenta a la hora de diseñar una batería y cómo debe realizarse la gestión de la misma. Tras conocer las posibles estrategias de carga, se hará un análisis sencillo del impacto en la demanda energética en España a través de tres escenarios ficticios suponiendo distintos números de vehículos eléctricos presentes en el parque automovilístico.

TRACTION BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLES

EXECUTIVE ABSTRACT

Today's society is increasingly aware of pollution and climate change, with internal combustion vehicles being the main cause of emissions in European cities. For its part, the government is introducing increasingly restrictive regulations. At national level, maximum emissions are limited affecting manufacturers. At city level, sometimes the entry of polluting vehicles into the city center is restricted, which affects the owner. Both manufacturers and researchers are working to obtain a non-polluting transport that complies with regulations and satisfies the customer. One of the available solutions is the electric vehicle.

In a simple way, an electric vehicle replaces the internal combustion engine with an electric motor and replaces the fuel with electrical energy. The way to store the electrical energy is by using the traction batteries. At present, it exists different kinds of batteries. The use of one or other depends on the manufacturer. The most used batteries in electric vehicles are lead-acid, NiMH or Li-ion.

The operating rule is always the same regardless the kind of battery. During the charge, the reduction reaction takes place and, during the discharge the oxidation reaction. These chemical reactions will vary depending on the materials used as anode, cathode and electrolyte. That's the reason of the different properties depending on the kind of battery chosen. For example, Li-ion batteries presents a higher value of specific energy and output power than NiMH. However, NiMH batteries do not need a cooling structure, the management is simpler and they don't need to be oversized, thus reducing the size, weight and cost of them. Here it can be seen that it depends on the manufacturer and his strategy using one type of batteries or another.

The need to obtain similar or even better characteristics than vehicles with internal combustion engines, drives the study and development of new battery models. There are two aspects in research, on the one hand, they work to improve the existing typologies, introducing new materials, phases or alloys in the already known elements. On the other hand, they are looking for new models, batteries from completely different elements to those used today, such as graphene, magnesium or kevlar batteries.

Once the type of battery that is going to be used has been selected, it is necessary to dimension it, that is, to design in terms of the number of cells and their arrangement that complies with the requires specifications. A battery pack is formed by the union of unit cells. If the cells are connected in series, its voltage is added but, if they are connected in parallel, it add their current. In this way, by joining a certain number of cells in series and in parallel, the desired voltage and current values obtained in the design phase will be obtained. There are manufacturers that choose the smallest possible number of large cells or, on the contrary, a very high number of small cells. In the case of Tesla, which positions the battery pack on the floor of the vehicle, opts for more than 6500 small cells, with the size of the conventional AA cells.

This strategy not only affects the connection mode or positioning in the vehicle. To ensure the correct operation of the battery and not reducing its life, it is necessary to implement a management system in which the temperature, performance or charge are controlled. This management must be done at the cell level, so the cost can be expected to be much higher following the Tesla strategy. The added costs presents a great inconvenience but an exhaustive management of the battery improves its operation, safety and extends its useful life. Probably, the most important parameter to perform this management is the state of charge (SOC). The state of charge is defined as the remaining capacity of the battery and there are different methods to estimate it: by direct measurement, which is based on the hypothesis of a constant discharge current so is quite inaccurate; by measuring the specific gravity or relative density, which is not able to determine the total capacity of the battery; by measuring the internal impedance, which is strongly dependent on the temperature, so it does not give an accurate measurement; by estimations based of voltage that is imprecise due to its behavior non-linear or by current-based estimates, which is the mode most used today.

Once the battery and the strategy to be followed are selected, the vehicle is manufactured. To be able to charge the battery it is necessary to plug it into the network. There are three standards of connectors worldwide, and the use of one or other type will depend on the manufacturer and the country of the destination of the vehicle. If it is intended that the electric vehicle becomes the best alternative, it is necessary to conduct a study about charging systems and their impact on the energy demand curve. It must be clear the behavior of the owner, if he charges the vehicle when arrives at work, If he do it in his own home or if he plug it when has a charger. Both municipalities and energy companies must join their efforts in this field. On the one hand, if the number of electric vehicles is expected to increase, so should the recharging points available, in public places, shopping centers, homes but also at gas stations and service stations. On the other hand, an increase in the use of electric vehicles leads to an increase in the demand for electric power. Owners will connect their vehicle to the network at any time of the day and this should not affect the city's electricity supply. Here, an extensive analysis of the impact on energy demand must be carried out and strategies must be developed to ensure that this demand will be met.

In this document an analysis of the traction batteries for electric vehicles will be carried out from the fundamentals of its operation, seeing the types used at present and future trends. A study will be made of the most important parameters to take into account when designing a battery and how it should be managed. After knowing the possible charging strategies, a study of the impact on the energy demand in Spain will be made through three fictitious scenarios assuming different numbers of electric vehicles present in the car park.

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN DEL TFM.....	1
1.2.	OBJETIVOS	1
1.3.	ALCANCE Y DESARROLLO DEL TFM	2
2.	ESTADO DEL ARTE	3
2.1.	INTRODUCCIÓN.....	3
2.2.	QUÍMICA DE LA BATERÍA	3
2.3.	OPERACIONES BÁSICAS DE LAS BATERÍAS RECARGABLES.....	3
2.4.	TIPOLOGÍAS DE BATERÍAS	5
2.4.1.	BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO.....	6
2.4.2.	BATERÍA DE NiMH.....	7
2.4.3.	BATERÍA DE Li-ion.....	8
2.4.4.	BATERÍA DE POLÍMERO DE LITIO.....	10
2.5.	COMPARATIVA DE NiMH Y ion-Li EN PHEV.....	10
2.6.	ESTADO ACTUAL.....	11
2.7.	TENDENCIAS DE DESARROLLO	12
2.8.	CONCLUSIONES.....	14
3.	TECNOLOGÍA DE LAS BATERÍAS	17
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	17
3.2.	TÉRMINOS BÁSICOS.....	18
3.3.	MODELADO DE LA BATERIA	19
3.3.1.	MODELOS DE CIRCUITO EQUIVALENTE.....	20
3.3.2.	TIEMPO DE EJECUCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y ADMINISTRACIÓN 21	
3.3.3.	ESTIMACIÓN DEL SOC.....	21
3.3.4.	TIEMPO DE EJECUCIÓN Y NIVEL DE CELDA INDIVIDUALIZADO ...	21
3.4.	EQUILIBRADO DE CELDAS.....	22
4.	GESTIÓN Y SEGURIDAD EN LAS BATERÍAS	25
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	25
4.2.	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA BATERÍA.....	25
4.2.1.	ESTIMACIÓN DEL SOC.....	26
4.3.	SISTEMA DE GESTIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA BATERÍA	27
4.4.	SISTEMA DE GESTIÓN TÉRMICA.....	27
4.5.	SISTEMA DE GESTIÓN DE CARGA	28

4.6.	PROTECCIÓN DE LA CARGA	28
4.7.	SEGURIDAD EN EL DISEÑO DE LA BATERÍA	29
4.8.	SEGURIDAD ELÉCTRICA	30
4.9.	CONCLUSIONES.....	31
5.	SISTEMAS DE RECARGA.....	33
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	33
5.2.	TIPOS DE ENCHUFES ESTANDARIZADOS	33
5.3.	MÉTODOS DE CARGA.....	34
5.4.	ESTÁNDARES DE ENERGÍA	36
5.5.	IMPACTO DE LA CARGA DE EV EN EL SISTEMA DE DEMANDA.....	37
5.5.1.	IDENTIFICACIÓN DE LA DEMANDA GENERADA POR LA CARGA DE VE	37
5.6.	IMPACTO DE LA CARGA DE EV EN EL SISTEMA DE DEMANDA DE ENERGÍA.....	39
5.6.1.	MÉTODO DE CARGA DE OPORTUNIDAD	40
5.6.2.	MÉTODO DE CARGA MULTI TARIFA	40
5.6.3.	MÉTODO DE CARGA INTELIGENTE	42
5.7.	CONCLUSIONES.....	43
6.	CONCLUSIONES.....	45
	BIBLIOGRAFÍA.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Esquema de la operación de carga de una batería de NiMH [Garcia-Valle, 2012].....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2: Esquema de la operación de carga de una batería de Li-ion [Garcia-Valle, 2012]</i>	<i>5</i>
<i>Figura 3: dispositivos de almacenamiento de energía electroquímicos utilizados en la aplicación de propulsión [Garcia-Valle, 2012]</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4: Modelo de circuito equivalente de una batería. [Garcia-Valle, 2012]</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5: equilibrado de celdas a través de resistencias bypass. [Garcia-Valle, 2012]</i>	<i>23</i>
<i>Figura 6: equilibrado de celdas a través de arrastre de energía mediante condensadores. [Garcia-Valle, 2012]</i>	<i>23</i>
<i>Figura 18: Curva de la tensión en función de la capacidad de una batería. [Cheng, 2011].....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 19: Gestión de la energía de un vehículo eléctrico [Lawson, 2019]</i>	<i>29</i>
<i>Figura 20: Esquema de un BMS [Lawson, 2019]</i>	<i>31</i>
<i>Figura 7: Conector IEC 62196-2 tipo 1 [Electromovilidad]</i>	<i>33</i>
<i>Figura 8: Conector IEC 62196-2 tipo 2 [Electromovilidad]</i>	<i>34</i>
<i>Figura 9: Conector IEC 62196-2 tipo 3 [Electromovilidad]</i>	<i>34</i>
<i>Figura 10: Combinación de tensión constante y corriente constante [Dhameja, 2002]</i>	<i>35</i>

<i>Figura 11: Sistema de transferencia de energía para la carga de un vehículo eléctrico [Dhameja, 2002]</i>	37
<i>Figura 12: Diagrama del sistema de demanda de invierno en carga de oportunidad (España) [Hassett, 2011]</i>	40
<i>Figura 13: Diagrama del sistema de demanda de verano en carga de oportunidad (España) [Hassett, 2011]</i>	40
<i>Figura 14: Demanda de carga de EV en tarifa dual (España) [Hassett, 2011]</i>	41
<i>Figura 15: Diagrama de demanda en invierno para carga de tarifa dual (España) [Hassett, 2011]</i>	41
<i>Figura 16: Demanda de EV en carga inteligente (España) [Hassett, 2011]</i>	42
<i>Figura 17: Diagrama de demanda en el sistema de invierno para carga inteligente (España) [Hassett, 2011]</i>	42

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Comparación de baterías de VEH</i>	10
<i>Tabla 2: Comparación de los materiales para ánodo y cátodo en baterías Li-ion [Young, 2010]</i>	12
<i>Tabla 3: Ventajas e inconvenientes de las baterías</i>	15
<i>Tabla 4: Comparativa NiMH Vs Ion-Li</i>	15
<i>Tabla 5: Uso de baterías según el fabricante [Corrigan, 2011]</i>	17
<i>Tabla 6: Estándares de la carga de vehículos eléctricos. [Dhameja, 2002]</i>	36
<i>Tabla 7: Niveles de potencia de carga de vehículos eléctricos. [Dhameja, 2002]</i>	37

NOMENCLATURA

EV	vehículo eléctrico
BEV	Vehículos Eléctricos de Baterías Puras
HEV	Vehículo Eléctrico Híbrido
PHEV	Vehículo Eléctrico Híbrido Enchufable
NiMH	Baterías de Níquel Metal Hidruro
VRLA	Baterías de plomo ácido selladas
DOD	Profundidad de descarga
SOC	Estado de Carga
SOH	Estado de Salud
BMS	Sistema de Gestión de la Batería
TMS	Sistema de Gestión Térmica

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN DEL TFM

El cambio climático es una realidad que importa cada vez más a la sociedad, los gobiernos implementan medidas anti contaminación y las ciudades se adaptan a las nuevas normativas. Por otra parte, se encuentra el desafío relacionado con la economía del combustible, los precios cada vez más altos y la contaminación asociada a su uso. A día de hoy, la movilidad eléctrica parece la solución óptima a estos problemas. Se trata de una tecnología con muchos años de trayectoria e investigación y que está lista para ser implementada. Por lo tanto, la pregunta ya no es si la movilidad eléctrica puede convertirse en una realidad sino cuándo lo hará.

El elemento que da potencia y autonomía a un vehículo eléctrico es la batería. Estas baterías, denominadas baterías de tracción han sido objeto de estudio durante muchos años para poder obtener el máximo rendimiento de las mismas y, lo sigue siendo. Muchos investigadores y universidades centran sus esfuerzos en desarrollar nuevas tecnologías para las baterías que permitan mayor seguridad, mejores prestaciones, tamaños más reducidos...

A lo largo de este documento se estudiará la batería, desde su estado más fundamental y teniendo en cuenta la parte química, principios de funcionamiento, tipos de baterías usadas actualmente y nuevas líneas de desarrollo.

Se presentarán las prestaciones y características de las mismas, el modelado de las mismas como circuitos eléctricos equivalentes y los parámetros más importantes que las definen. De esta manera se puede saber, en función del tipo de batería que se trate, el modo de funcionamiento, las prestaciones que va a presentar, cómo obtener los parámetros característicos... En este punto, el lector tendrá una idea de cómo elegir una batería dependiendo de las características que quiera obtener en función de la aplicación.

Puesto que se están tratando las baterías de tracción, cabe esperar que sean incluidas dentro de un vehículo siendo importante tener en cuenta la manera de cargar las baterías desde el exterior. En el caso de vehículos híbridos no enchufables, las baterías se recargan gracias al motor de combustión interna y al frenado regenerativo. Sin embargo, en los vehículos eléctricos puros es necesario conectarse a una fuente externa que cargue las baterías. En este punto se estudiarán los diferentes tipos de conectores y las distintas estrategias de carga. Es razonable pensar que, al aumentar el número de vehículos eléctricos, aumentará el número de vehículos que deben conectarse a la red. Este incremento en la demanda debe ser cuidadosamente estudiado ya que, tanto las ciudades como las empresas deben estar preparadas para abastecer esta demanda.

La estrategia a seguir por el fabricante de un vehículo eléctrico no es tan sencilla como montar una batería y conectar un motor eléctrico. Para obtener un buen comportamiento y un ciclo de vida razonable es necesario tener un control de las baterías. Los sistemas de gestión son fundamentales, tanto para el funcionamiento de la batería como para evitar el deterioro de la misma. Por otro lado, la seguridad a la hora de fabricar, montar y tratar con baterías es muy importante y deben tenerse en cuenta ciertas consideraciones.

1.2. OBJETIVOS

En este documento se pretende analizar las baterías de tracción usadas en los vehículos eléctricos haciendo un análisis que abarca desde la composición al estudio de parámetros importantes así como el modelado de las mismas en forma de circuitos equivalentes. Se estudiará el estado del arte de las mismas y se ampliará con nuevas investigaciones. Además de la composición y el funcionamiento, se presentará la gestión de las baterías una vez montadas en el vehículo eléctrico.

De manera específica, en este documento se van a analizar las posibles soluciones futuras al problema del almacenamiento de la energía y se tendrá en cuenta el impacto que tiene la introducción del vehículo eléctrico en el mercado en el sistema de demanda de energía.

1.3. ALCANCE Y DESARROLLO DEL TFM

El documento está estructurado de manera que se entienda a la batería desde su forma más simple, es decir su composición. Una vez definido el modo de funcionamiento se estudiarán los diferentes tipos de baterías usados en la actualidad así como un análisis de las tendencias de desarrollo que van desde mejorar los sistemas ya conocidos hasta el diseño de sistemas novedosos.

Una vez definido el comportamiento de la batería, se darán las claves para realizar el modelado de la misma mediante circuitos equivalentes. Se presentarán los parámetros más importantes que son los que habrá que tener en cuenta a la hora de diseñar una batería.

Puesto que los vehículos eléctricos puros así como los híbridos enchufables deben ser conectados a la red para poder cargarse, se hará un análisis de los diferentes tipos de cargadores así como de las estrategias de carga que se pueden seguir. Además, la conexión a la red de un número creciente de vehículos eléctricos tendrá un impacto en el sistema de demanda de energía que es necesario que sea estudiado y debidamente tratado.

Por último, las baterías no son simplemente situadas en el vehículo y conectadas al motor, sino que deben ser debidamente controladas y gestionadas para asegurar que proporcionan las características que se espera de ellas y para no acortar su vida. Además, es necesario tener en cuenta las precauciones que deben ser tomadas a la hora de fabricar o trabajar con una batería de este tipo para mantener la seguridad.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la sociedad está cada vez más concienciada con la contaminación y con un desarrollo sostenible, motivo por el cual se están imponiendo cada vez más restricciones a los vehículos de combustión interna, culpables de la mayor parte de la contaminación que se encuentra en las ciudades hoy día. La mayor apuesta para solventar este problema y desarrollar un transporte que no contamine, es el vehículo eléctrico. La gran limitación y el hecho fundamental de que hoy por hoy no sea la primera opción de compra reside en la autonomía. La autonomía del vehículo eléctrico viene dada por su capacidad de almacenar energía, es decir, la batería juega un papel fundamental en el desarrollo del vehículo eléctrico.

Por este motivo fabricantes e investigadores centran sus esfuerzos en obtener una tecnología para la batería que permita una gran autonomía y puedan ser realmente competitivos en el mercado actual.

En este punto se hará un pequeño análisis del funcionamiento de las baterías desde el punto de vista de la química y se estudiarán las diferentes tipologías desarrolladas hasta el momento así como las tendencias de desarrollo futuras y, como conclusión, una comparativa y un estudio de las ventajas e inconvenientes de las distintas tecnologías.

2.2. QUÍMICA DE LA BATERÍA

Existe una amplia gama de baterías en función de los componentes químicos utilizados para su construcción entre los que se pueden encontrar: plomo-ácido, níquel-cadmio, níquel-zinc, NiMH, zinc-bromo, zinc-cloro, zinc-aire, sodio-azufre, sodio-metal cloruro, Li-ion. Las propiedades de cada una de estas baterías son diferentes y depende del uso que se le vaya a dar así como de las preferencias del usuario. Uno de los hechos que marcó la victoria de una de las tipologías a finales del pasado siglo fue la elección de General Motors de baterías de Níquel Metal Hidruro para sus vehículos eléctricos puros. En la siguiente década Toyota y Honda desarrollaron la tecnología de los vehículos híbridos que ganaron popularidad por su ahorro de combustible, precio aceptable y baja contaminación, manteniendo la elección de las baterías de NiMH. Sin embargo, en la última década, ha surgido la necesidad de obtener una mayor densidad energética para el caso de vehículos eléctricos e híbridos enchufables, reabriendo así la discusión de las tecnologías de las baterías y dando una nueva oportunidad a las baterías de ion-Li en el mercado de los vehículos eléctricos.

2.3. OPERACIONES BÁSICAS DE LAS BATERÍAS RECARGABLES

Si bien es cierto que dependiendo del material utilizado a la hora de fabricar una batería se consigue mejorar unas propiedades respecto a otras, el principio de funcionamiento químico es el mismo para todas. En general, una batería está compuesta por un electrodo positivo, de potencial alto, y uno negativo, de potencial bajo, separados mediante un electrolito, basado en un ion conductor pero eléctricamente aislante.

Durante el proceso de carga el electrodo positivo es el cátodo y en él se lleva a cabo la reacción de reducción. El electrodo negativo será el ánodo produciéndose en él la oxidación. Durante la descarga la reacción se produce al revés, el cátodo es el electrodo positivo y el ánodo el negativo.

En una celda sellada, el líquido electrolito se mantiene en un separador para evitar el contacto directo entre los electrodos. Este separador tiene varias funciones, sirve como depósito para el electrolito en exceso, crea un espacio que permite la expansión del electrodo, en el caso de baterías NiMH es una trampa de amoníaco y en el caso de baterías ion-Li es un dispositivo de seguridad que previene la escasez del electrolito debida a la formación de dendritas de Litio.

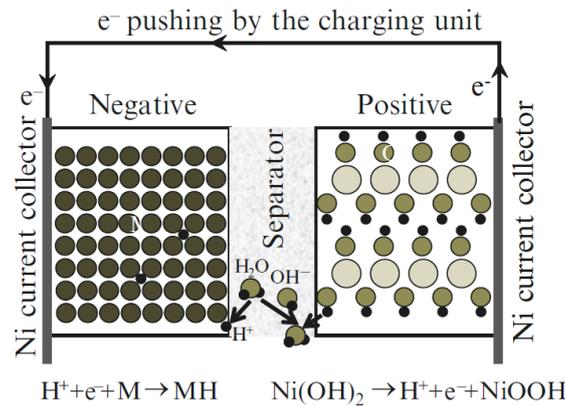


Figura 1: Esquema de la operación de carga de una batería de NiMH [García-Valle, 2012]

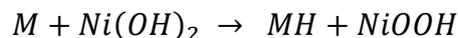
En la figura 1 se muestra un esquema de funcionamiento de una batería recargable de NiMH. El material activo en el electrodo negativo es el metal hidruro (MH), un tipo especial de aleación intermetálica que es capaz de absorber y soltar hidrógeno. La aleación más usada actualmente responde a la estructura AB_5 y se trata de una estructura cristalina de $CaCu_5$, donde A es una mezcla de La, Ce, Pr y Nd y B está compuesto por Ni, Co, Mn y Al.

El material activo en el electrodo positivo es $Ni(OH)_2$, que es la misma química que la usada en las baterías recargables de Ni-Fe y Ni-Cd patentadas por Thomas Edison hace más de cien años. El intrínseco $Ni(OH)_2$ tiene una conductividad pobre por lo que, para compensar esta deficiencia, en el producto comercial se implementa una coprecipitación con otros átomos, una formación de una red conductora fuera de la partícula o una estructura de recubrimiento multicapa.

El separador generalmente está hecho de polietileno injertado (PE) y polipropileno (PP).

El electrolito más usado comúnmente es una solución acuosa de 30 wt.%KOH con un valor de PH en torno a 14.3. En algunos diseños especiales para aplicaciones particulares, se añaden en el electrolito ciertas cantidades de NaOH y LiOH.

Durante el proceso de carga, se suministra tensión a través de la unidad de carga obteniéndose la división del agua en protones (H^+) e iones hidróxido (OH^-). El protón entra en el electrodo negativo (cátodo) y neutraliza con el electrón suministrado por la unidad de carga a través del colector de corriente. La tensión es equivalente a la presión aplicada por el hidrógeno en una reacción de cambio de fase y permanece en un valor casi constante hasta que los protones ocupen todos los espacios disponibles. En la superficie del electrodo positivo, algunos OH^- se recombinan con protones provenientes del $Ni(OH)_2$ y forman moléculas de agua. La reacción completa del proceso de carga es:



Dado que ni el agua ni el OH^- se consumen, el valor del pH permanece constante durante el proceso de carga y descarga. El estado de oxidación del Ni en $Ni(OH)_2$ es 2^+ . Puesto que los protones son consumidos en la superficie del electrodo positivo, más protones son conducidos fuera del volumen por medio de la tensión y de los gradientes de concentración. Perder un protón incrementa el estado de oxidación de Ni a 3^+ en NiOOH. Los electrones son recogidos por alguna forma de Ni o en la chapa perforada y se mueven de regreso a la unidad de carga para completar el circuito.

En el proceso de descarga se describen los mismos pasos pero en orden inverso. En el electrodo negativo los protones son enviados al electrolito y se recombinan con el OH^- mientras que los electrones son empujados a la carga externa. Los electrones vuelven a entrar por el lado del electrodo positivo de la batería a través de la carga externa y neutralizan los protones generados por la separación del agua en la superficie del electrodo positivo.

En la figura 2 se muestra un esquema similar al anterior, con las reacciones de dos medias celdas para la batería de Li-ion en el modo de carga:

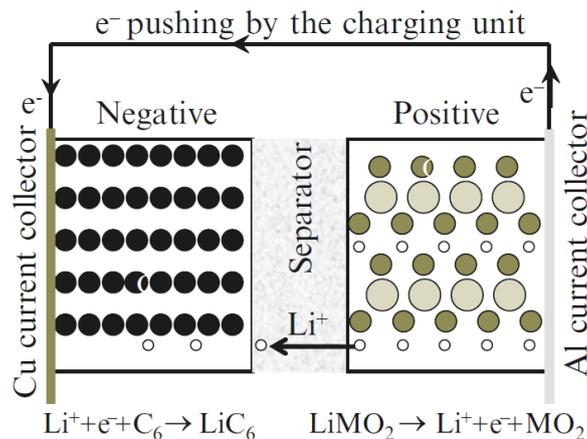
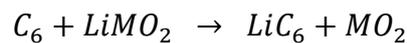


Figura 2: Esquema de la operación de carga de una batería de Li-ion [García-Valle, 2012]

La reacción completa es:



El material más usado en el electrodo negativo es el grafito. Durante la carga, los iones de Litio son conducidos por la diferencia de potencial suministrada por la unidad de carga, intercalándose en la región de la capa intermedia del grafito. La disposición de Li^+ en el grafito se coordina a través de la capa SEI (*Surface-electrolyte-interface*), que se forma durante la activación inicial del proceso. El material activo en el electrodo positivo es un óxido metálico con contenido de litio, que es similar al $\text{Ni}(\text{OH})_2$ en las baterías de NiMH, pero que reemplaza el hidrógeno por el litio. Durante la carga, el Li^+ salta a la superficie, se mueve a través del electrolito y, finalmente, llega al electrodo negativo. El estado de oxidación del metal de acogida, se incrementa y devuelve electrones al circuito externo. Durante la descarga el proceso es al revés. Los iones ahora se mueven desde los sitios de intercalación en el electrodo negativo al electrolito, y después al lugar original en el cristal LiMO_2 .

El electrolito comúnmente usado es una mezcla de carbonatos orgánicos como el carbonato de etileno, dimetil carbonato y dietil carbonato conteniendo fosfato de hexafluoruro (LiPF_6). El separador es una estructura multicapa de PP, que proporciona resistencia a la oxidación y PE, que proporciona una rápida velocidad de apagado en caso de cortocircuito.

2.4. TIPOLOGÍAS DE BATERÍAS

Las primeras baterías recargables aparecieron antes de 1880, y a partir de ese momento se empezaron a emplear en vehículos eléctricos. Hasta entonces se podían encontrar carruajes de tracción eléctrica con pila de energía no recargable. En 1900 los coches eléctricos eran los que más se vendían, fundamentalmente porque en los de gasolina los cambios de marcha eran muy bruscos, era necesario arrancarlos con manivela y había que conseguir combustible, lo que no era fácil. En este momento la autonomía y precio de los vehículos eléctricos eran aceptables pero se seguía investigando en baterías que pudieran mejorar las propiedades. En esta época se inventó el motor de arranque, eliminando con ello el uso de la manivela para arrancar los coches de gasolina. Además, la apertura de carreteras al tráfico hizo que la autonomía de los vehículos se convirtiera en una característica muy valorada, haciendo que los coches de gasolina ganaran el pulso a los eléctricos.

En 1990, en vista de la creciente demanda de combustibles fósiles para el transporte y con la concienciación de la reducción de emisiones de los vehículos, se intensificó el desarrollo de los vehículos eléctricos produciéndose grandes avances en la investigación y desarrollo de las baterías de tracción para EV.

Desde su invención hasta el día de hoy se han desarrollado diferentes tipos de baterías eléctricas. En función del material a usar se mejoran unas propiedades y se empeoran otras por lo que los esfuerzos se centran en encontrar el sistema que mejore todas las propiedades o que, al menos, encuentre una solución de compromiso entre las mismas. A continuación se hará un análisis de las tipologías más comunes, destacando su principio de funcionamiento y sus características principales [[Dhameja, 2002](#)].

2.4.1. BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO

Existen dos categorías de baterías de plomo-ácido disponibles en el mercado, las selladas y las inundadas. El funcionamiento de las mismas es diferente así como la necesidad de mantenimiento:

Baterías selladas:

Las baterías selladas están formadas por AGM o gel lo que implica que, al no evaporarse, no necesitan agua, por lo que son también denominadas baterías libres de mantenimiento. Otro nombre común es VRLA puesto que aunque está típicamente sellada, si la carga o la descarga es lo suficientemente alta, se acumulará una presión y la válvula (vent) permitirá la expulsión controlada de gas. Además, tanto el AGM como el gel mantienen el electrolito mezclado con el agua, evitando que se asiente en el fondo dando lugar a la estratificación.

La batería sellada con AGM se parece a la inundada en que ambas usan placas estándar. En este caso, la estera de vidrio actúa como una esponja para absorber y contener el electrolito libre. Esta tipología permite la recombinación, es decir, el intercambio de oxígeno entre las placas. Al mismo tiempo, la estera de vidrio proporciona la separación eléctrica entre las placas positiva y negativa de la batería.

El espesor de la estera de vidrio determina el grado de absorción de la solución del electrolito. Cuanto mayor sea la capacidad de almacenar electrolito, menor es la posibilidad de que la célula se seque, evitando el contacto de las placas. El vent de seguridad del AGM es la segunda diferencia del diseño de la batería de plomo-ácido inundada. La válvula evita la expulsión de oxígeno durante la operación normal de la batería manteniendo así la presión interna de la batería para la recombinación del electrolito. Además, actúa como un dispositivo de seguridad en la prevención de chispas y, en caso de acumulación excesiva de la presión del gas, el respiradero actúa como relevación.

En las baterías VRLA basadas en tecnología de gel, también se usan placas y electrolito como en el caso de las inundadas, pero en este tipo, se añade al electrolito una forma pura de sílice que lleva a la formación de un gel ácido. A medida que el gel se va secando, aparecen grietas que permiten la difusión de oxígeno entre las placas positiva y negativa, obteniendo así una tecnología de gel recombinante que mejora la vida de la batería.

La tecnología de gel, como en la batería de AGM, también cuenta con un respiradero (vent) para mantener la presión interna de la batería, previniendo la expulsión del hidrógeno y el oxígeno durante una operación anormal de la batería.

El volumen del electrolito disponible es un factor importante en la determinación del comportamiento de la batería. Además, el diseño AGM tiene el mayor rendimiento porque tienen la menor resistencia interna.

Baterías inundadas

Por su parte, las baterías inundadas permiten que el fluido en forma de hidrógeno y oxígeno escape durante la carga. Estas fugas hacen que sea necesario medir el nivel de agua y, cuando lo requiera rellenarlo, por lo que necesitan mucho más mantenimiento que las baterías selladas. Como ventaja, las baterías inundadas pueden estar excesivamente cargadas con menos riesgo de daño que las selladas, lo que se puede aprovechar para recibir una carga excesiva periódicamente de modo que se igualen las células de la batería y se consiga un estado completo de carga base regular.

La reposición de agua destilada en una batería inundada se realiza dentro de cada una de las celdas por medio de una tapa (vent cap). En la actualidad, algunos grandes sistemas de aplicación de potencia ininterrumpida usan baterías de plomo-ácido inundadas como una solución de reserva. Aunque la vida

está en torno a unos 20 años, son conocidas por ser operacionales durante un largo tiempo, pudiendo llegar a los 40 años.

El diseño de las baterías plomo-ácido inundadas incluye placas negativas intercaladas entre placas positivas, ambas hechas de plomo (o de una aleación de plomo) con calcio o antimonio como aditivo. El separador es un material microporoso que permite que la reacción química tenga lugar evitando que los electrodos entren en contacto.

Las placas positiva y negativa son unidas mediante un material activo, óxido de plomo (PbO_2) y, a veces, sulfato de plomo ($PbSO_4$). El material activo proporciona una gran superficie para el almacenamiento de energía electroquímica. Cada placa positiva es soldada junta y unida al terminal positivo (+). Usando la misma soldadura, cada placa negativa es soldada junta y unida al terminal negativo (-). El ensamblaje de la placa se coloca dentro de una carcasa de polipropileno. La carcasa con el vent cap, el supresor de llamas y el agujero del hidrómetro es colocado dentro del contenedor ensamblado. El contenedor ensamblado se llena con una solución de electrolito que es una combinación de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y agua destilada.

Sobre la carga o la aplicación de una corriente eléctrica, la batería inundada de plomo-ácido sufre una reacción electroquímica, creando un potencial o tensión en la celda. Basándose en el principio de la electroquímica, dos metales distintos (placas positivas y negativas) tienen una diferencia de potencial (tensión de la celda). Sobre el ensamblaje de las placas, se coloca una carga flotante en la batería para mantener la carga o la polarización de las placas.

Durante la fase de carga, el agua en la solución del electrolito se separa por medio de la electrólisis. El oxígeno envuelve la placa positiva y el hidrógeno la negativa. La evolución del hidrógeno y el oxígeno resulta en un 30% recombinado. Una batería con una eficiencia mayor conlleva que no se requiere rellenar el agua, lo que reduce el coste de mantenimiento comparado con las baterías inundadas. Éste factor de recombinación es el que da a la batería VRLA su gran eficiencia, que está en torno al 95 – 99%. En este tipo de baterías, la ventilación especial y los requerimientos de contenido de ácido son mínimos, permitiendo colocar a la batería junto con los componentes electrónicos.

2.4.2. BATERÍA DE NiMH

La batería de NiMH es considerada el sucesor del mayor dominador del mercado a lo largo del tiempo, el Níquel-Cadmio. El sistema de baterías de Ni-Cd tuvo un comienzo modesto pero con los significativos avances de las últimas cuatro décadas, desde 1950 la capacidad específica de las baterías ha mejorado enormemente. Un fuerte crecimiento en el consumo de la batería recargable acaecido en el mercado debido al gran aumento de la demanda de ordenadores portátiles, móviles y videocámaras, empujó al desarrollo de los requerimientos de rendimiento de la batería, particularmente la duración de servicio, aún más. Este factor junto con la concienciación medioambiental, han acelerado el desarrollo del sistema alternativo NiMH.

Como parte del diseño de las baterías de NiMH, se han estudiado las aleaciones AB_5 ($LaNi_5$) y compuestos de la aleación AB_2 ($TiNi_2$). Ambas aleaciones tienen similares capacidades de almacenamiento de oxígeno, aproximadamente de 1,5% por peso. La capacidad de almacenamiento de hidrógeno máxima teórica de la aleación de AB_2 es un poco más alto, 2% en peso, que el máximo de 1,6% en peso para las aleaciones de AB_5 . Éste comportamiento puede explicarse solo si el tamaño de la batería es mayor, lo que es un factor indeseable para los diseños compactos de las baterías de EV. El concepto básico del cátodo de una batería de NiMH resulta de la búsqueda de aleaciones metálicas que puedan capturar (y soltar) hidrógeno en volúmenes de hasta mil veces el suyo propio. El cátodo consiste principalmente en una masa comprimida de partículas finas de metal. Los átomos de hidrógeno, mucho más pequeños, son fácilmente absorbidos dentro de los intersticios de un átomo bimetálico, que es conocido por expandirse hasta un 24% en volumen.

Incluso para una batería de pequeño tamaño de NiMH, la mayor densidad de energía de la aleación AB_5 es aproximadamente de 8 a 8.5 g/cm^3 , comparado con la relativamente baja densidad de la aleación de AB_2 , en torno al 5-7 g/cm^3 resulta una batería con una densidad de energía comparable.

El convencional, aunque no muy económico proceso de fabricación de los materiales de la batería AB₅ incluye:

1. Fusión y rápido enfriamiento de lingotes de metales grandes.
2. Tratamiento de calor extensivo para eliminar heterogeneidades microscópicas de la composición.
3. Rotura de los lingotes en piezas pequeñas mediante un proceso hidráulico.
4. Molido de los trozos de lingote recocidos en polvo fino.

Este proceso de fabricación de 4 pasos es el factor limitador de la extensa comercialización de las baterías de NiMH pero puede ser eliminado y reemplazado por un único paso usando un proceso de solidificación rápida del polvo de AB₅ mediante un gas de atomización de alta presión. El comportamiento de absorción y desorción del gas H₂ de la aleación atomizada a alta presión, es significativamente mejorada con el recocido en polvo.

2.4.3. BATERÍA DE Li-ion

Las baterías de Li-ion es el tercer tipo más comercializado para aplicaciones de EV. Dado que el Litio es el metal con el mayor potencial negativo y el menor peso atómico, las baterías que usan Litio tienen el mayor potencial para alcanzar el avance tecnológico que proporcionará a los EV las mayores características de rendimiento en cuanto a aceleración y autonomía. Desafortunadamente, el metal Litio es altamente reactivo con el aire y con la mayoría de los electrolitos líquidos. Para eliminar los problemas asociados con el Litio, se intercala con carbono grafito (Li_xC), dando buenos potenciales para el alto comportamiento, mientras se mantiene la celda segura.

Durante una descarga de una batería de Li-ion, los iones de Litio (Li⁺) son expulsados desde el ánodo y viajan a través de un electrolito orgánico hasta el cátodo. Los electrolitos orgánicos (no acuosos) son estables frente a la reducción del Litio. La oxidación en el cátodo es necesaria ya que el Litio reacciona químicamente con el agua de electrolitos acuosos. Al llegar al cátodo, los iones de Litio se incorporan rápidamente al material del cátodo, siendo un proceso fácilmente reversible. Debido a la rápida reversibilidad de los iones de Litio, las baterías de Li-ion pueden cargarse y descargarse más rápidamente que las baterías de Pb-ácido o NiMH. Además, las baterías Li-ion producen la misma cantidad de energía que las celdas de NiMH pero es un 40% más pequeña y pesa la mitad, permitiendo usar el doble de baterías dentro de un EV, duplicando la capacidad de almacenamiento de energía y aumentando la autonomía del vehículo.

En la actualidad se están estudiando varios tipos de materiales para usarse en las baterías de ion-Li. Para el ánodo, se consideran varias formas de carbón, particularmente grafito así como materiales de carbón contenedores de hidrógeno. En el caso del cátodo se tienen en cuenta tres tipos de óxidos de transición: Cobalto, Níquel y Magnesio. Inicialmente, el desarrollo de estas baterías estaba encaminado hacia el óxido de cobalto, que es técnicamente preferible ante los óxidos de níquel o magnesio. Sin embargo, es el más caro de los tres, siendo el níquel sustancialmente más barato y el manganeso el más barato.

En baterías de Li-ion donde se usan los cátodos de óxido de Cobalto, los cátodos actualmente se fabrican de una hoja de aluminio con una capa de óxido de Cobalto. Los ánodos se fabrican usando una delgada hoja de cobre revestida con materiales de carbono. Las hojas se separan con un separador plástico, después se enrollan y se colocan dentro de un envase de acero lleno de un electrolito líquido que contiene el Litio hexafluoro-fosfato. Estas baterías tienen una tensión de circuito abierto (OCV) de aproximadamente 4.1 V a carga completa.

Además de su potencial para la energía específica, las baterías de Li-ion tienen también un potencial excepcional para vida larga. Bajo la operación normal, existen unos pocos cambios estructurales de los ánodos y los cátodos mediante la intercalación y retirada de los iones de Litio más pequeños. Adicionalmente, la alta tensión y el diseño convencional de las baterías de Li-ion mantienen la promesa del bajo coste de la batería, especialmente cuando el Cobalto se reemplaza por Manganeso.

La sobrecarga de las baterías de Li-ion, como con las baterías de Pb-ácido y NiMH, deben ser cuidadosamente controladas para prevenir el daño en la batería en la forma del electrodo o descomposición del electrolito. Puesto que el electrolito en baterías de Li-ion es no acuoso, los gases asociados a la disolución del agua son eliminados. El desarrollo de sistemas de gestión de baterías avanzados es la clave para asegurar el comportamiento seguro de este tipo de baterías durante el proceso normal de operación así como en caso de accidente en el vehículo. Al igual que con las baterías de Pb-ácido y NiMH, los sistemas de carga de las baterías de Li-ion deben ser capaces de trabajar con los sistemas de gestión de baterías para garantizar que no se produzca una sobrecarga. Las baterías de Li-ion ofrecen mayor energía por unidad de peso y volumen y, además, son amistosas con el medio ambiente en comparación con las basadas en Níquel, usado en la química de las baterías de NiMH.

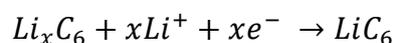
La comercialización de este tipo de baterías de Li-ion se logró bastante rápido en los años sesenta y setenta. El desarrollo de las baterías recargables de Litio fue mucho más lento que en el caso de Pb-ácido y NiMH debido a los fallos de las celdas de la batería causadas por la formación de dendritas. Para superar el fallo de la batería, se propusieron soluciones alternativas al Li metálico. Un diseño innovador basado en carbono y llamado mecedora o volante donde los iones de litio se transportan entre el ánodo y el cátodo, forma uno de estos materiales alternativos. Durante el proceso de descarga, los iones de Litio se mueven del cátodo al ánodo. La tensión del ánodo litiado está cerca de la del litio metálico (aproximadamente +10mV) y, entonces, la tensión de la celda no se reduce significativamente.

Los iones de Litio se transportan entre el ánodo y el cátodo con la mínima o ninguna disipación del litio metálico en la superficie del ánodo como en el caso de baterías recargables de Litio metálico haciendo que el uso de la batería de ion-Li sea seguro.

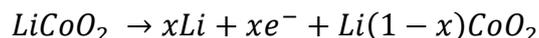
El estado sólido de las baterías de Li-ion ofrece muchas ventajas sobre las de electrolito líquido. Aunque las baterías de Li-ion líquidas estuvieron activas durante varios años, las baterías de Li-ion de estado sólido fueron introducidas en 1995 en los mercados comerciales y actualmente su presencia en el mercado es sustancialmente mayor. La temperatura de operación de estas baterías se encuentra entre -20 y 60°C.

Sony Corporation incorporó el concepto mecedora en el diseño de las celdas de Li-ion para aplicaciones comerciales. Desde que fue introducido en el mercado en 1991 los esfuerzos de desarrollo han sido crecientes. Sony Corporation anunció un incremento de la producción de 15 millones de baterías al mes en 1997. El desarrollo del electrolito de gel polimérico fue desarrollado por temas de seguridad. Sony desarrolló un electrolito retardante de fuego que forma una piel de moléculas de carbono que previene la evaporación de los solventes orgánicos y aísla el electrolito del oxígeno de combustión.

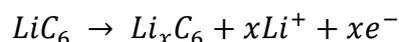
Durante el proceso de carga, la ecuación de la celda del ánodo de la batería de Li-ion es:



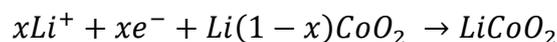
Y la ecuación de la celda del cátodo:



Durante el proceso de descarga, la ecuación de la celda del ánodo es:



Y la ecuación del cátodo es:



2.4.4. BATERÍA DE POLÍMERO DE LITIO

Las baterías de polímero de Litio son el cuarto tipo de baterías comercializadas para aplicaciones EV. El descubrimiento de sólidos no metálicos capaces de conducir iones ha permitido el desarrollo de estas baterías, que tienen ánodos hechos de Litio o de Litio intercalado con Carbono. Actualmente se están realizando estudios de un tipo de cátodo que contiene óxido de Vanadio (V_6O_{13}). Esta química particular de las baterías tiene uno de los mayores potenciales para la más alta energía específica y potencial. Desafortunadamente, los desafíos de diseño asociados con la cinética de los electrodos de la batería y la capacidad del cátodo y el ánodo de absorber y liberar iones de litio, han resultado en una potencia específica menor y limitados ciclos de vida para las baterías de Litio-polímero.

El colector actual de las baterías de polímero de Litio está típicamente hecho de cobre u hojas de aluminio rodeadas por materiales conductores a baja temperatura, tales como poliuretano. En el caso de la batería, está hecho de polipropileno, polipropileno reforzado o poliestireno.

Las baterías de polímero de Litio son consideradas baterías de estado sólido dado que su electrolito es un sólido. El polímero del electrolito más común es el óxido de polietileno complejado con una sal electrolítica apropiada. El polímero puede conducir iones a temperaturas en torno a 60°C , permitiendo la sustitución de electrolitos líquidos inflamables por polímeros de alto peso molecular. Dado que la conductividad de estos polímeros es baja, las baterías deben estar construidas en películas finas de espesor entre 50 a $200\mu\text{m}$. Mediante este tipo de construcciones, se obtiene un gran avance en la seguridad de las. Puesto que la batería es de estado sólido por diseño, los materiales no fluirán juntos y el electrolito no se escapará en caso de que haya una rotura de la carcasa durante un accidente en el vehículo. Puesto que el Litio es intercalado dentro de ánodos de Carbón, el Litio está en forma iónica y es menos reactivo que el Litio metálico puro. Otra gran ventaja de este tipo de construcciones de baterías es que una batería de polímero de Litio puede ser formada en cualquier tamaño o forma, permitiendo a los fabricantes de vehículos una flexibilidad considerable en la manera en que la batería es incorporada dentro del diseño futuro del vehículo.

2.5. COMPARATIVA DE NiMH Y ion-Li EN PHEV

La mayoría de los resultados del comportamiento de las baterías viene de laboratorios que realizan pruebas de las mismas a escala pequeña. Para poder comparar el comportamiento de las baterías, se han seleccionado dos fabricantes: para NiMH el fabricante Primearth EV Energy Co. [Energy EV] y, para las baterías de Li-ion, el fabricante Hitachi Vehicle Energy Ltd. [Higashimoto, 2010]

En la tabla 1, que incluye dos tipos de baterías de NiMH, con carcasa plástica o metálica, se recogen los comportamientos estáticos de estas dos clases de baterías [Young, 2010].

Tabla 1: Comparación de baterías de VEH

	NiMH	Li-ion
Fabricante	PEVE	Hitachi
Forma	Prismática	Cilíndrica
Material de la carcasa	Metal	Plástico
Cátodo	$\text{Ni}(\text{OH})_2$	LiMn_2O_4
Ánodo	Tierra rara AB_5	Carbón amorfo
Capacidad de la celda (Ah)	6.5	4.4
Tensión de la celda (V)	1.2	3.3
Energía específica (Wh/kg)	41	56
Potencia específica (W/kg)	1200	3000
Temperatura de operación ($^{\circ}\text{C}$)	-20 a 50	-30 a 50
Mercado	Toyota-HEV	GM-HEV (2012)

Cabe destacar que la carcasa metálica en el caso de la batería NiMH permite mejorar en un 40% la refrigeración de la batería. Además, la batería de carcasa plástica se basa en módulos de 6 celdas, mientras que la de la carcasa metálica cuenta con 8 celdas. Este efecto se deja ver en el voltaje por celda, tal como puede apreciarse en la tabla 3.

A efectos de la tabla 1, podría concluirse que la batería más ventajosa es la de Li-ion, dado que presenta mayores valores en la energía específica y potencia de salida, características fundamentales en las baterías de tracción.

Sin embargo, haciendo un estudio más exhaustivo de las características, se obtiene que la superioridad de energía específica que presenta la batería de Ion-litio se ve limitada por el estado actual de desarrollo. A nivel de celda, la energía específica del Li-ion es un 20% mayor que la de NiMH. Sin embargo, si se tiene en cuenta el sistema de refrigeración de las baterías, las de NiMH permiten obtener una mayor energía específica a nivel sistema mientras que las de Li-ion requieren una estructura que añade peso, debido al refrigerante, compresor y evaporador. Así mismo ha de tenerse en cuenta que el sistema de gestión es más sencillo en el caso de NiMH, haciéndolo más simple y ligero que el de Li-ion, que precisa control a nivel de celda.

Otro factor que declina la balanza es el sobredimensionamiento con el que deben diseñarse las baterías de Li-ion, necesario para solucionar el problema del corto tiempo de vida de las mismas (Puede verse en GM Volt que solo entre el 50 y el 70% de la energía es utilizable, para asegurar que tenga un tiempo de vida aceptable).

Desde la perspectiva más práctica, mirando a nivel vehículo, las baterías de Li-ion no necesariamente aportan una mayor densidad de energía. Esto explica la diferencia de autonomía observada entre las recién desarrolladas baterías de Li-ion (Nissan Leaf EV: 80-100 millas) y las baterías usadas desde hace cincuenta años de NiMH (EV-1: 180 millas).

Otro punto importante en este estudio es la comparación en el comportamiento de la potencia. Los datos mostrados en la tabla 1 indican los valores de potencia de salida que ayudan al motor durante la aceleración en PHEV. En cuanto a la potencia de entrada, ambos tipos de batería tienen la misma impedancia durante la carga y la descarga, al contrario que en baterías plomo-ácido, que tienen una impedancia de carga tres veces mayor que la de descarga. Teóricamente, una batería de Li-ion debe ser capaz de obtener una potencia de 3000 W/kg durante el frenado. Sin embargo, la gestión de energía de las baterías modernas de Li-ion, por lo general utilizan un factor de seguridad de 3 unidades para reducir el riesgo de formación de dendritas de litio así como un calentamiento excesivo de la batería. Por lo tanto, en la práctica, las baterías de ion-Li están limitadas a una potencia de 1000 W/kg a nivel de celda, con este valor disminuyendo aún más si se tiene en cuenta el peso de la refrigeración y el sistema de control.

2.6. ESTADO ACTUAL

Las baterías de NiMH, fabricadas principalmente por Sanyo y Primearth EV Energy Co. (PEVE), dominan las líneas de producción masiva de los vehículos HEV actualmente [Young, 2010]. Mientras las baterías de PEVE son prismáticas (de forma rectangular), las de Sanyo son cilíndricas. Otros fabricantes de este tipo de baterías que se encuentran actualmente en el mercado son Gold Peak, Corun y TMK. Sin embargo, ni la resistencia ni la consistencia del producto han sido aún probados en estos nuevos fabricantes.

Para realizar una comparación [Young, 2010], se van a estudiar dos vehículos eléctricos puros que están actualmente disponibles en el mercado. Uno es el lujoso Roadster (\$109000 en USA) de Tesla Motors que está equipado con 6831 baterías de Li-ion(LiMn₂O₄). Estas baterías son pequeñas y cilíndricas (tamaño 18650). El otro es el Nissan Leaf (\$32780 en USA), que tiene 192 celdas prismáticas de Li-ion (LiMn₂O₄) de AESC. Como puede apreciarse la tecnología utilizada para las baterías es la misma, sin embargo, cada fabricante sigue una estrategia en el diseño y tamaño de las celdas unidad que conforman la batería.

Mientras que el esfuerzo en investigaciones y desarrollo de la química de las baterías de NiMH se acabó hace 15 años, aún existen investigaciones en el caso de las baterías de ion-Li para aplicaciones de tracción. El debate sobre qué materiales para el ánodo y para el cátodo son mejores aún continúa. El problema es que ninguno de los candidatos es perfecto. En la tabla 2, se puede apreciar una lista de los materiales candidatos para el cátodo y el ánodo.

Tabla 2: Comparación de los materiales para ánodo y cátodo en baterías Li-ion [Young, 2010]

Material	Capacidad específica mAh/g	Tensión vs . L ⁺ /Li, V	Características
LiCoO ₂	160	3.7	Más comúnmente utilizada en productos de consumo. Buena capacidad y ciclo de vida pero cara e insegura en carga rápida. Es el más usado en ordenadores portátiles aunque puede incendiarse.
LiMn ₂ O ₄	130	4	Más comúnmente usada en automoción, bajo coste, rango de capacidad aceptable, corto tiempo de vida y ciclo de vida. Medianamente usado en teléfonos móviles
LiFePO ₄	140	3.03	Bajo coste, buen ciclo de vida y capacidad de energía pero baja capacidad y tiempo de vida
NMC	140	3.3	Bajo coste, mayor capacidad, vida menor que en NCA
NCA	185	4.2	La más alta capacidad, bajo coste pero presenta problemas de seguridad
Grafito	372	0.0-0.1	Más comúnmente usada en todas las aplicaciones. Bajo coste.
LTO	168	1.0-2.0	Los más altos tiempos y ciclos de vida pero alto coste y baja densidad de energía
Silicona	3700	0.5-1.0	Aún en investigación. Alta energía pero alto volumen de expansión durante la carga

Mayor seguridad en las baterías de ion-Li, conlleva a una significativamente menor densidad de energía. El balance entre el comportamiento y la seguridad es el hándicap actual en esta tecnología.

2.7. TENDENCIAS DE DESARROLLO

Mientras que las ventajas de ion-Li sobre NiMH y plomo-acido en energía específica y potencia eran obvias, el potencial de los supercondensadores en aplicaciones de mucha mayor potencia no puede ser pasado por alto. Una buena tendencia sería combinar la densidad específica superior ofrecida por la batería, con la potencia específica superior dada por los supercondensadores. Los supercondensadores ofrecen una energía de reserva para un acceso rápido y protege a la batería de fluctuaciones muy rápidas [Strunz, 2009]. Los requerimientos impuestos por USABC para HEV, PHEV y BEV [United State Council for Automotive Research LLC] se describen en la figura 3. Mientras que las metas para HEV y PHEV están casi alcanzadas tanto en Li-ion como en NiMH, las metas para BEV están muy lejos de la tecnología actual. En la gráfica 3, se muestra la tendencia de desarrollo de BEV en tres diferentes sistemas: NiMH, Li-ion y baterías de aire-metal.

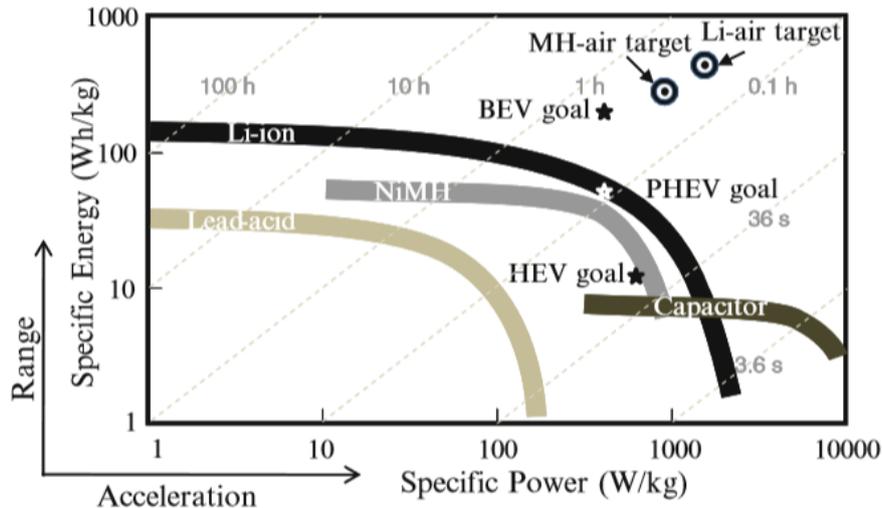


Figura 3: dispositivos de almacenamiento de energía electroquímicos utilizados en la aplicación de propulsión [García-Valle, 2012]

La investigación actual de NiMH para EV se centra en las siguientes áreas: aleación MH, fase γ NiOOH, electrolito no acuoso y estructura bipolar. Mientras el objetivo de las dos primeras áreas es obtener mayores energías específicas, las otras dos se basan en obtener mayores densidades de potencia. La aleación AB_5 MH, actualmente usada, tiene una capacidad de almacenamiento de hidrógeno de 1.2 wt%, que es equivalente a un almacenamiento electroquímico de 322 mAh/g. Los reemplazos potenciales para AB_5 son A_2B_7 (1.5% en peso), AB_2 (2.0% en peso), solución sólida de Ti – V – Cr (3.0% en peso) y aleación basada en MgNi (3.6% en peso). Se demostró una capacidad de media celda de más de 790 mAh / g a partir de la combinación de hilado por fusión y aleación mecánica para MgNi [Ovshinsky, 1997]

En el material activo positivo, la transición actual β -Ni(OH) $_2$ -NiOOH puede suministrar un hidrógeno por cada Ni, mientras que γ NiOOH puede suministrar hasta 1.7 hidrógenos por cada Ni. La γ NiOOH convencional se obtiene a partir de insertar moléculas de agua con aniones entre los planos NiO $_2$, provocando una gran expansión de la red y deteriorando el ciclo de vida. La nueva fase γ se puede formar sin expandir la red, dopando los huecos de la matriz Ni(OH) $_2$ con otros elementos [Ovshinsky, 1997]. En el electrolito, la tensión operacional de las baterías de NiMH actuales está limitada por la electrólisis del H $_2$ O. Reemplazando la base de agua del electrolito por un gel líquido o una membrana de protones conductores, se habilita el uso de materiales activos positivos y negativos con tensiones mucho mayores. El último área de investigación de NiMH es la estructura bipolar. Aunque el rango teórico de carga y descarga del NiMH es muy alto, está limitado por el calor de transferencia de la celda. Adoptando una estructura bipolar con agua refrigerante corriendo a través de la placa de conexión, Kawasaki ha sido capaz de aumentar la capacidad de NiMH sustancialmente [Kawasaki, 2018].

Las investigaciones actuales relativas a las baterías de Li-ion para aplicaciones EV son similares a las de NiMH: nuevo cátodo de óxido de metal con mayor capacidad, mayor capacidad de ánodo y un nuevo electrolito con un alto potencial de oxidación. En el material del cátodo, solo alrededor del 50% del Li es actualmente extraído durante cada operación de carga. Con una alta tensión de carga, se puede transferir mayor cantidad de Li al ánodo permitiendo así, aumentar la capacidad. En el área del ánodo, el Si tiene una capacidad teórica muy alta (alrededor de 10 veces la del grafito). Sin embargo, la expansión de la red después de una carga completa puede llegar al 270%. Una posible solución para obtener una capacidad ultra-alta de Si, es aleando el silicio con un material inerte o depositándolo en algún tipo de estructura soporte.

El tercer área de interés es el electrolito: Similar al caso del NiMH, la tensión de la celda de Li-ion está limitada a 4.2 V, a partir de esa tensión el solvente empieza a oxidarse. El uso de otro electrolito con un mayor potencial de oxidación puede permitir el uso de ánodos de alta tensión, como LiCoPO $_4$ [Allen, 2010], que pueden aumentar la energía específica.

El último enfoque trata de las baterías aire-metal. Reemplazando el electrodo positivo por un electrodo de aire de combustible se puede reducir sustancialmente el peso de la batería e incrementar tanto la potencia como la energía específicas. Este es un enfoque factible para alcanzar la meta de USABC EV.

En la actualidad están en vías de desarrollo otras tipologías de baterías con elementos novedosos que pueden ser una gran solución si se llega a desarrollar completamente la tecnología:

- **Baterías y supercondensadores de grafeno** [Ramos, 2018]: Los electrodos de grafeno consiguen que la carga y la descarga de la batería sea más rápida que con los ánodos convencionales, ya que mantienen mejor la energía que los de grafito con una carga diez veces más rápida. Algunos experimentos que se están llevando a cabo se basan en introducir pequeños agujeros en las hojas de grafeno o mezclarlo con óxido de vanadio, obteniendo densidades energéticas de 700 Wh/kg (lo que triplicaría la autonomía del EV). El grafeno podría usarse también como material activo, obteniendo baterías con mucha potencia que pueden ser cargadas en pocos segundos.
- **Baterías de magnesio** [Pastor, 2016]: Se estudia como alternativa a las baterías de litio obteniendo como mayor ventaja el uso de materiales sólidos, sin necesidad de compuestos líquidos o inflamables. Aunque la manipulación del magnesio es algo más compleja que la del litio, se trata de un componente abundante que no genera riesgos de explosión y que tiene dos cargas positivas frente a una única carga positiva del litio, lo que permite almacenar el doble de energía en el mismo volumen. El principal obstáculo reside en el electrolito, es decir, el material que transporta la carga entre el ánodo y el cátodo.
- **Baterías de kevlar**: Este proyecto se basa en el desarrollo de membranas a partir de kevlar de un tamaño nanométrico que se encargarían de aislar los electrodos y obligarían a los iones de litio a seguir un circuito adecuado y más eficiente. El kevlar es un buen aislante, lo que es una propiedad fundamental para las piezas de separación de los electrodos, evitando así cortocircuitos entre ellos. Además de mejorar la seguridad, debido al pequeño grosor de las capas aislantes puede reducirse drásticamente el tamaño o, lo que es lo mismo, almacenar mucha más energía en el mismo volumen.

2.8. CONCLUSIONES

Tal como se ha desarrollado a lo largo de este capítulo, existen numerosas tipologías de baterías. En función de las propiedades que más interesen a los fabricantes está en sus manos elegir uno u otro tipo. En la tabla 3 se muestra un resumen de las ventajas e inconvenientes de las baterías vistas hasta el momento:

Tabla 3: Ventajas e inconvenientes de las baterías

	Ventajas	Inconvenientes
Plomo-ácido	Bajo coste, estandarización universal, buena potencia específica (tecnología fiable y bien conocida). Tiene una de las autodescargas más bajas de las baterías recargables y buena capacidad para altas tasas de descarga.	Densidad de energía muy baja (hasta 40 Wh/kg). No puede ser almacenada en estado de baja carga. Número limitado de ciclos de descarga completa, no permite carga rápida (duración entre 8 y 16 horas). Contiene plomo y ácido que dañan al medio ambiente.
NiMH	Baja potencia específica (la mitad que ion-Li). Bajo coste de fabricación, disponible en cualquier tamaño. Mantiene la corriente constante a lo largo del tiempo.	Rápida autodescarga y bajo ciclo de vida (en comparación con otros tipos), no funcionan bien a bajas temperaturas y se calientan demasiado, pudiendo dañar el dispositivo.
Li-ion	Son las más seguras por su alta estabilidad térmica y química, más baratas y con el doble de capacidad que las de plomo-ácido. Mantienen todo su voltaje hasta el mismo momento de la descarga. Autodescarga muy lenta, pueden colocarse en cualquier orientación, no le afectan las vibraciones y pueden cargarse al 90% de su capacidad en 15 minutos	Baja densidad energética, número limitado de cargas, costosas y pueden explotar si se sobrecalientan. Peor capacidad de trabajo en frío y tensión muy variable.
Polímero de Litio	Delgadas y livianas, se pueden empaquetar de cualquier forma. No requieren mantenimiento, baja descarga durante su almacenamiento y en pequeñas cantidades sin inocuas para el medio ambiente	Más caras, menor densidad y mayor costo-energía que las de ion-litio, menor capacidad, degradación con el tiempo y difíciles de transportar puesto que pueden explotar si son perforadas

Dado que en automoción las baterías más usadas en la actualidad son las de NiMH y las de ion-Li, se ha desarrollado un apartado comparando los comportamientos de ambas, a modo de resumen se presenta la tabla 4 en la que se ofrece una comparativa de otro tipo de conceptos:

Tabla 4: Comparativa NiMH Vs Ion-Li

Tipo de batería	NiMH	Ion-Li
Ciclo de vida	Variable: necesaria precaución en almacenamiento y carga	Corto: 300-500 ciclos, lo que equivale a 2-3 años
Auto descarga	Rápida: 20-30%	Muy lenta o nula
Capacidad	Moderada: 2,2 – 3 Ah	Alta: Más de 3 Ah
Tiempo de carga óptimo	Rápido	Moderado
Mantenimiento	Moderado: Descarga total recomendada una vez cada tres meses	Ninguno
Efecto memoria	Moderada: Puede evitarse mediante una carga adecuada	Ninguno
Sensibilidad	Muy sensible a la temperatura	Sensible al calor y al impacto

Como resultado de este estudio, se puede concluir que la mejor opción a día de hoy para vehículos eléctricos es el uso de baterías de ion-Li. Dentro de esta tipología pueden encontrarse diferentes tipos, cada una con alguna propiedad mejorada en detrimento de otra. Centrando los esfuerzos en encontrar una solución de compromiso que mejore todas o la mayoría de las propiedades, puede esperarse que en un futuro no muy lejano se consigan baterías que ofrezcan la misma autonomía que un vehículo de combustión interna sin que existan repercusiones en el coste.

3. TECNOLOGÍA DE LAS BATERÍAS

3.1. INTRODUCCIÓN

La electrificación es el camino más viable para alcanzar el transporte limpio y eficiente que es crucial para el desarrollo sostenible del mundo entero. En un futuro cercano, los vehículos eléctricos (EVs), incluyendo los eléctricos híbridos (HEVs), eléctricos híbridos enchufables (PHEVs) y los eléctricos de baterías puras (BEVs) dominarán el mercado de vehículos limpios [Howell, 2010; Boulanger, 2011].

La importancia de las baterías de los EVs ha sido verificada a lo largo de la historia. El primer vehículo eléctrico fue visto en las carreteras tras la invención de las baterías de plomo-ácido recargables y los motores eléctricos a finales de 1800 [Baker, 2010]. En los primeros años del siglo XX hubo un periodo de oro para los vehículos eléctricos. En este tiempo, el número de EVs era del orden del doble que los de gasolina. Sin embargo, los EVs prácticamente desaparecieron dejando el mercado completo a los vehículos de combustión interna (ICE) debido a las limitaciones producidas por el peso, la baja autonomía, el largo tiempo de carga y la durabilidad de las baterías en esa época.

Las baterías de tracción son diferentes a las usadas en los productos de consumo eléctricos, como ordenadores portátiles o teléfonos móviles. En el caso de los EVs, las baterías requieren el manejo de una alta potencia (superior a cientos de W) y una alta capacidad de energía (mayor que decenas de kWh) en un espacio y pesos limitados.

En la tabla 5 [Baker, 2010] se muestra una tabla con los diferentes fabricantes de vehículos y las tecnologías empleadas.

Tabla 5: Uso de baterías según el fabricante [Corrigan, 2011]

Fabricante	País	Modelo del vehículo	Tecnología de la batería
GM	USA	Chevy-Volt	Ion-Li
		Saturn Vue Hybrid	NiMH
Ford	USA	Escape, Fusion, MKZ HEV	NiMH
		Escape PHEV	Ion-Li
Toyota	Japón	Prius, Lexus	NiMH
Honda	Japón	Civic, Insight	NiMH
Hyundai	Korea del Sur	Sonata	Polímero de litio
Chrysler	USA	Chrysler 200C EV	Ion-Li
BMW	Alemania	X6	NiMH
		Mini E (2012)	Ion-Li
BYD	China	E6	Ion-Li
Daimler Benz	Alemania	ML450, S400	NiMH
		Smart EV (2010)	Ion-Li
Mitsubishi	Japón	iMiEV (2010)	Ion-Li
Nissan	Japón	Altima	NiMH
		Leaf EV (2010)	Ion-Li
Tesla	USA	Roadster (2009)	Ion-Li
Think	Noruega	Think EV	Ion-Li

Tal como se aprecia en la tabla 1, las dos tecnologías de baterías más usadas en VEs son Níquel Metal Hidruro (NiMH) y la de iones de litio (ion-Li). Prácticamente todos los HEV disponibles en el mercado hoy en día, usan baterías NiMH debido a su tecnología más madura. Gracias al potencial de obtener mayor energía específica y mayor densidad de energía, se espera un rápido crecimiento del uso de baterías de tipo ion-Li en EVs y, particularmente, en PHEVs y BEVs. Además, existen diferentes topologías dentro de las baterías de ion-Li con una base similar pero diferente en su química.

A lo largo de este punto se presentarán los términos básicos que definen el comportamiento de una batería así como el modelado de la misma en forma de circuitos equivalentes y el equilibrado de las celdas, parte fundamental para el correcto funcionamiento de la batería así como para alargar su ciclo de vida.

3.2. TÉRMINOS BÁSICOS

Se han definido una serie de términos que caracterizan a una batería y a su funcionamiento. A continuación se resumen los términos más usados:

- **Capacidad Amperios-hora:** Es la energía total que puede ser descargada a partir de una carga completa de la batería bajo unas condiciones específicas. La capacidad nominal es la obtenida a partir de una batería nueva bajo las condiciones predefinidas por el fabricante. Por ejemplo, se puede definir una condición nominal como 20°C y descarga a 1/20 C. En ocasiones también se utiliza la capacidad en Wh (ó kWh) para representar la capacidad de la batería, definiéndose como:

$$\text{Capacidad Wh} = \text{Capacidad Ah} \times \text{Tensión de la batería}$$

- **Proporción C:** Se usa para representar el grado de carga o de descarga de la capacidad de la batería en una hora. Para una batería de 1,6 Ah, C es igual a la carga o la descarga de la batería a 1,6 A; 0,1C es equivalente a 0,16 A; y 2C sería una carga o descarga de la batería a 3,2 A.
- **Energía específica:** Se usa para definir cuánta energía puede almacenar una batería por unidad de masa. Se expresa en Wh/kg y se define como:

$$\text{Energía específica} = \frac{\text{Capacidad en Wh}}{\text{Masa de la batería en kg}}$$

- **Potencia específica:** Es la potencia de pico por unidad de masa, sus unidades son W/kg y se obtiene mediante:

$$\text{Potencia específica} = \frac{\text{Potencia de pico en W}}{\text{Masa de la batería en kg}}$$

- **Densidad de energía:** Se refiere a la densidad de energía volumétrica, siendo la energía nominal de la batería por unidad de volumen (Wh/l)
- **Densidad de potencia:** Es el pico de potencia por unidad de volumen de la batería (W/l)
- **Resistencia Interna:** Resistencia equivalente total dentro de la batería. Adopta valores diferentes durante la carga y la descarga y puede variar con los cambios en las condiciones de operación.
- **Potencia de pico:** De acuerdo a la definición de USABC, se calcula cuando la tensión del terminal es 2/3 el valor de la de circuito abierto y puede obtenerse mediante

$$P = \frac{2V_{oc}^2}{9R}$$

- **Tensión de corte:** Mínimo valor de la tensión admisible definido por el fabricante. Puede ser interpretado como el estado de “vacío” de la batería
- **Estado de carga (SOC):** Se define como la capacidad restante de la batería y se ve afectado por las condiciones de operación como la corriente de carga y la temperatura.

$$SOC = \frac{\text{Capacidad restante}}{\text{Capacidad Nominal}}$$

Se puede obtener, también, utilizando la capacidad Ah:

$$\Delta SOC = SOC(t) - SOC(t_0) = \frac{1}{\text{Capacidad Ah}} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau$$

Se trata de un parámetro crítico en el mantenimiento de la batería. Es muy complicado obtener una medición precisa del SOC, pero es la clave para que la batería funcione de modo seguro.

- **Profundidad de descarga (DOD):** Se usa para calcular el porcentaje total de la capacidad de la batería que ha sido descargado. En el caso de baterías de descarga profunda, se pueden descargar hasta un 80% o valores superiores para el DOD:

$$DOD = 1 - SOC$$

- **Estado de Salud (SOH):** Puede ser definido como el cociente entre la capacidad máxima de carga de una batería que ha envejecido y la capacidad máxima de carga que tenía cuando era nueva. Es un parámetro importante para indicar el grado de degradación del comportamiento de la batería y para estimar el tiempo de vida que le queda a la batería.
- **Ciclo de vida:** Se trata del número de ciclos de descarga-carga que una batería puede mantener bajo un DOD específico (generalmente 80%) antes de que se produzcan fallos en los criterios de comportamiento específicos. La vida actual de operación de una batería se ve afectada por los ratios de carga y descarga, el DOD y otras condiciones como la temperatura.
- **Calendario de vida:** Es la vida útil esperada de una batería bajo almacenamiento o en funcionamiento. Puede estar fuertemente relacionado con la temperatura y el SOC durante el almacenamiento.
- **Inversión de la batería:** Se produce cuando la batería se ve forzada a operar bajo una tensión negativa (la tensión del electrodo positivo es menor que la del negativo). Puede ocurrir en una celda relativamente débil en una cadena de baterías conectadas en serie. Las consecuencias de éste fenómeno son, o bien un acortamiento del ciclo de vida, o bien, un fallo completo de la batería.
- **Battery Management System (BMS):** Se trata de una combinación de sensores, calculadores y hardware computacional con un software en el que se incluyen unos algoritmos diseñados para predecir la máxima corriente y la duración de carga y descarga a partir de la estimación del SOC y el SOH de un pack de batería.
- **Thermal Management System (TMS):** Está diseñado para proteger el pack de la batería del sobrecalentamiento y alargar su calendario de vida. En el caso de baterías de NiMH se adopta un sencillo sistema de TMS basado en refrigeración mediante aire forzado, mientras que para las baterías de ion-Li se requiere una refrigeración mediante líquido más sofisticada y con mayor consumo de potencia.

3.3. MODELADO DE LA BATERIA

El modelado de la batería forma la base y es una herramienta útil para el diseño, fabricación y control de la batería. Es particularmente importante para la caracterización (estimación del SOC y del SOH) y administración de la batería ya que el modelo de desarrollo es el primer paso en cualquier sistema de identificación y estimación de estados a partir de algoritmos.

Se han llevado a cabo muchas investigaciones en el campo del modelado de las baterías y se han desarrollado una gran variedad de modelos para diferentes aspectos y propósitos [Dubarry, 2009; Johnson, 2011]. Los modelos más comunes generalmente se pueden clasificar en dos grupos: modelos electromecánicos y modelos de circuito equivalente. Los modelos detallados electroquímicos generalmente se eligen para fundamentos, aspectos físicos de baterías y la mayoría de ellos son modelos estáticos.

Algunos de esos modelos se desarrollan usando análisis de elementos finitos para investigar la complejidad de los procesos electroquímicos que se llevan a cabo dentro de la batería. Esto es adecuado para el diseño de la batería, pero no apropiado para estudios de simulación dinámica de larga duración. Por otro lado, los modelos de circuito eléctrico son normalmente modelos de parámetros agrupados y son adecuados para estudios de simulación de larga duración. Los ingenieros eléctricos apoyan los modelos de circuito eléctrico ya que son más intuitivos y pueden ser incorporados con otros dispositivos para diseñar circuitos y realizar estudios de simulación.

Para el estudio de integración de sistemas EV, control, optimización y la integración de EVs a la red, los modelos de parámetros agrupados son muy apropiados. En estos estudios, los terminales de la batería y las características generales y dinámicas incluyendo tensión, corriente, temperatura y SOC son más interesantes que el detalle de las reacciones electroquímicas dentro de la batería. En esta subsección, la importancia se da a los modelos de circuitos de parámetros agrupados. Los modelos de circuito equivalente consisten en componentes de circuitos eléctricos tales como condensadores, resistencias, diodos y fuentes de tensión.

3.3.1. MODELOS DE CIRCUITO EQUIVALENTE

Idealmente, una batería puede ser representada como una fuente de tensión ideal. Un modo más práctico pero igualmente ideal es modelar la batería a partir de un circuito equivalente de resistencia Thévenin: Tensión en serie con una impedancia. Éstos son los modos más simples de modelado y han sido extensamente usados en el análisis y diseño de los circuitos eléctricos. Sin embargo, estos modelos son demasiado simplificados y no pueden dar una información detallada y precisa de la operación y comportamiento de la batería, como SOC, termodinámica, etc. Se han propuesto modelos de circuitos más avanzados para las baterías, como por ejemplo el mostrado en la figura 4.

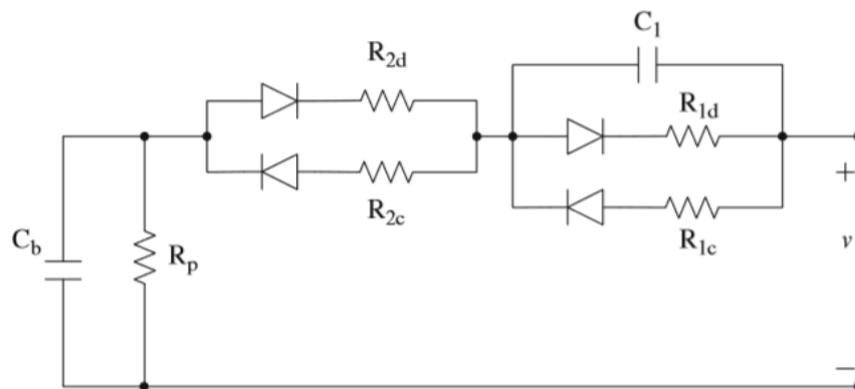


Figura 4: Modelo de circuito equivalente de una batería. [García-Valle, 2012]

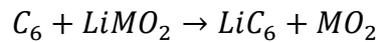
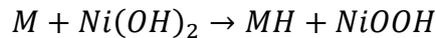
Los elementos mostrados en la figura 4 son:

C_b = capacidad de la batería, R_p = resistencia de autodescarga o resistencia de aislamiento, R_{2c} = resistencia interna para carga, R_{2d} = resistencia interna para descarga, R_{1c} = resistencia de sobretensión de carga, R_{1d} = resistencia de sobretensión de descarga, C_1 = condensador de sobretensión.

En la figura 4 se muestra un modelo de circuito de batería válido [Salameh, 1992]. Todos los diodos del modelo son ideales y se usan, simplemente, para seleccionar las distintas resistencias en los estados de carga y descarga. Los valores de los parámetros del modelo (condensadores y resistencias) representados en la figura 4 son función de las reacciones electroquímicas actuales y la dependencia de la temperatura. Se utiliza un algoritmo de mínimos cuadrados y una fórmula de compensación para minimizar las variaciones [Salameh, 1992].

El modelo representado en la figura 4 es adecuado para baterías de plomo-ácido pero puede convertirse en modelo de otros tipos de baterías. Sin embargo, éste modelo no ofrece ninguna manera de estimar el SOC de la batería.

Aunque los parámetros pueden ajustarse para diferentes condiciones de operación, las reacciones químicas de carga para las baterías de NiMH e ion-Li representadas a continuación pueden no ser exactas, pudiendo limitar las aplicaciones del modelo.



3.3.2. TIEMPO DE EJECUCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y ADMINISTRACIÓN

El sistema de gestión de la batería (BMS) es el encargado de tomar las decisiones de los rangos de carga y descarga en base a las demandas de carga, tensión de celda, corriente y medidas de temperatura y estimar el SOC de la batería, capacidad, impedancia, etc. Esto es especialmente importante en baterías de ion-Li dado que la sobrecarga puede acelerar la degradación de la batería, encendido o, en el peor de los casos, auto explosión. Por otro lado, la sobre descarga puede ocasionar pérdida de capacidad y acortamiento de la vida de la celda. En aplicaciones para EV, son frecuentes los ciclos de carga-descarga. Para mantener la capacidad de absorber energía del frenado regenerativo y una entrega grande de par cuando el vehículo demanda una aceleración rápida o un arranque en frío, el SOC debe mantenerse en un rango entre 40-75%.

3.3.3. ESTIMACIÓN DEL SOC

El SOC, o estado de carga, es una medida operativa que expresa la cantidad de carga, en Ah, que tiene almacenada la batería y, por tanto, es capaz de suministrar, frente al máximo o nominal Q_{nom} , expresándose, generalmente, de manera porcentual.

$$SOC(t) = \frac{Q_{bat}}{Q_{nom}} \times 100$$

Generalmente tiene un valor entre el 20 y el 95% para garantizar la durabilidad de la batería, sin embargo, existe un rango central entre el 20 y el 80% en el que las intensidades de carga y descarga pueden ser elevadas durante tiempos cortos, permitiendo así la carga rápida. Por el contrario, en el rango de 80 a 100%, las intensidades deben ser moderadas.

3.3.4. TIEMPO DE EJECUCIÓN Y NIVEL DE CELDA INDIVIDUALIZADO

Un sistema de baterías de un EV consiste en muchas celdas que siempre tienen distintas características. Cuando los fabricantes empaquetan celdas en packs, se esfuerzan por meter en el mismo grupo celdas de similares capacidades y características (generalmente del mismo lote) de manera que las variaciones entre las células queden minimizadas. Sin embargo, las celdas de las baterías sufren cambios con las condiciones de operación tales como el envejecimiento, las condiciones de operación y las variaciones de las propiedades químicas. Consecuentemente, durante los ciclos de operación tras un largo tiempo, el SOC se muestra no lineal y con variaciones dinámicas en el tiempo [Giglioli, 1998]. Para mejorar la gestión de la batería y mejorar la eficiencia de la potencia es deseable capturar individualmente las características de cada una de las celdas de la batería y producir modelos actualizados en tiempo real. Este es un problema del sistema de identificación [Wang, 2010].

Para facilitar el modelo actualizado durante el tiempo de ejecución, primero se representa un modelo de batería linealizado en forma de entradas y salidas, llamado función de transferencia [Sitterly, 2011]. Ya que la mayoría de los modelos de las baterías son de primer y segundo orden y conllevan la integración de la entrada actual, la forma típica es:

$$\frac{V(s)}{I(s)} = \frac{d_1 s^2 + d_2 s + 1}{c_1 s^2 + c_2 s}$$

Pudiendo ser conveniente modificado para obtener:

$$H(s) = \frac{I(s)/s}{V(s)} = \frac{c_1 s + c_2}{d_1 s^2 + d_2 s + 1}$$

Este paso relaciona la carga o descarga total con la tensión y hace la función de transferencia estrictamente apropiada, lo que es más aplicable para sistemas de identificación. $H(s)$ se discretiza para un intervalo de muestreo dado, que es normalmente el intervalo de muestreo actual del sistema de adquisición para el sistema de la batería, aunque pueden llevarse a cabo otras elecciones. Esto conduce a un sistema discreto en el tiempo transformando las variables de entrada y salida en u e y :

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2}$$

Que puede ser escrito en forma de regresión:

$$y_k = -a_1 y_{k-1} - a_2 y_{k-2} + b_1 u_{k-1} + b_2 u_{k-2} = \phi_k^T \theta$$

Donde, $\phi_k^T = [-y_{k-1}, -y_{k-2}, u_{k-1}, u_{k-2}]$ se llama regresor y es obtenido a partir de la medida de los datos en cada muestreo de tiempo y $\theta^T = [a_1, a_2, b_1, b_2]$ es el parámetro vector que va a ser actualizado. Esta forma de regresión permite aplicar muchos algoritmos de identificación estándar y analizar su exactitud, convergencia y velocidad de convergencia, que son propiedades esenciales para asegurar que los modelos de actualización sean auténticos y precisos.

3.4. EQUILIBRADO DE CELDAS

El equilibrado de celdas es una función fundamental del BMS, especialmente para baterías ion-Li [Moore, 2001]. Para aplicar las tensiones requeridas, las celdas de la batería deben estar colocadas en serie. Durante la carga y la descarga, cada celda en la cadena debe estar sometida a la misma corriente, pero tendrán diferentes SOC's debido a distintos factores. En primer lugar, las celdas tienen distintas capacidades. Incluso si los fabricantes se esfuerzan por igualar las capacidades de las nuevas celdas, las condiciones de operación no uniformes imponen diferentes esfuerzos térmicos y eléctricos en las celdas, causando variaciones en las capacidades de las mismas. Aunque las celdas de ion-Li tienen autodescargas pequeñas, pueden acumularse pequeñas diferencias a lo largo del tiempo causando diferentes SOC's incluso cuando las celdas están cerca de tener idénticas capacidades. Lo que es más, variaciones en la impedancia interna y el inevitable envejecimiento de los materiales conllevan a unas características no uniformes en las celdas. Para proteger las celdas del sobrecalentamiento, sobrecarga y sobredescarga, las operaciones de la cadena están fundamentalmente limitadas por la celda más débil, la que alcanza los límites superiores e inferiores del SOC primero. Tal desequilibrio impide que las células suministren sus capacidades completamente y, consecuentemente, limita el tiempo de ejecución de la batería, el SOH y los ciclos de vida.

El equilibrado de las celdas tiene como objetivo reducir los desequilibrios del SOC dentro de una cadena por medio del control de los SOC's de las celdas de manera que sean prácticamente iguales. Esto puede conseguirse disipando energía de las celdas con más SOC hacia una resistencia de derivación, llevando la energía de las celdas con más SOC a las de menos SOC o mediante el balanceo incremental de celdas a partir de celdas pareadas en etapas [Wang, 2010].

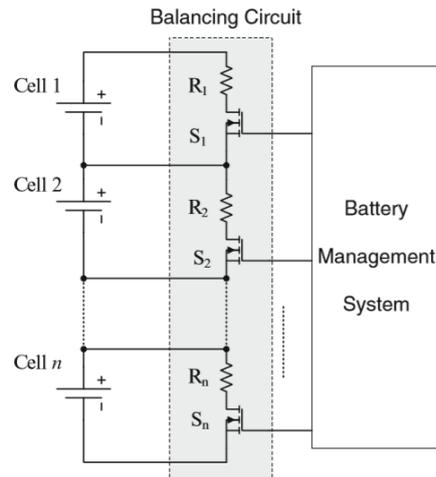


Figura 5: equilibrado de celdas a través de resistencias bypass. [García-Valle, 2012]

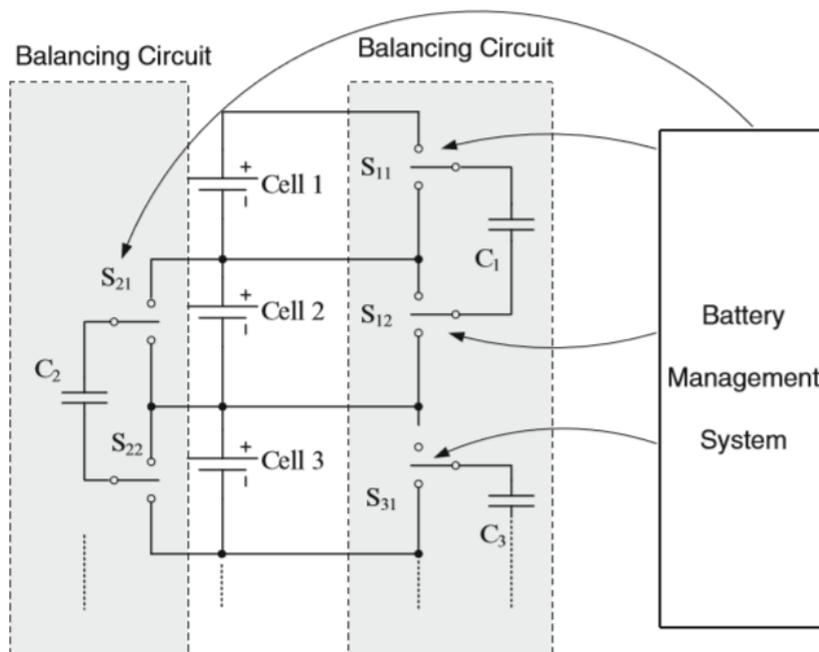


Figura 6: equilibrado de celdas a través de arrastre de energía mediante condensadores. [García-Valle, 2012]

La resistencia de derivación del circuito de la figura 5 es la estructura más simple del equilibrado de celdas. Cuando al evaluar el SOC de una celda se obtiene que es más alto que las otras, se activa el circuito de bypass y la celda se descarga para reducir su SOC. La energía se pierde en forma de calor a través de la resistencia de derivación durante el equilibrado. Como resultado, esta estructura de equilibrado de celdas reduce la eficiencia de la batería. Por el contrario, la energía arrastrada en el circuito de la figura 6, puede conectar la celda con mayor SOC en la cadena con el condensador de equilibrado y cargarlo. La energía almacenada en el condensador se entrega a la siguiente celda. Esta operación se repite a lo largo de la cadena para distribuir gradualmente la energía desde la celda con mayor SOC a las otras celdas en la cadena. Esta estrategia de equilibrado incrementa la eficiencia de la batería, pero conlleva mayores costes y un mayor tiempo para acabar el proceso de equilibrado.

Existen algunas consideraciones y compensaciones a tener en cuenta en el diseño de un circuito de equilibrado:

- **Velocidad de equilibrado:** Es siempre deseable completar el equilibrado tan rápido como sea posible. La desventaja de un balanceado rápido reside en que la potencia nominal de los circuitos de equilibrado puede aumentar, causando mayores pérdidas y generación de calor

que a su vez exige una costosa gestión del calor. Esto, además, puede hacer el empaquetado más complicado.

- **Eficiencia de la energía:** Disipar energía a las resistencias de derivación es una pérdida de energía total, como se muestra en la figura 5. Como consecuencia, solo es posible una elección de equilibrado de las celdas cuando la desviación de la tensión entre las celdas es relativamente pequeña. Sin embargo, tales circuitos de equilibrado son muy simples y, a veces, los circuitos de conmutación y control pueden integrarse en ICs (integrated circuits). Por el contrario, la energía arrastrada puede reducir significativamente las pérdidas de energía, pero requiere un dispositivo de almacenamiento de energía adicional, como condensadores o inductancias unidos, con sus potencias electrónicas y sus circuitos de control, tal como se aprecia en la figura 6. Esto incrementa los costes y el tamaño con los más sofisticados sistemas de gestión.
- **Equilibrado de tensión:** Aunque el equilibrado de las celdas se justifica para igualar los SOC, durante el tiempo de ejecución es difícil estimar de manera precisa el SOC y determinar la capacidad. Como consecuencia, muchos circuitos de equilibrado de celdas actualmente son circuitos de equilibrado de tensión de las mismas. En otras palabras, comparando la tensión de las celdas, los circuitos de equilibrado tratan de igualar la tensión terminal de las celdas. Esta tecnología tiene unos inconvenientes fundamentales. Como las tensiones de los terminales están afectadas por las impedancias de las celdas que son parcialmente la razón del desequilibrado de las celdas, igualar las tensiones de los terminales dejarán las tensiones de circuito abierto desiguales cuando las celdas estén siendo cargadas o descargadas al mismo tiempo. Además, las curvas características varían de celda a celda. Cuando una celda envejece, su tensión será un mal indicador del SOC. Este problema se agudiza en las baterías de Li-ion dado que sus curvas características son bastante planas en sus rangos de operación.

4. GESTIÓN Y SEGURIDAD EN LAS BATERÍAS

4.1. INTRODUCCIÓN

El sistema de baterías de tracción de un vehículo eléctrico consiste en una cadena de baterías conectada en serie y/o paralelo, formando un pack de batería con una tensión nominal que puede variar desde 72 a 324 V.

Debido a las tolerancias de fabricación, ningún pack es exactamente igual a otro, es más, ninguna celda es fabricada de manera idéntica a otra, sus parámetros, tales como la capacidad, pueden variar en un cierto porcentaje. En el caso de una batería nueva, estos factores no son muy notables pero, cuando una batería es sometida a varios ciclos de carga y descarga, estos factores determinan el comportamiento del pack de batería. Además, algunas celdas experimentan cambios en sus parámetros, tales como la tensión de circuito abierto, y la resistencia interna junto con corrosión, gradientes de temperatura excesivos o pérdida de electrolito. Dichos fenómenos pueden conducir a una acumulación de gas hidrógeno, pudiendo generar un riesgo de incendio o explosión si no son detectados y tratados a tiempo. Este tipo de defectos puede ser fácilmente detectado en packs de baterías de 6 a 12 celdas pero, en el caso de los packs de baterías usadas en vehículos eléctricos, pueden existir cientos de celdas, para salvaguardar la seguridad del EV, es fundamental monitorizar cada una de las celdas individualmente y detectar los defectos a tiempo.

En este apartado se presentarán los diferentes sistemas de control de las baterías y se hará un pequeño análisis de las especificaciones de seguridad de las mismas.

4.2. SISTEMA DE GESTIÓN DE LA BATERÍA

Uno de los sistemas más comúnmente usados a la hora de realizar la gestión electrónica de la batería, es el BMS (*Battery Management System*). Se trata de una unidad de control que realiza la monitorización de ciertos parámetros fundamentales para la seguridad y el correcto funcionamiento de cada una de las celdas, tales como la tensión, temperatura e intensidad de carga y descarga. Además de controlar, este sistema ofrece una comunicación con otras unidades de control fuera de la batería, como el sistema de control del motor eléctrico, que gestiona la velocidad del vehículo o la recuperación de energía durante las frenadas (frenado regenerativo).

Uno de los parámetros más importantes que hace posible la seguridad en la carga y descarga de la batería es la estimación del SOC, que es definido como la capacidad presente de la batería expresada en términos de capacidad nominal [Affanni, 2005]. El SOC proporciona el estado de corriente de la batería y habilita a la misma para ser cargada y descargada a un nivel adecuado de manera que se mejore la vida de la batería. Por lo tanto, el SOC ayuda en el manejo de la batería. Sin embargo, la medida del SOC no es directa, ya que involucra las medidas de la tensión, corriente, temperatura y otras informaciones que dependen de la batería que se esté midiendo.

Debido a las tolerancias en los procesos de fabricación de las baterías, no todas las baterías alcanzan simultáneamente el máximo voltaje durante la carga. Esta condición produce un desequilibrio de la tensión entre las diferentes baterías y, en consecuencia, una menor capacidad de toda la cadena de baterías. Por lo tanto, una celda con un 100% de SOC, no necesariamente está mostrando el SOC real, motivo por el que, el cálculo exacto del SOC debe ir acompañado de un seguimiento continuo de la capacidad real de la celda con una serie de mediciones de las mismas para reflejar la capacidad real y la práctica, de modo que pueda adaptarse a las diferentes condiciones de la carretera y a los patrones de conducción de los EV.

El BMS se trata de una entidad separada con hardware y firmware y está conectado a un cargador de batería en lugar de estar integrado dentro del mismo. Consiste en una serie de dispositivos de detección que monitorizan los parámetros de la batería que serán posteriormente usados en el algoritmo empleado en la estimación del SOC. La parte más importante de cualquier sistema BMS es el modelado de la batería, que requiere un entendimiento detallado de las características de la batería para poder realizar

una estimación precisa del SOC [Gould, 2009]. Generalmente el modelo se obtiene a partir de las curvas de carga y descarga de la batería.

4.2.1. ESTIMACIÓN DEL SOC

Tal como se ha indicado anteriormente, un parámetro fundamental a la hora de gestionar la batería y asegurar su correcto funcionamiento y vida útil, es el estado de carga o SOC (*State of Charge*). El cálculo de este parámetro es realmente complejo ya que requiere conocer el valor de ciertos parámetros, como la tensión o la temperatura de cada celda en cada instante de tiempo. Es por esto que se realiza una estimación del SOC en vez de un cálculo exacto. Razonablemente, cuanto más precisa sea la estimación más se acercará el valor a la realidad y se realizará una mejor gestión de la batería. Las estrategias a seguir para estimar el estado de carga pueden variar de un fabricante a otro, del tipo de batería, de la precisión que se quiere conseguir... a continuación se realizará un pequeño análisis de los métodos más importantes de estimación del SOC [Cheng, 2011]:

- **Medida directa:** Se basa en la hipótesis de una corriente de descarga constante. El valor de esta corriente se multiplica por el tiempo de descarga total de la batería y, de esta manera, se obtiene la capacidad del pack. Puesto que en la realidad la corriente de descarga es variable, este método es muy inexacto y no se implementa como sistema de estimación del SOC.
- **Medida de la gravedad específica:** También denominado medida de la densidad relativa, su uso hace necesario tener acceso al electrolito líquido de la batería, motivo por el que no puede ser usado en baterías VRLA pero sí en ion-Li. Teniendo en cuenta que la relación entre la densidad del agua y la de una sustancia electrolítica desciende de forma lineal con la descarga de la celda, midiendo la densidad del electrolito se puede obtener una estimación del SOC de la celda. A pesar de tratarse de un método bastante preciso, no es capaz de determinar la capacidad total de la batería.
- **Impedancia interna:** Con los ciclos de carga y descarga, la composición de los componentes químicos que se encuentran en el interior de la celda se modifican, variando con ellos la impedancia interna de la batería. Se trata de un buen indicativo del estado de carga pero resulta difícil de medir durante el funcionamiento de la batería y es muy dependiente de la temperatura, dificultando aún más su uso.
- **Estimaciones basadas en voltaje:** Método basado en la relación directa entre la tensión actual de la batería y la capacidad de la misma. Por lo general, las baterías presentan un comportamiento no lineal, por lo que se trata de un método poco preciso.

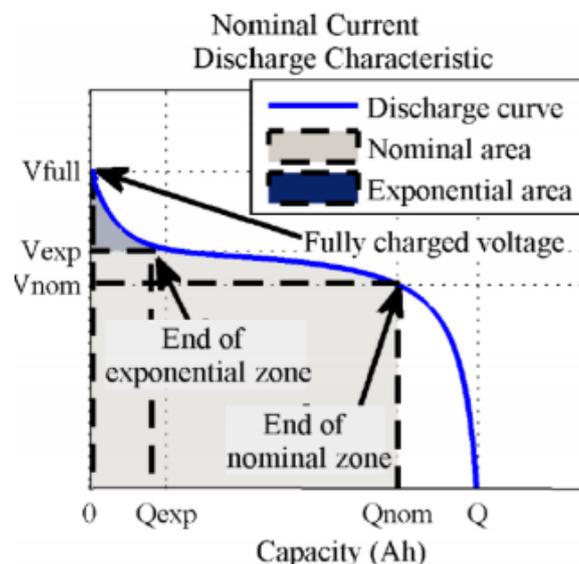


Figura 7: Curva de la tensión en función de la capacidad de una batería. [Cheng, 2011]

En la figura 18 se muestra la curva de la tensión en función de la capacidad de una batería y permite visualizar la caída brusca de la tensión cuando la batería se aproxima al estado de descarga completa. Éste comportamiento hace que la zona lineal no está del todo delimitada y que no sea posible realizar una estimación precisa del SOC cuando la baterías tiene poca carga.

- **Estimación basada en la intensidad:** También conocido como método de *Coulomb Counting*, consiste en la integración de la corriente entrante y saliente de la batería. De esta manera, integrando en el tiempo la intensidad que carga y descarga las celdas, puede obtenerse la carga almacenada en las mismas. Esta metodología es la más precisa a la hora de realizar una estimación del SOC y, por lo tanto, la más usada.

4.3. SISTEMA DE GESTIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA BATERÍA

Podría considerarse al BMS como el cerebro detrás del sistema de baterías, sin embargo, existen otros sistemas de gestión, como el BPMS (*Battery Performance Managemetrn System*), que cuantifica los problemas potenciales asociados al pack de baterías de un vehículo eléctrico siguiendo la estrategia de aislar a la celda más débil. Este sistema abarca desde acciones simples, como igualar la carga de las celdas de un pack de baterías a acciones más complejas como sugerir reemplazar una batería defectuosa para restaurar la capacidad total del paquete.

El BPMS tiene la capacidad de gobernar el ciclo de carga para adaptarse a una batería débil, lo que resulta en una utilización menor de la capacidad total del sistema de baterías, pero amplía la vida de la batería más débil y, por tanto, mejora la vida útil de toda la batería reduciendo así mismo el riesgo de modo de fallo repentino. Además, la disminución de la capacidad de la celda débil puede medirse y cuantificarse y, cuando se llegue a un cierto valor predeterminado, la celda puede ser reemplazada haciendo que el pack de batería vuelva a tener su capacidad total inicial. Este método de carga inteligente elimina la posibilidad de perjudicar a la batería debido a una sobrecarga excesiva, resultando en un ciclo de vida muy largo.

Una batería dentro de un pack puede ser reducida a un estado de debilidad por un exceso de tasas de carga. Estas condiciones de abuso se caracterizan por pequeñas ráfagas de corriente de carga a tensiones excesivas sucedidas durante el frenado regenerativo, que puede exceder la aceptación de carga máxima de la batería si no es gestionado correctamente. Esta condición excede la capacidad de aceptación de carga de la batería en el rango de 80 a 100% SOC (la capacidad de aceptación de carga de la batería en 100% SOC es cero). En estas condiciones, la batería se convierte en un gran disipador de calor.

Por lo tanto, otra función del BPMS es monitorizar la descarga o utilización de la batería para garantizar un funcionamiento seguro de la misma, evitando la descarga y sobrecarga excesivas y permitiendo una estimación del SOC más precisa. Monitorizar cada una de las celdas individualmente permite un diagnóstico temprano y la detección de una celda débil o el deterioro de la batería antes de que ocurra el fallo. El control de otras características, como la resistencia interna puede llevar a encontrar una celda deteriorada o, incluso contactos defectuosos o corroídos en el caso de las interconexiones de las baterías, avisando al conductor cuando un cierto valor límite es excedido [[Ouyang, 2013](#)].

El BPMS amplía el concepto de carga inteligente al realizar un control total del sistema de baterías a bordo del EV; además, tiene la capacidad de administrar el flujo de energía a lo largo de la operación del vehículo así como la administración térmica de la batería y proporcionar un interfaz en tiempo real útil tanto para el consumidor como para la empresa energética.

4.4. SISTEMA DE GESTIÓN TÉRMICA

Las condiciones de operación de las baterías de un vehículo eléctrico consisten en condiciones ambientales variables y demandas de energía eléctrica también variables. Los procesos químicos que tienen lugar dentro de la batería son dependientes de la temperatura. Por lo tanto, el sistema de almacenamiento electroquímico deberá mantenerse dentro de ciertos límites de temperatura que aseguren una función adecuada y garanticen una vida útil razonable de la batería.

Estos límites están en torno a 10°C como valor inferior debido a la disminución de capacidad de la batería para temperaturas inferiores y 50°C como límite superior debido a la corrosión de la placa positiva y la descomposición del separador para valores superiores.

Desde el punto de vista de la gestión térmica de la batería, es necesario mantener una temperatura uniforme en todo el pack de baterías. Este sistema se encargará de tomar las decisiones para calentar o refrigerar la batería dependiendo de las condiciones del pack. Este sistema es esencial tanto en la conducción urbana como en la carga rápida, donde se aplican niveles de corriente de cientos de amperios durante periodos relativamente cortos.

Aunque las baterías libres de mantenimiento con electrolito de gel (VRLA) son las más comúnmente usadas, se sobrecalientan más rápido que sus antecesoras de plomo-ácido, debido a la incapacidad de estas baterías de disipar el calor generado durante la recombinación del gas durante la carga u los efectos de la potencia durante el proceso de descarga.

El sistema de gestión térmica debe ser capaz de mantener a la batería aislada, de modo que se puedan obtener rangos de temperatura aceptables durante diferentes estaciones, como el invierno o el verano [Barsukov, 2013]. Debido a esto, otro criterio importante es que la circulación del flujo de aire refrigerante debe estar distribuido adecuadamente en el espacio para asegurar la mínima diferencia de temperatura entre las celdas individuales. Este criterio del diseño debe ser aplicable en varias condiciones de operación.

La capacidad térmica de un módulo de baterías se estima mediante cálculos y medidas. Los fabricantes deben proporcionar información relativa a los materiales y dimensiones necesarios para realizar estos cálculos.

4.5. SISTEMA DE GESTIÓN DE CARGA

Los circuitos integrados especializados disponibles en la actualidad, se han diseñado para desarrollar un esquema de control que optimice de la carga de la batería. Las limitaciones en los procesos de fabricación de las baterías, dan como resultado que no hay dos celdas idénticas, lo que provoca cierta incertidumbre en las características de la celda. Algunos de los efectos perjudiciales de esta falta de uniformidad son que ciertas celdas de la batería están sometidas a sobrecarga mientras que la carga útil de la batería disminuye. Es fundamental minimizar los efectos de la sobrecarga manteniendo una carga uniforme a través de la batería independientemente de las condiciones iniciales de la celda.

Los convertidores comunes DC-DC son usados para derivar la corriente alrededor de una celda, o grupo de celdas, en una batería. Mientras se carga la cadena de baterías, cada una de las celdas alcanza una tensión límite. Una vez alcanzado el límite, que generalmente es de 15,5 V para baterías VRLA de 90 Ah, la corriente de carga se deriva alrededor de la batería [Xing, 2011]. De este modo, la celda cargada totalmente mantiene el valor límite de la tensión y el exceso de energía es enviado al bus de carga y reaparece como corriente de carga adicional. El proceso de recircular la corriente de carga a través de las derivaciones, permite que las celdas con carga insuficiente obtengan una carga de compensación mientras que las celdas completas con son sobrecargadas, de manera que se evitan la gasificación y la pérdida de agua.

4.6. PROTECCIÓN DE LA CARGA

Para asegurar la máxima vida del pack de baterías, la fiabilidad y seguridad del conductor, la química de las baterías VRLA y NiMH requieren que sean cargadas y descargadas entre unos límites predefinidos. El usuario puede prevenir la sobrecarga, sobredescarga y descarga utilizando circuitos de protección eléctricos.

El primer nivel de protección es usar un circuito integrado y una serie de transistores de efecto de campo (FETs). La tensión del pack de baterías y la descarga son cuidadosamente monitorizados, incluso a nivel de celda si es necesario. El sistema de baterías es desconectado del cargador en caso de que la corriente caiga fuera de los límites establecidos.

Generalmente, los circuitos electrónicos primarios no detectan todos los fallos de potencia, la mayoría de los dispositivos basados en silicio no detectan una corriente de sobrecarga porque siempre es más pequeña que la corriente de sobredescarga. En su lugar, solo controla la sobretensión de la batería.

Por último, la electrónica del cargador no monitoriza la temperatura del pack de la batería a nivel de celda, sino que se realiza mediante el uso de un termistor de coeficiente de temperatura negativo (NTC), incluyendo un termistor de coeficiente de temperatura positivo de polímero (PPTC) para una protección adicional. Cuando ocurre un fallo en el pack, el dispositivo PPTC limita la corriente de carga o descarga de la celda entre unos niveles de seguridad específicos. El termistor PPTC, protege el circuito de carga de la batería pasando rápidamente de un estado de baja resistencia a uno de alta resistencia en caso de que haya sobrecorriente más allá de los límites de temperatura especificados., reestableciéndose una vez que se elimina la alimentación del circuito.

Una vez presentados todos los sistemas de gestión presentes en la batería, se representa la figura 19, en la que se define la gestión de la energía de un vehículo eléctrico.

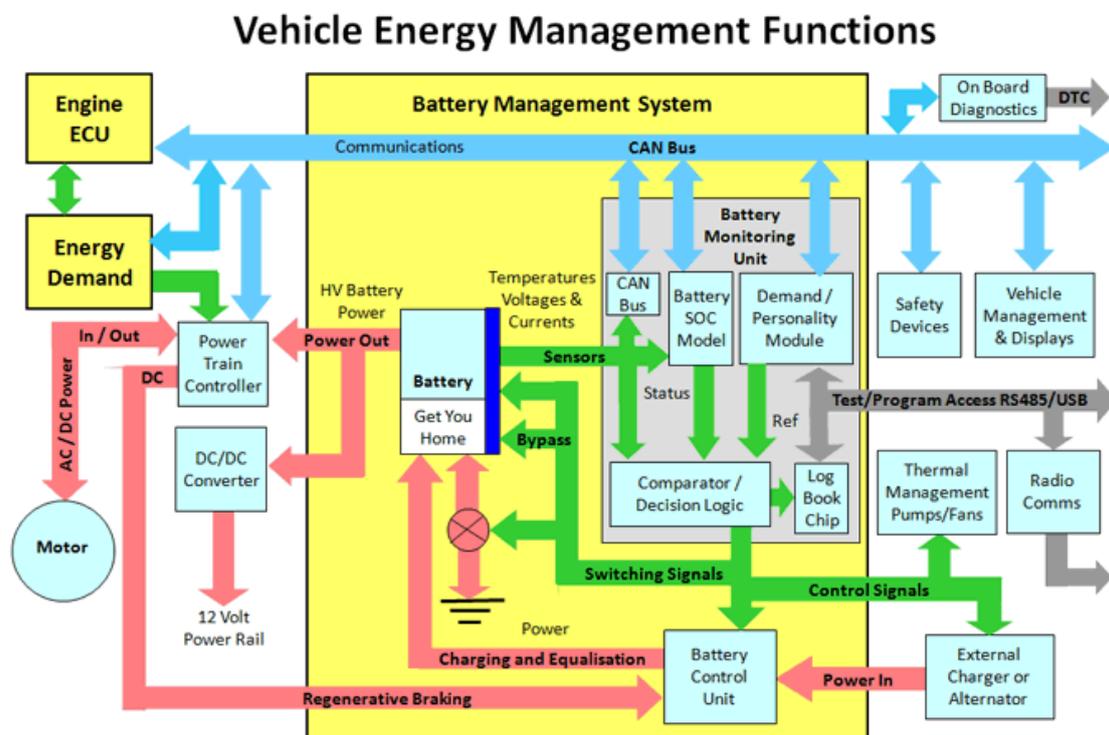


Figura 8: Gestión de la energía de un vehículo eléctrico [Lawson, 2019]

Dentro del sistema de gestión de la batería que se aprecia en la figura 19 (Battery Management System), se encuentra la unidad de monitorización de la batería (Battery Monitoring Unit) donde, entre otras cosas, se obtiene la estimación del SOC. Esta unidad se comunica con la gestión térmica, que controla las bombas y los ventiladores y con la unidad de control de la batería que, a su vez, se encarga del equilibrado de la misma.

4.7. SEGURIDAD EN EL DISEÑO DE LA BATERÍA

La descomposición del electrolito de la batería puede ser peligroso durante la operación del EV. El sobrecalentamiento de los packs de baterías de tracción acelera la reacción electroquímica que causa la descomposición del electrolito. Durante el primer ciclo de carga, el proceso de la formación inicial de las películas entre las capas conlleva a la reducción de electrolitos. Esta reducción puede continuar en los ciclos de carga posteriores con ciertas combinaciones del electrodo negativo y los materiales del electrolito.

Además, la descomposición del electrolito conduce a cambios de fase que también presentan un peligro para el vehículo. Los líquidos orgánicos que pueden ser usados como electrolitos de las baterías VRLA y NiMH tienen puntos de ebullición entre 60 y 250°C bajo condiciones estándar. El punto de ebullición de cualquier electrolito es el factor clave dado que la vaporización del electrolito daña la integridad de la celda.

Por ejemplo, los vehículos de pasajeros pueden estar expuestos si la contención de la batería falla y el electrolito tiene fugas. El electrolito de los pack de baterías tiene más probabilidad de filtrarse cuando una nueva celda está dañada. Las celdas nuevas tienen más electrolito que las usadas, porque una parte de éste se consume durante el ciclo. La exposición también puede ocurrir durante el procesamiento de las baterías de tracción usadas. El sobrecalentamiento, sobrecarga y sobredescarga pueden causar descomposición o cambios de fase en el electrolito o compuestos electrolíticos gaseosos.

La exposición de otros materiales de la celda también pueden ocurrir durante la fabricación de las baterías. Una vez que la celda de la batería está completada, la exposición al aluminio, cobre y níquel puede ser desfavorable. La sobrecarga de la batería y la ventilación pueden causar la exposición a los humos provenientes de la descomposición del polipropileno o el fluoruro del polivilideno.

En el caso de las baterías de plomo-ácido, el derrame del ácido es un factor importante a tener en cuenta en el diseño del pack haciendo necesario, en ciertas ocasiones, que toda la batería esté rodeada por un sistema contenedor de ácido. Este problema es solventado en baterías VRLA ya que, al no tener electro libre, no requieren sistemas adicionales.

El diseño de un pack de batería de VRLA tiene un coste inicial más alto. Sin embargo, al eliminar los costes de mantenimiento, ventilación e instalación, el coste total de la batería es menor que las de plomo-ácido.

En el caso de la fabricación de las baterías de ion-Li [Weicker, 2014], la gran dificultad se presenta por la alta densidad de energía ya que, los métodos de fabricación se vuelven más críticos cuanto más densidad se introduzca en la batería. Con un espesor de separador muy pequeño, cualquier intrusión de partículas de polvo metálico puede tener consecuencias devastadoras. En la actualidad se están investigando nuevos métodos de fabricación de este tipo de baterías, como la incorporación de láminas cerámicas, que elimina el peligro de la combustión inherente a las baterías de ion-Li

4.8. SEGURIDAD ELÉCTRICA

Teniendo en cuenta la seguridad desde un punto de vista eléctrico [Tan, 2008], el conector del vehículo eléctrico debe ser polarizado y configurado de manera que sea no intercambiable con otros dispositivos eléctricos. El método por el que el equipo de carga del EV se acopla al vehículo puede ser conductivo o inductivo pero debe ser diseñado de manera que se evite la desconexión involuntaria.

Todos los equipos de carga de EV deben tener circuitos de seguridad con toma a tierra como medida de protección. Para equipos que van a funcionar en el exterior, es necesario diseñar sistemas a prueba de lluvia, tanto para los cargadores como para el paquete de baterías. También debe incorporarse un sistema, para dejar al equipo sin energía en caso de que se produzcan fallos en el conector o en el cable. Además, es necesario un interbloqueo de conexión para garantizar que haya una interfaz no activada entre el equipo de carga del EV y el propio vehículo hasta que el conector se haya fijado al mismo.

En los equipos de carga también es necesario instalar un interbloqueo de la ventilación, que permita al equipo de carga del vehículo determinar si el EV necesita ventilación o no. Si la ventilación está incluida en el sistema, el bloqueo de la ventilación permitirá cargar cualquier vehículo. Sin embargo, cuando la ventilación no está incluida en el sistema, el interbloqueo de ventilación mecánico, permitirá la carga de los vehículos equipados con baterías no gaseosas, mientras que no cargará los que contengan baterías que puedan generar gases.

4.9. CONCLUSIONES

Para asegurar la durabilidad y el buen funcionamiento de la batería de tracción usada en vehículos eléctricos, es necesario implementar sistemas de control. Estos sistemas de gestión suponen un coste añadido que se incrementará cuanto más exhaustivo, y por tanto más fiable, sea. Dado que cada celda debe ser monitorizada, cada una de ellas llevará conectado, al menos, un sensor que mida la tensión de la misma. Aunque de cada fabricante depende invertir más o menos en este tipo de sistemas. Por ejemplo, una de las baterías más usadas por Tesla, contiene 7104 celdas que son poco más grandes que las pilas estándar AA. Para poder alcanzar la fiabilidad que esta empresa entrega, es necesario un sistema de gestión realmente complejo, que monitorice por separado cada una de estas celdas. Pero no todos los fabricantes optan por tal complejidad, cuando la empresa está interesada en precios competitivos para sus vehículos eléctricos, debe minimizar los gastos de producción.

Con el fin de observar de manera gráfica el comportamiento de un sistema de gestión de la batería, se presenta el siguiente esquema:

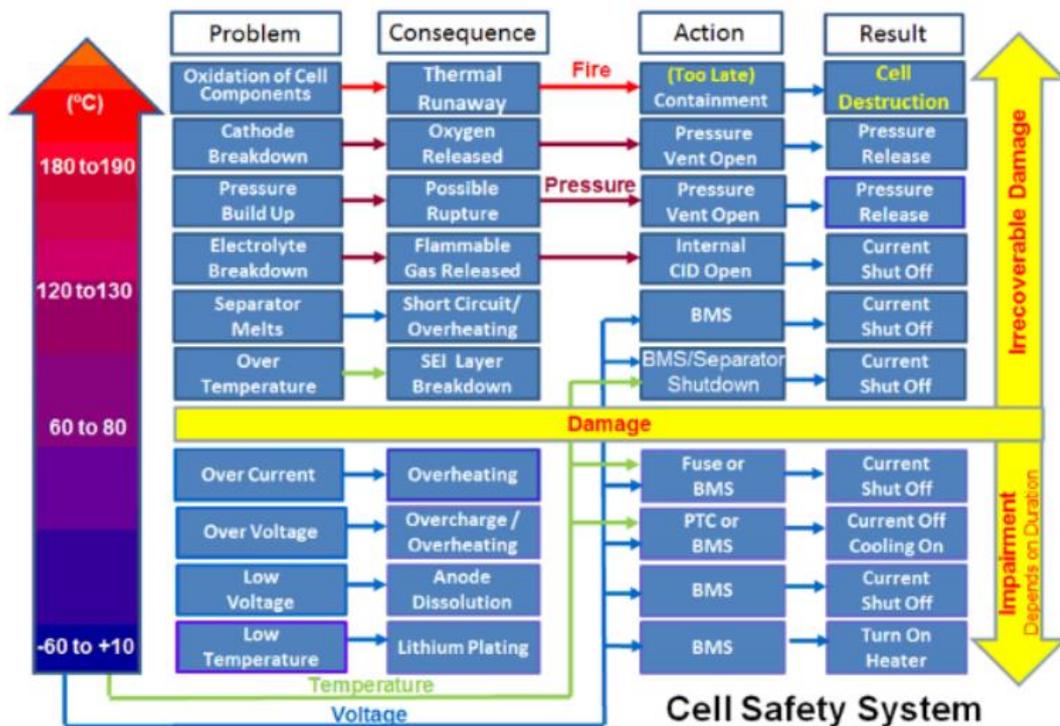


Figura 9: Esquema de un BMS [Lawson, 2019]

En la figura 20 se representan, en función de la temperatura los posibles problemas que pueden ocurrir en la batería así como sus consecuencias. Por otra parte se muestra las acciones que tomará el sistema de gestión y los resultados de estas acciones. Además, según la figura 20, se puede presentar un límite en la temperatura de operación, entre 60 y 80°C, a partir del cual los daños son irreparables mientras que, por debajo de esa temperatura, el resultado dependerá de la duración en el tiempo.

Además del control y gestión de la batería, es fundamental tener en cuenta ciertos requisitos a cumplir que ofrezcan seguridad. Los riesgos no solo suceden cuando un vehículo impacta o cuando se produce un fallo durante la carga. Es necesario tener en cuenta los aspectos de seguridad desde el momento en que se fabrica la batería hasta el final de su vida útil. Durante el proceso de carga como en el proceso de fabricación del vehículo o manipulación del mismo debe tomarse como primordial la seguridad del ser humano, por lo que los fabricantes también deben dejar una parte de su inversión inicial a este aspecto.

5. SISTEMAS DE RECARGA

5.1. INTRODUCCIÓN.

Tal como se ha definido en secciones anteriores, existen vehículos eléctricos enchufables, es decir, deben conectarse a la red eléctrica para poder recargar sus baterías. Es fácil pensar que, al aumentar el número de vehículos eléctricos aumentará la demanda de energía a la red eléctrica, generando un impacto que será estudiado en el presente capítulo. Además, se presentarán los diferentes métodos de carga y las posibles estrategias a seguir a la hora de cargar el vehículo eléctrico.

5.2. TIPOS DE ENCHUFES ESTANDARIZADOS

El despliegue exitoso de los vehículos eléctricos está íntimamente ligado a los estándares de EV acordados internacionalmente, donde se busca una infraestructura de carga universal con periféricos universales asociados así como un software fácil de usar en propiedad pública y privada. Sobre estos aspectos trabajan algunas organizaciones clave, como la Agencia Internacional de Energía (IEA), la sociedad de Ingenieros de Automóviles (SAE) y el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). Tras varios años de trabajo e investigación, se ha llegado a la norma de estandarización a nivel mundial, IEC 62196-2 y -3, donde se definen tres tipos de enchufes estandarizados según la aplicación [[Tanaka, 2009](#)]:

- **IEC 62196-2 “tipo 1”**: Se trata de un acoplador monofásico que sigue la norma americana SAE J1772/2009 y que dispone de terminales para la comunicación entre el vehículo y el poste de recarga, según un protocolo IEEE P1901. Estados Unidos se ha decantado, muy similar al de la especificación europea, aunque con menor potencia debido a las características de la red eléctrica de Norteamérica y Japón. Este conector, representado en la figura 7, mide 43 mm de diámetro y suministra una potencia de 16,8 kW, tratándose de un enchufe de 240 V y 70 A. Además de las tomas típicas de fase neutro y tierra de cualquier enchufe monofásico, dispone de dos conectores extra usados para comunicarse con el vehículo.



Figura 10: Conector IEC 62196-2 tipo 1 [[Electromovilidad](#)]

- **IEC 62196-2 “tipo 2”**: En este caso, se tiene un acoplador monofásico y trifásico. El conector, representado en la figura 8 y especificado en el estándar VDE –AR –E 2623 -2 -2, tiene hasta 63 A trifásicos, con una tensión entre 380 y 400 V en Europa central, por lo que puede proporcionar un máximo de 43,6 kW. De esta manera se reduce a menos de una hora el tiempo de recarga completa de las baterías preparadas para estos estándares. En la actualidad no es comúnmente usado en vehículos eléctricos, pudiéndose encontrar en algunos modelos como el Renault Zoe. Tiene un diámetro de 55 mm y cuenta con cuatro bornes para la corriente trifásica, el de tierra y dos para comunicaciones.



Figura 11: Conector IEC 62196-2 tipo 2 [Electromovilidad]

- **IEC 62196-2 “tipo 3”**: Se trata de un enchufe mono y trifásico con protecciones, capaz de proporcionar carga trifásica de hasta 32 A. Como puede apreciarse en la figura 9, este conector utiliza clavijas laterales del casquillo, que son requeridas en aplicaciones de semejante potencia en doce países y que ninguno de los enchufes anteriormente citados posee. La limitación de 32 A permite abaratar el coste de instalación y permite hasta una potencia de 22 kW.



Figura 12: Conector IEC 62196-2 tipo 3 [Electromovilidad]

5.3. MÉTODOS DE CARGA

En el caso de los vehículos eléctricos enchufables, existen diferentes maneras de cargar las baterías [Dhameja, 2002]:

- **Tensión constante**: Se trata de uno de los métodos de recarga más simple y es apto para cualquier tipo de batería. La corriente de la batería varía a lo largo del proceso de carga. Generalmente, esta corriente es alta al principio del proceso y va decreciendo gradualmente hasta cero cuando la batería está completamente cargada. El principal inconveniente de este método radica en la necesidad de una potencia muy elevada al comienzo de la carga, imposibilitando el uso de este tipo de recargas en la mayoría de estructuras residenciales y parking.
- **Corriente constante**: En este tipo de recarga, se controla la tensión aplicada a la batería con el fin de obtener una corriente constante durante todo el proceso. El SOC va creciendo linealmente con el tiempo. El reto de este método es cómo determinar que se ha realizado la carga completa con un SOC del 100%. El momento en que se considera que la batería está totalmente cargada se determina mediante una combinación de la subida de temperatura, la subida del gradiente de temperatura, el aumento de la tensión, el menor cambio de voltaje y el tiempo de carga.
- **Combinación de tensión constante y corriente constante**: Durante el proceso de carga de la batería, generalmente ambos métodos son usados. En la figura 10 se muestra el perfil de carga de una celda Li-ion. En el estado inicial la batería puede ser recargada a un baja y constante corriente si no ha sido recargada inicialmente.

Después, se comienza a cargar la batería a corriente constante, pero esta vez con un valor mayor. Cuando el voltaje de la batería (SOC) alcanza cierto umbral, se cambia la carga a tensión constante.

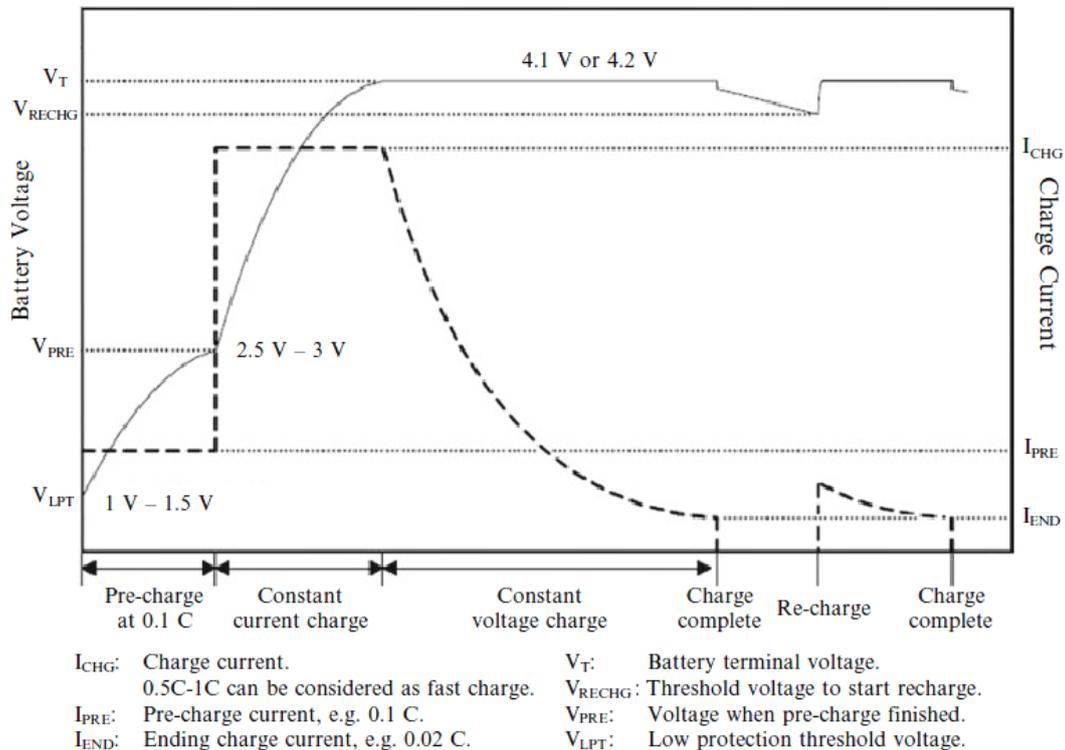


Figura 13: Combinación de tensión constante y corriente constante [Dhameja, 2002]

En base a esto, deben tenerse en cuenta algunas consideraciones. Para vehículos eléctricos es muy importante que las baterías puedan manejar la carga aleatoria asociada al frenado regenerativo. Esta potencia de frenado puede alcanzar niveles de cientos de kilovatios. Para garantizar la seguridad y correcto funcionamiento de las baterías, es necesario aplicar limitaciones.

Por otro lado, es de suma importancia conocer el momento en que debe pararse de cargar la batería. Sería ideal que el SOC pudiera conocerse de forma precisa, de manera que, cuando llegue a un cierto valor (100%), automáticamente se pare la carga.

Puesto que, en la actualidad es un gran reto estimar el estado exacto del SOC, se han implantado algunos métodos para parar el proceso de carga de la batería:

- **Tiempo de carga.** Es el método más típico de parada de carga, ya que puede ser usado para cualquier tipo de batería.
- **Temperatura de corte (TCO, Temperature Cut Off).** La carga se para si el valor absoluto de la temperatura de la batería alcanza un cierto valor.
- **Gradiente de la temperatura de corte (DTCO, Delta Temperature Cut Off).** Cuando el cambio del gradiente de temperatura de la batería excede el valor de seguridad, la carga se para.
- **Tasa de cambio de la temperatura (dT/dt , Temperature Change Rate).** Si la tasa de cambio de la temperatura es superior a un valor de seguridad, la carga concluirá.
- **Corriente mínima (I_{min} Minimum Current).** Cuando la corriente de carga alcanza el límite inferior I_{min} , el proceso de carga se para. Este método se usa generalmente en procesos de carga a tensión constante.

- **Límite de tensión** (*Voltage Limit*). Cuando la tensión de la batería alcanza un cierto valor, el proceso de carga finaliza. Este método, por lo general, es usado en procesos de carga a corriente constante.
- **Tasa de cambio de la tensión** (dV/dt , *Voltage Change Rate*). El proceso de carga finaliza si la tensión de la batería no varía respecto al tiempo o, incluso, si comienza a disminuir tomando valores negativos de dV/dt .
- **Caída de tensión** ($-\Delta V$, *Voltage Drop*). En las baterías de NiMH al finalizar el proceso de carga (SOC=100%), la temperatura de las celdas comienza a incrementarse debido a la recombinación del hidrógeno y los iones hidróxido, causando una caída en la tensión de la celda. El proceso de carga finalizará si se alcanza un valor de la tensión determinado.

5.4. ESTÁNDARES DE ENERGÍA

La gran limitación del vehículo eléctrico siempre ha sido la batería. Es necesario desarrollar un sistema de baterías que permita obtener la misma autonomía que un vehículo de combustión interna pudiendo obtener así, una ventaja competitiva real. Sin embargo, a medida que se van cumpliendo estos requisitos y el vehículo eléctrico se convierte en algo realmente tangible, surge el siguiente problema, que son las bases de carga. Si se pretende que la flota de vehículos eléctricos crezca drásticamente, también debe hacerse la infraestructura necesaria para abastecer la creciente demanda. Los primeros lugares considerados para la instalación de nuevos puntos de recarga son las viviendas y los centros de trabajo. Otros emplazamientos potenciales incluyen las gasolineras, los centros comerciales, restaurantes, lugares de ocio o colegios.

Existen varios estándares de energía transferida, e interfaces de conexión y comunicación para los vehículos eléctricos [Pokryzwa, 2011]. En la tabla 6 se recogen algunos de estos estándares que van a aparecer representados en la figura 11.

Tabla 6: Estándares de la carga de vehículos eléctricos. [Dhameja, 2002]

ESTÁNDAR	DESCRIPCIÓN
National Electric Code (Artículo 625)	Sistema de carga del vehículo eléctrico
SAE J2293	Sistema de transferencia de energía para vehículos eléctricos
SAE J2836	Recomendación para la comunicación entre los vehículos enchufables y la red utilitaria
SAE J1772	Acoplador conductor del cargador del vehículo eléctrico
SAE J1773	Acoplador inductivo del cargador del vehículo eléctrico
IEC 62196	Enchufes, acopladores de vehículos y entrada de vehículos-carga conductiva para vehículos eléctricos
IEEE 1547.3	Fuentes distribuidas interconectadas con sistemas de potencia eléctrica

Los estándares de la tabla 6, que pueden ser actualizados o modificados en cualquier momento, se dejan ver en la figura 11, donde se representa de manera esquemática el camino que sigue la energía desde la red utilitaria hasta el vehículo enchufable.

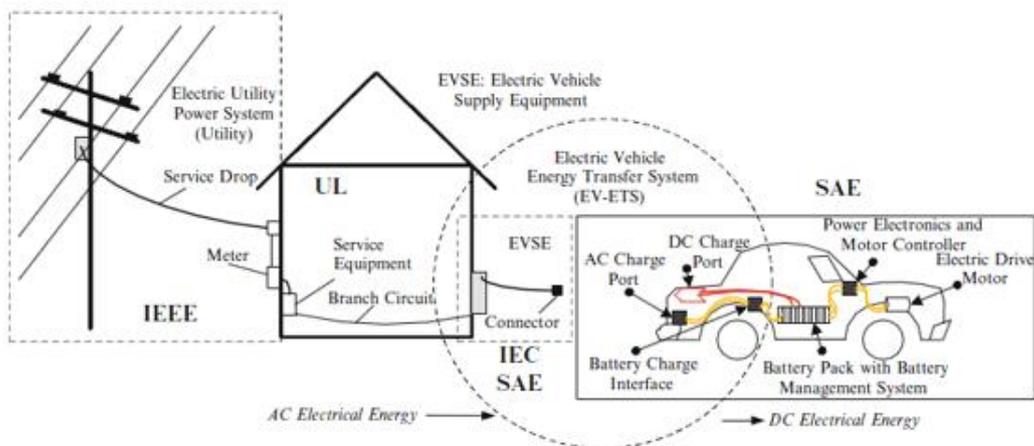


Figura 14: Sistema de transferencia de energía para la carga de un vehículo eléctrico [Dhameja, 2002]

Muchas compañías se preocupan por los niveles de potencia de carga de los vehículos eléctricos. En la tabla 7 se representan éstos niveles y los valores típicos de potencia de carga correspondientes. Los niveles I y II son aptos para el uso en viviendas y puede ser necesario limitar la potencia de carga para salvaguardar los dispositivos de abordo. Por ejemplo, en el caso de Chevy Volt y Nissan Leaf, se limita su potencia de carga a 2,2 kW [Boulanger, 2011].

Tabla 7: Niveles de potencia de carga de vehículos eléctricos. [Dhameja, 2002]

NIVEL DE CARGA	POTENCIA TÍPICA DE CARGA
Nivel I	1,5 – 3 kW
Nivel II	10 – 20 kW
Nivel III	A partir de 40 kW

El nivel III es apto para carga rápida, pudiendo dar una autonomía de 300 km en una hora de carga. El cargador debe estar fuera del vehículo siempre que la potencia de carga pueda exceder los 100 kW, lo que es un valor significativamente mayor a los obtenidos en los niveles I y II. Obviamente el nivel III no puede ser implementado en viviendas, pero es altamente beneficioso para gasolineras o estaciones de servicio.

5.5. IMPACTO DE LA CARGA DE EV EN EL SISTEMA DE DEMANDA

Las especificaciones técnicas de una flota EV (eléctrico puro o híbrido enchufable) y su consumo de energía, afectan a los requerimientos de energía de la carga de EV. La necesidad de cargar un EV está determinada por variables aleatorias, como la movilidad, en términos de distancia diaria viajada o el perfil de conducción del propietario. Esto hace imposible el uso de una metodología determinista en el análisis del consumo de energía de los vehículos eléctricos, siendo necesario tener en cuenta el comportamiento estocástico de los mismos. La demanda de energía de un vehículo eléctrico depende de la conectividad del mismo (tiempo y duración del periodo de enchufado) y de la disponibilidad de una infraestructura de carga (hogar, centro de trabajo, espacios públicos...). Estas dos variables son determinantes en el sistema de demanda diario. A continuación, se van a analizar estos factores relativos a España con el fin de obtener conclusiones representativas.

5.5.1. IDENTIFICACIÓN DE LA DEMANDA GENERADA POR LA CARGA DE VE

En este punto se pretende identificar la demanda adicional que supone la carga de los vehículos eléctricos considerando las especificaciones técnicas de los mismos así como los patrones del tráfico. Se presentan una serie de parámetros, que pueden clasificarse como constantes, es decir, que siempre se repiten o probabilísticos, pudiendo cambiar de unas ocasiones a otras:

- Parámetros constantes
 - Nivel de penetración de EV
 - Tecnología de las estaciones de carga (modo 1, 2 y 3)
 - Disponibilidad de carga (hogar, hogar y trabajo)
 - Pérdidas de carga
 - Estrategia de carga (de oportunidad, tarifa dual y carga inteligente)
- Parámetros probabilísticos
 - Clasificación de los EV
 - Distancia de viaje diaria
 - Conectividad de los EV (tiempo de retorno)

Estos parámetros serán utilizados más adelante, para evaluar de forma gráfica el impacto de la carga de los vehículos eléctricos en el sistema de demanda. Por este motivo, a continuación se van a definir cada uno de estos aspectos.

5.5.1.1. NIVEL DE PENETRACIÓN DE EV

Se refiere a la cantidad esperada de vehículos eléctricos en el mercado. En base a varios factores clave, como el desarrollo de las tecnologías de las baterías, los precios del combustible, las inversiones en las estaciones de carga, etc., se pueden identificar tres escenarios de ventas [\[Boulanger, 2011\]](#) y ofrecer un valor orientativo de número de vehículos que representa cada uno:

- Escenario 1: El más probable (137000 EV)
- Escenario 2: Más optimista que el escenario 1 (279000 EV)
- Escenario 3: Consumo muy agresivo de EV (570000 EV)

5.5.1.2. TECNOLOGÍA DE LAS ESTACIONES DE CARGA

Los parámetros que determinan el flujo máximo de potencia entre el EV y la red de potencia dependen de la línea de alimentación de la infraestructura de carga. El nivel de potencia de carga también afecta a la duración del ciclo de carga. Se asume que al final de cada ciclo de carga, la batería está totalmente cargada (SOC=100%).

5.5.1.3. DISPONIBILIDAD DE CARGA

Este punto se refiere a la disponibilidad de puntos de recarga para el propietario del vehículo. Las estrategias de carga a seguir según la disponibilidad de la misma cambiarán y, con ello, las curvas en la demanda, tal como se verá más adelante:

- **Cargar después del último viaje** (carga en el hogar): mientras la electrificación del transporte permanezca en la etapa inicial, los puntos de recarga serán limitados por lo que muchos de los propietarios no tendrán más opción que cargar el EV en sus propios puntos privados de carga.
- **Carga cuando un punto de carga (público o privado) esté disponible**: En el caso anterior, el propietario del EV solo cargará su coche cuando vuelva a casa; en este caso, el propietario también tiene opción de cargar el vehículo fuera de casa, por ejemplo, en su lugar de trabajo. Esto requiere la instalación de puntos de carga públicos o privados en varias áreas. Dado que no es posible definir el número exacto de vehículos que serán cargados en el hogar, en el estudio llevado a cabo por el proyecto MERGE [\[Hassett, 2011\]](#), se adoptan diferentes patrones:

- 75% hogar – 25% hogar/trabajo
 - 50% hogar – 50% hogar/trabajo
 - 25% hogar – 75% hogar/trabajo
- **Carga cuando el estado de la batería es inferior al nivel deseado:** La distancia promedio de viaje de un EV excede de los 100 km. Cuando la distancia diaria de viaje se ve limitada, por ejemplo, en áreas urbanas puede ser menor de 30 km, existe la posibilidad de que el propietario no cargue el vehículo diariamente, sino cuando sea necesario. En este caso debe asumirse que el propietario del vehículo cargará el vehículo cuando el estado de carga de la batería sea inferior a un límite, normalmente 40%.

5.5.1.4. PÉRDIDAS DE CARGA

Este parámetro expresa las pérdidas de la conversión AC/DC de la red a la carga DC de las baterías de los EV y viceversa debido a las interfaces electrónicas de potencia.

5.5.1.5. ESTRATEGIA DE CARGA

La evaluación de los impactos de la penetración del EV en el sistema de potencia debe tenerse en cuenta las estrategias de carga:

- **Carga de oportunidad:** Se trata del no planeado “plug and play” conexión de los vehículos eléctricos dentro de la red, típicamente tras el último viaje del día o cuando los puntos de carga están disponibles.
- **Carga de tarifas múltiples:** Éste es el método que el mercado normal sigue para gestionar la demanda de energía. Las tarifas más baratas de energía se implementan a horas específicas para desplazar la demanda de las horas fuera de pico.
- **Carga inteligente:** En este caso se tiene un efecto de “relleno del valle”. Se trata de mover la carga desde los periodos donde existen picos de demanda hasta los periodos fuera de picos. Generalmente, la movilidad de EV durante las horas fuera de pico es limitada, permitiendo una gestión efectiva de la carga.
- **Recarga inteligente:** Puede considerarse como una extensión de la carga inteligente. En esta estrategia, existe un flujo bidireccional entre el EV y la red. Se basa en el hecho de que la media diaria de la movilidad solo dura de 2 a 4 horas y los requerimientos de la respectiva energía son sólo una fracción de la capacidad de la batería. Los excesos de potencia de la batería se pueden utilizar durante las horas de pico de demanda como una fuente de energía o para la provisión de servicios auxiliares a la red, lo cual contribuye a obtener una operación más estable en la red de potencia.

5.6. IMPACTO DE LA CARGA DE EV EN EL SISTEMA DE DEMANDA DE ENERGÍA

Como se ha mencionado anteriormente, el aumento de ventas de vehículos eléctricos conlleva un aumento de demanda en el sistema energético [[Garcia-Valle, 2012](#)]. Es fundamental conocer y estudiar la repercusión de éste aumento de demanda para poder abastecer a los futuros vehículo que formarán parte de la flota de cada país.

Para poder entender el impacto que tiene el aumento de vehículos eléctricos que se deben enchufar a la red para cargar sus baterías en el sistema de demanda energético del país, se usarán diferentes gráficas en las que se tendrán en cuenta los escenarios mencionados anteriormente para cada una de las estrategias de carga. Estas graficas han sido obtenidas de un estudio realizado en el proyecto MERGE, en el que se analiza el impacto en el sistema de demanda de cinco países europeos [[Hassett, 2011](#)]. En este trabajo solo se hará alusión a los análisis realizados en España.

5.6.1. MÉTODO DE CARGA DE OPORTUNIDAD

En las figuras 12 y 13 se puede ver el diagrama del sistema de demanda que muestra el impacto de la flota de vehículos eléctricos en el sistema diario total durante el periodo de invierno y el de verano respectivamente. Durante el periodo de invierno, el pico aumenta en 0,54%, 1,12% y 2,32% para cada uno de los niveles de penetración respectivamente.

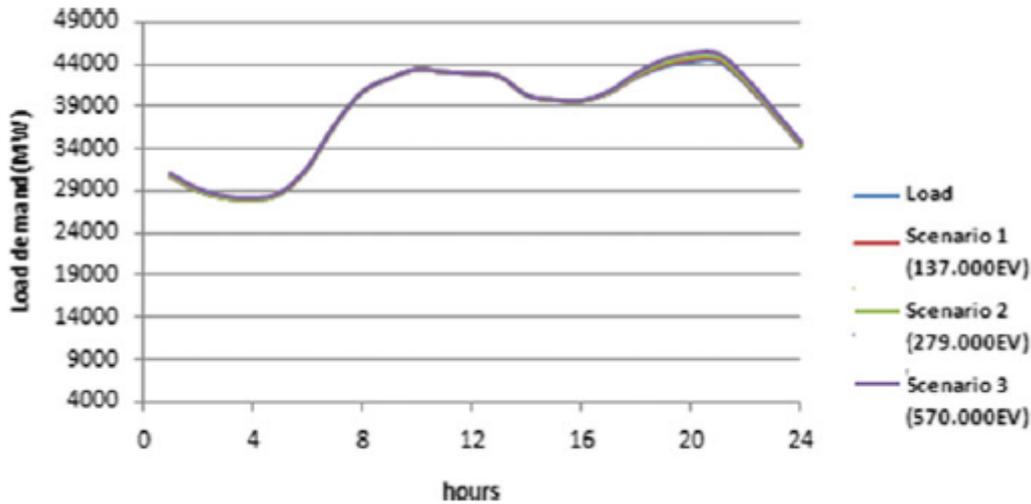


Figura 15: Diagrama del sistema de demanda de invierno en carga de oportunidad (España) [Hassett, 2011]

El método de carga representado en la figura 12 se basa en que no está planeado, es aleatorio, pudiendo ser al final del día, cuando el usuario ha llegado a casa, al principio del día, cuando llega al trabajo, o simplemente cuando exista un punto de recarga libre. La diferencia que se presenta respecto a la gráfica 13 es el periodo del año. Pese a la aleatoriedad de esta estrategia de carga, a la vista de las gráficas puede concluirse que las horas de mayor demanda coinciden con la llegada al trabajo de los usuarios así como la llegada al hogar.

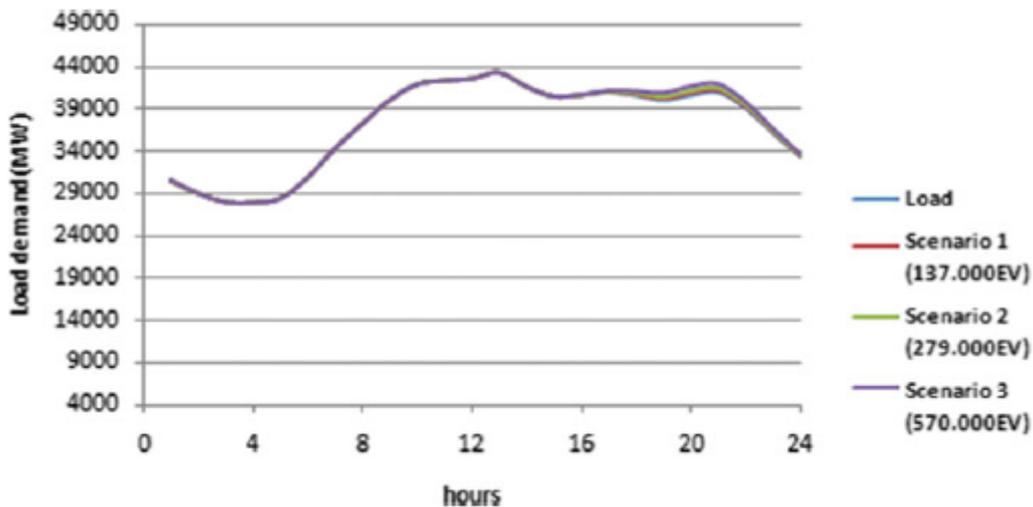


Figura 16: Diagrama del sistema de demanda de verano en carga de oportunidad (España) [Hassett, 2011]

5.6.2. MÉTODO DE CARGA MULTI TARIFA

La estrategia actual de las compañías energéticas es la de ofrecer un servicio multi tarifa en el que, en función del periodo del año o las horas del día los precios variarán. Con esto se pretende conseguir la disminución de los picos en las horas de mayor demanda y el aumento de los valles en las horas de baja

demanda. Esto se hace posible haciendo más barato el consumo durante la noche ya que se trata de un periodo de baja demanda. Un ejemplo de esta estrategia seguido por la empresa Iberdrola es:

- Periodo de invierno (1/11-30/4): Carga baja: (22:00-12:00)
- Periodo de verano (1/5-30/10): Carga baja: (23:00-12:00)

En la figura 14 se representa la demanda adicional debida a la carga de EV teniendo en cuenta la restricción de que el vehículo solo puede ser cargado en casa. De acuerdo a los escenarios de penetración definidos anteriormente, los requerimientos de energía adicional son de 798 MWh, 1629 MWh y 3315 MWh, respectivamente. La figura 15 representa la curva del sistema de carga modificado en un día típico de invierno.

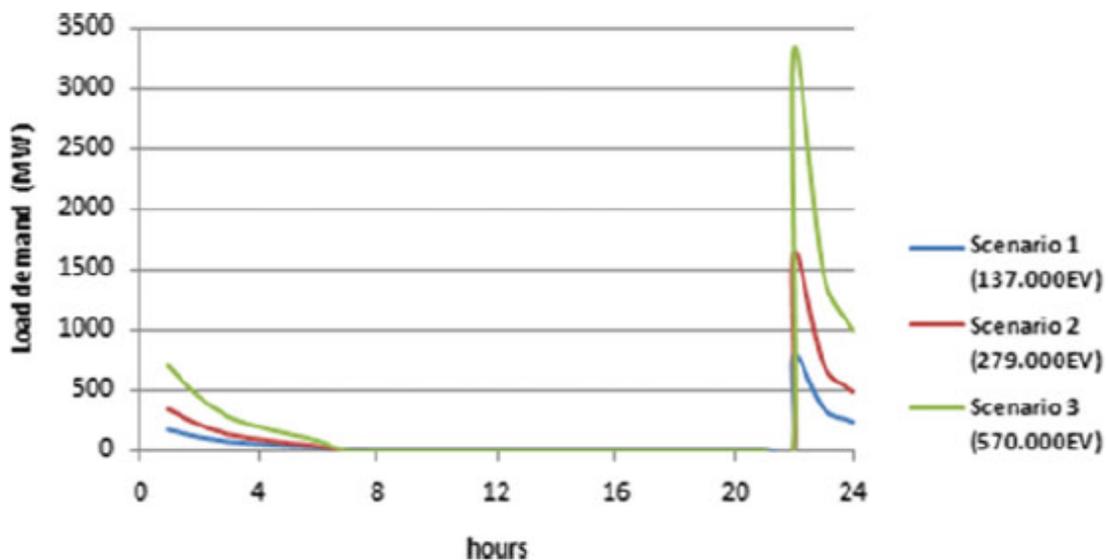


Figura 17: Demanda de carga de EV en tarifa dual (España) [Hassett, 2011]

Dado que en la figura 14 se tiene como restricción que la carga solo puede ser realizada en casa, la demanda es prácticamente nula durante el periodo laboral existiendo un pico de demanda a la hora en que el usuario regresa a casa. Puede apreciarse que, con esta estrategia, la demanda es nocturna, es decir, los vehículos serán cargados por la noche. Puesto que son las horas de menor demanda energética de los domicilios, esta estrategia presenta una gran ventaja en cuanto a consumo y, en muchas ocasiones puede suponer un ahorro gracias a la tarifa nocturna de las empresas energéticas.

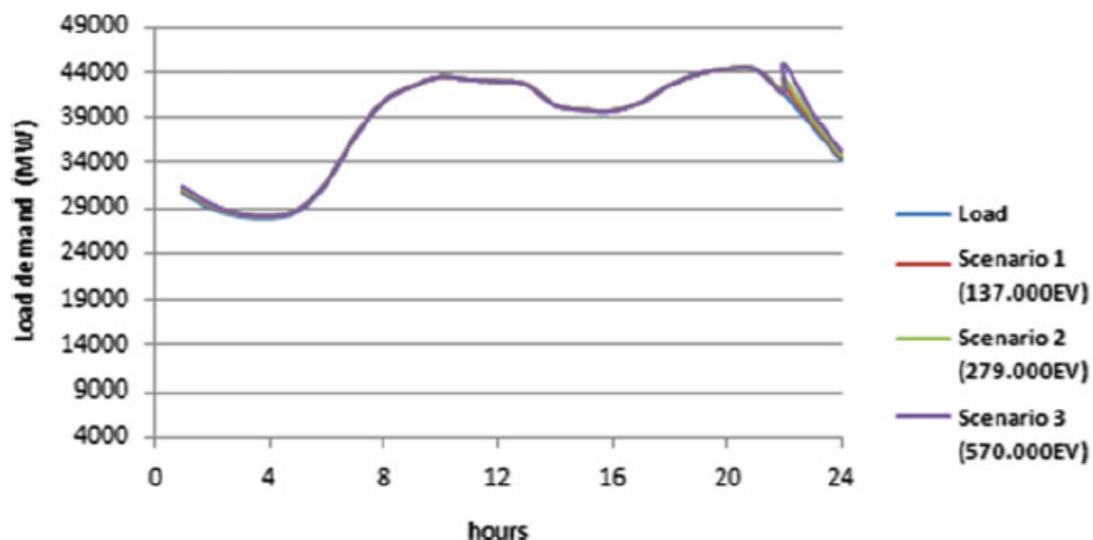


Figura 18: Diagrama de demanda en invierno para carga de tarifa dual (España) [Hassett, 2011]

En la figura 15 se elimina la restricción anterior pero se mantiene la base de la estrategia multitarifa, en la que las empresas energéticas ofrecen tarifas más baratas a determinadas horas del día. Al contrario que en el caso anterior, la gran demanda de carga se observa a lo largo del día, al comenzar la jornada laboral y al llegar a casa. A diferencia de la estrategia de carga de oportunidad, representada en la gráfica 12, aquí se presenta un pico de demanda que corresponde, presumiblemente, con el comienzo de la tarifa barata de la compañía energética.

5.6.3. MÉTODO DE CARGA INTELIGENTE

En las figuras 16 y 17 se muestra la demanda adicional de carga para los tres escenarios de penetración bajo el concepto de carga inteligente.

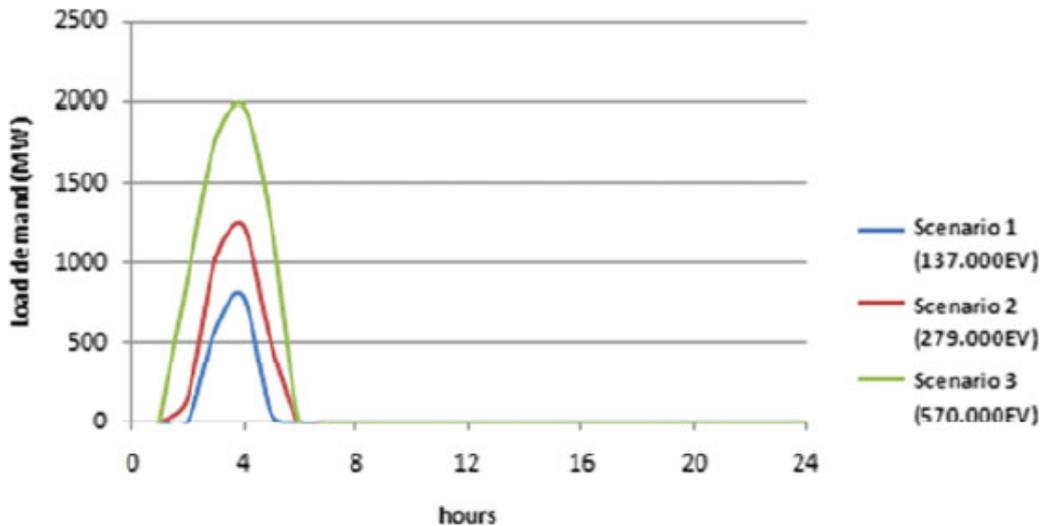


Figura 19: Demanda de EV en carga inteligente (España) [Hassett, 2011]

Por último, en la estrategia de carga inteligente, se pretende desplazar la demanda a las horas valle, es decir, las horas de menos demanda energética. Tal como se aprecia en la figura 16, estas horas corresponden a la madrugada y, tal como cabe esperar, la demanda será mayor en el escenario 3, donde el número de vehículos prácticamente triplica al del escenario 1.

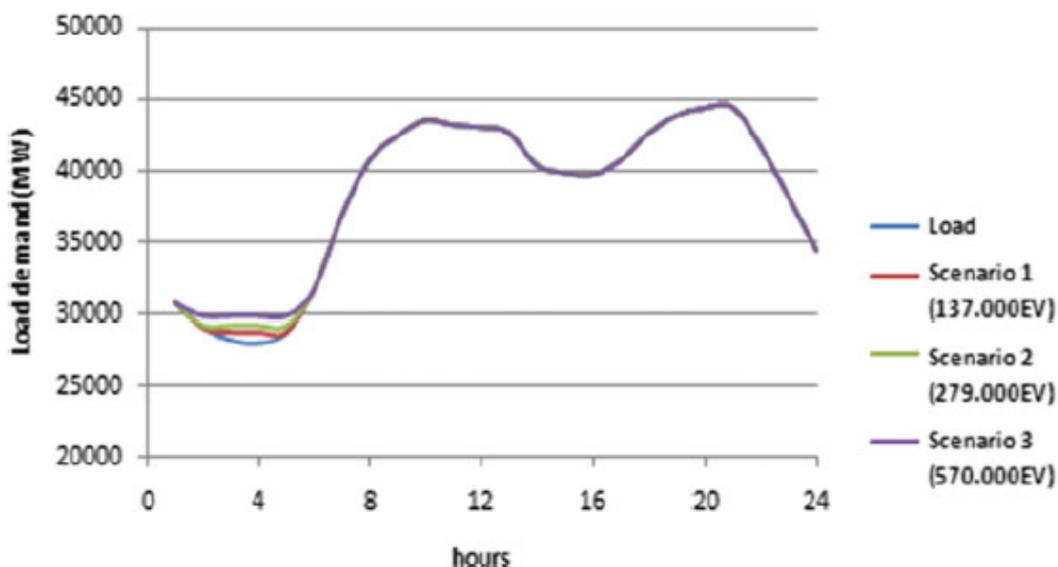


Figura 20: Diagrama de demanda en el sistema de invierno para carga inteligente (España) [Hassett, 2011]

En la figura 17 puede apreciarse la carga (*load*), que corresponde a la entrega de energía al sistema por parte de las baterías. Tal como se ha definido en la estrategia de recarga inteligente, el uso de los

vehículos se ve reducido a unas pocas horas al día, consumiéndose solo una parte de la capacidad de la batería. Este exceso de potencia de la batería, puede aprovecharse como fuente de energía llegando, incluso, a aprovisionar a la red.

5.7. CONCLUSIONES

En las secciones anteriores se han identificado las necesidades y requisitos adicionales de energía para poder cumplir con la carga de los vehículos eléctricos así como su impacto en el sistema anual y diario de demanda considerando diferentes modos de carga.

Basándose en este análisis, se puede considerar a la carga de oportunidad como el peor de los casos. Cuando la carga de EV se realiza de forma no planificada, el perfil de la demanda de carga es altamente dependiente del tiempo de vuelta desde el último viaje del día. Puesto que la llegada al hogar generalmente coincide con el incremento del consumo residencial, la demanda de EV se puede sincronizar con el pico de carga del sistema. Por lo tanto, la estrategia de carga de oportunidad podría dar como resultado congestiones en la red local de distribución y una mayor participación de vehículos eléctricos podrían conllevar a la necesidad de inversiones en la red.

El impacto en la red provocado por la carga en el hogar de los vehículos eléctricos puede ser limitado desarrollando infraestructuras de carga en los lugares de trabajo. En este caso, parte de las necesidades diarias de los EV, como el consumo de la batería por conducir de casa al trabajo pueden solventarse durante las horas de trabajo, cuando el sistema de demanda aún es relativamente bajo. Como el número de carga de EV en los lugares de trabajo incrementa, el pico adicional del sistema de demanda debido a la estrategia de carga de oportunidad se reduce.

La carga de tarifa dual es más efectiva que la carga de oportunidad, ya que permite el cambio de la demanda de EV de altas horas de carga a horas de poca actividad. Sin embargo es posible que resulte en un fuerte aumento de la demanda al comienzo de periodo de bajo coste de la energía que podría afectar a la operación de la red.

La carga inteligente, por su parte, evita las altas cargas de pico al asignar la demanda de EV en las horas fuera de pico. La demanda de EV es manejada de manera que se reduzcan las variaciones del sistema de carga entre las horas fuera de pico y las horas de alta carga. La carga inteligente es la estrategia más efectiva; sin embargo, su implementación no es sencilla y para un alto número de vehículos requiere de técnicas de control avanzadas.

6. CONCLUSIONES

Como se ha dicho en varias ocasiones, la movilidad sostenible va a incrementar su implementación en el mercado gracias por una parte a la implicación de la sociedad frente al cambio climático y por otra parte al gobierno y sus restricciones que hacen que los fabricantes busquen la manera de seguir vendiendo vehículos que cumplan las normativas y que puedan circular por el centro de todas las ciudades.

En este punto, la estrategia a seguir es muy variable, por una parte se puede elegir un vehículo eléctrico puro, híbrido no enchufable, híbrido enchufable... Una vez tomada esta decisión debe seleccionarse el tipo de batería que se va a implementar. Aquí la estrategia la marcan tanto el fabricante como el tipo de vehículo escogido. Deben tenerse claro qué características se quieren ensalzar y qué propiedades pueden perderse respecto a las demás. Otra decisión importante es el número de celdas de la batería. Puede optarse por pocas celdas grandes unidas en serie o por muchas celdas pequeñas unidas en serie y en paralelo de manera que se obtengan la tensión y corriente necesarias. De esta elección va a depender la disposición de la batería en el vehículo.

A diferencia de lo que se podría pensar, la implementación de estos vehículos no es tan sencilla como diseñar la batería, emplazarla en el interior y conectarla al motor eléctrico. Para asegurar el correcto funcionamiento de la batería así como mantener su vida útil, es necesario realizar un control sobre la batería. Este control viene dado por diferentes sistemas de gestión que deben monitorizar cada una de las celdas de la batería. La extensión y el coste de estos sistemas dependerá de la estrategia seguida al seleccionar el tipo de batería. Dado que, para realizar un control exhaustivo es necesario monitorizar cada una de las celdas, si la estrategia seguida es la de muchas celdas pequeñas unidas en serie o en paralelo, aumentará la complejidad del sistema de gestión y con ello el coste del mismo. Los fabricantes deben llegar a una solución de compromiso entre un control cien por cien de la batería y el coste añadido del mismo.

Por otra parte, un aumento en el número de vehículos eléctricos conlleva a un aumento en la demanda de energía. Las ciudades deben adaptarse a esta nueva demanda implementando puntos de recarga en espacios públicos. Además los usuarios también deberán colocar puntos de recarga en sus hogares. Esto conlleva a preguntarse si realmente estamos preparados para un aumento drástico de vehículos eléctricos en el mercado. Por otra parte, si el número de vehículos eléctricos aumentara de forma espectacular, las empresas energéticas deben tener la capacidad de producir la cantidad de energía demandada y, este aumento de la demanda, podría llevar a un incremento del precio.

Al hablar de vehículos eléctricos o movilidad sostenible se tiende a pensar en un elemento que no contamina y no se podría estar más lejos de la realidad. Si bien es cierto que durante la conducción este tipo de vehículos no realizan emisiones, durante el proceso de fabricación de sus baterías se realizan procesos contaminantes además del uso de materiales tóxicos. Por otra parte, la generación de energía eléctrica también es un proceso contaminante. Como colofón, debe tenerse en cuenta qué se hace con las baterías cuando un vehículo eléctrico llega al final de su vida. A diferencia de los vehículos de motores de combustión interna, las baterías deben ser sustraídas y debidamente recicladas. A día de hoy no se cuenta con la infraestructura necesaria para hacerse cargo de las baterías en desuso de los vehículos eléctricos por lo que es razonable pensar que, si la venta de éstos aumenta, la situación será aún peor.

Tratándose de una gran alternativa para el desarrollo sostenible, los vehículos eléctricos parecen ser el futuro de la automoción pero, de no tratarse los temas descritos, esta alternativa no podrá hacerse realidad. La implementación real no solo depende de fabricantes y usuarios, sino que engloba a empresas energéticas, ayuntamientos de las ciudades, plantas de reciclaje...

BIBLIOGRAFÍA

Las siguientes referencias han sido citadas en el presente documento. En las citas se da el apellido del autor principal y el año de publicación. Las citas se han ordenado alfabéticamente según el primer apellido del primer autor:

- Affanni, A; Bellini, A; Franceschini, G; Guglielmi, P & Tassoni, C. *Battery choice and management for new-generation electric vehicles*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol 52, no 5, 2005.
- Allen, J. High cycle life cathode for high voltage (5v) lithium ion batteries. Defense Technical Information Center, 2010.
- Baker, E., Chon, H. & Keisler, J. *Battery Technology for Electric and Hybrid Vehicles: Expert Views About Prospects for Advancement, Technological Forecasting and Social Change*. Elsevier, vol 77, no 7, pp 1139-1146, ISSN 00401625, 10.1016, 2010 .
- Barsukov, Y. & Qian, J. *Battery Power Management for Portable Devices*. Ed: Artech House, 2013.
- Boulanger, A., Chu, A., Suzanne, M., Waltz, D. *Vehicle electrification: status and issues*. Journal: Proceedings of the IEE, vol 99, no 6, pp 1116-1138, 2011.
- Cheng, K., Divakar, B., Wu, H., Kai, D., & Ho Fai Fo. *Battery-Management System and SOC Development for Electrical Vehicles*. Vehicular Technology, Proceedings of the IEEE, 2011.
- Corrigan, D. & Masias, A. *Batteries for electric and hybrid vehicles*. Ed: McGraw Hill, 2011
- Dhameja, S. *Electric Vehicle Battery Systems*. Ed: Butterworth-Heinemann. 241 p. ISBN 0-7506-9916-7, 2002.
- Dubarry, M., Vuillaume, N. & Liaw, B. *From single cell model to battery pack simulation for Li-ion batteries*. Journal of Power Sources, vol 186, no 2, pp 708-713, 2009
- Electromovilidad. Página web de proveedor. Fecha de consulta: 03/11/2018. Disponible en <https://electromovilidad.wordpress.com/conectores-para-la-recarga-del-vehiculo-electrico/>
- Energy EV: Página web del fabricante. Fecha de consulta: 03/10/2018. Disponible en: <http://www.peve.jp/e/hevkinzoku.html>
- Garcia-Valle, R., Peças, J. *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*. Ed: Springer, Primera Edición, 2012
- Giglioli, R., Pelacchi, P., Raugi, M. & Zini, G. *A state of charge observer for lead-acid batteries*. International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), vol 06, no 07, ISSN 2278-7798, 1998.
- Gould, C., Bingham, C., Stone, D. & Bentley, P. *New battery model and state-of-health determination through subspace parameter estimation and state-observer techniques*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 58, no. 8, pp. 3905-3916, Oct. 2009
- Hassett, B., Bower, E. & Alexander, M. *Mobile Energy Resources in Grids of Electricity*. Proyecto MERGE, 2011.
- Higashimoto, K., Homma, H., Uemura, Y., Kawai, H., Saibara, S. & Hirinaka, K. *Automotive lithium-ion battery*. Ed: Hitachi Hyoron, 2010.
- Howell, D., Duong, T., Faguy, P. & Cunningham, B. *Annual progress report for energy storage R&D*. Vehicle Technologies Program: Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S. Department of Energy, Washington, 2010.
- Johnson, VH. *Battery performance models in ADVISOR*. Journal of Power Sources, vol 110, no 2, pp 321-329, 2011.
- Kawasaki: Página oficial. Fecha de consulta: 20/12/2018. Disponible en: <http://www.khi.co.jp/english/gil/index.html>

- Lawson, B. Página especialista en baterías. Fecha de consulta: 12/01/2019. Disponible en <https://www.mpoweruk.com/>
- Moore, S. & Schneider, P. *A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems*. SAE Technical Paper: 2001-01-0959, 2001.
- Ouyang, M., Lu, L., Han, X., Li, J. & Hua, J. *A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles*. Journal of Power Sources, vol 226, 272–288, 2013.
- Ovshinsky, S., Fetcenko, M., Reichman, B., Young, K. & Chao B. *Electrochemical Hydrogen Storage Alloys And Batteries Containing Heterogeneous Powder Particles* Us Patent 5,616,432 J (1997)
- Pastor, J. (2016) *Adiós litio, hola magnesio: En Toyota creen que ese es el future de las baterías*. Fecha de consulta: 21/10/2018. Disponible en: <https://www.xataka.com/investigacion/adios-litio-hola-magnesio-en-toyota-creen-que-ese-es-el-futuro-de-las-baterias>
- Pokryzwa, J. *SAE ground vehicle standards SmartGrid*. SAE international, Vol: 2, Pub:4, 2011
- Ramos, J. (2018). *El grafeno apunta a revolucionar el coche eléctrico*. Fecha de consulta: 21/10/2018. Disponible en: <https://www.renault.es/gama-renault/gama-vehiculos-electricos/site-vehiculos-electricos/grafeno-bateria-coche-electrico/>
- Salameh, Z., Casacca, M. & Lynch, W. *A mathematical model for lead-acid batteries*. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol 7, pp 93-98, 1992.
- Sitterly, M., Wang, L., Yin G. & Wang, C. *Enhanced identification of battery models for real-time battery management*. IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol 2, no 3, 2011.
- Strunz, K. & Louie, H. *Cache Energy Control for Storage: Power System Integration and Education Based on Analogies Derived From Computer Engineering*. IEEE Transactions on Power Systems, vol 24, no 1, pp 12-19, 2009.
- Tan, T., Yumoto, H., Derrick B., Fattig, B. & Hartzog, D. *Development of Safe and High Power Batteries for HEVs*. The World Electric Vehicle Journal, vol 2, pp 76-82, 2008.
- Tanaka, N. *Technology Roadmap, Electric and plug-in hybrid electric vehicles*. Agencia Internacional de Energía, 2009.
- Tesla: Página oficial del fabricante. Fecha de consulta: 25/12/2018. Disponible en: https://www.tesla.com/es_ES/
- *United State Council for Automotive Research LLC*. Fecha de consulta: 20/10/2018. Disponible en: http://www.uscar.org/guest/article_view.php?articlres_id=85
- Wang, L., Yin, G. & Zhao, Y. *System identification with quantized observations*. Ed: Birkhauser. ISBN: 978-0-8176-4956-2, 2010.
- Weicker, P. *A Systems Approach to Lithium-Ion Battery Management*. Ed: Artech House, 2014
- Xing, Y., W M Ma, E., Tsui, K. & Pecht, M. *Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles*. Ed: Energies, vol: 4, 2011.
- Young, K., Wang, C., Wang, L. & Strunz, K. *Electric Vehicle Battery Technologies*. Ed: Springer, 2010.

A continuación, se presenta una bibliografía complementaria, de gran utilidad para el entendimiento y desarrollo de algunos temas pero que no ha sido citada a lo largo del presente documento.

- Brilmyer, G. *Impact of separator design on battery performance in traction applications*. Journal of Power Sources, vol: 78, no: 1-2, pp: 68-72, 1999.
- Broussely, M. *Industrial Applications of Batteries: Traction Batteries. Ev and HEV*. Elsevier, ISBN: 978-0-444-52160-6, pp: 203-271, 2007.
- Chunhua, L., Chau, K., Diyun, W. & Shuang, g. *Opportunities and Challenges of Vehicle-to-Home, Vehicle-to-Vehicle and Vehicle-to-Grid Technologies*. Proceedings of the IEEE, vol 101, no 11, pp 2049-2427, 2013.
- Cusenza, M., Bobba, S., Ardente, F., Cellura, M. & Di perso, F. *Energy and environmental assessment of traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles*. CIRP annals-manufacturing Technology, vol 66, 2017.
- Deiters, J., Böhnstedt, W., Boesler, J. & Ihmels, K. *A new polyethylene separator for heavy duty traction batteries*. Journal of Power Sources vol 158, no 2, pp 1069-1072, 2006.
- Doyle, A. & Muneer, T. *Traction energy and battery performance modelling*. Ed: Elsevier, ISBN 9780128030219 pp 93-124, 2017.
- Dyke, K., Schofield, N. & Barnes, M. *The Impact of Transport Electrification on Electrical Networks*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol 57, no 12, pp 3917-3926, 2010.
- Friedrichsková, K., Vala, D. & Horák, B. *Testing of the traction batteries in electric vehicles and their further use*. Ed: Elsevier, ISSN 2405-8963, vol 48, no 4, pp 272-277, 2015.
- Friel, D. *Electric and Hybrid Vehicles: Management of Batteries for Electric Traction Veicles*. Ed: Elsevier. ISBN: 978-0-444-53565-8, pp: 493-515, 2010.
- Garcia, P., Fernandez, L., Garcia, C. & Jurado, F. *Energy Management System of Fuel-Cell-Battery Hybrid Tramway*. IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol 57, no 12, pp 4013-4023, 2010.
- Hayashiya, H., Suzuki, T., Hino, M., Hara, D., Tojo, M., Shimada, S., Kudo, K., Kato, T & Takahashi, H. *17th European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE conferences*, Pag: 1-9, 2015.
- Kuperman, A., Levy, U., Goren, J., Zafransky, A. & SAvernin, A. *Battery Charger for Electric Vehicle Traction Battery Switch Station*. IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol 60, no 12, pp 5391-5399, 2013.
- Tomazic, G. *Considerations Regarding the Comparison of Traction Batteries*. IEEE conferences, Pag: 96-103, 1994.
- Warthmann, W. *New Maintenance Free Nickel-Cadmium-Traction-Batteries in Fibre Technology*. IEEE Aerospace and Electronic System Magazine, vol 8, no 5, pp 29-31, 1993.
- Xianmin, L. & Yuanlei, Y. *Research in the calculation method and dynamic modeling of traction battery SOC for electric vehicle*. IEEE conferences. Pag: 6778-6782, 2011.

