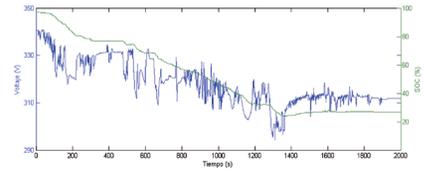


El envejecimiento de las baterías de un vehículo eléctrico y cómo lo percibe el conductor



The electric vehicle battery ageing and how it is perceived by its driver



Lluc Canals-Casals¹, Beatriz Amante-García¹, Santi Castellà-Dagà²

¹ UPC. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Industrial y Aeronáutica de Terrassa. Calle Colom, 11 – 08222 Terrassa. Tfno: +34 937 398154.

lluc.canals@upc.edu

² Centro Técnico SEAT. Dpto. EG-13. A-2 km 582 – 08760 Martorell.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7599> | Recibido: 27/03/2015 • Aceptado: 17/07/2015

ABSTRACT

- The electric vehicle is steadily entering into the automotive market. Most of these vehicles are equipped with Li-ion batteries to store the electric energy. Despite of the fast charge and the autonomy range, one of the major concerns of car manufacturers and users refers to the battery ageing. Similarly to laptops and mobile phones, the batteries from electric vehicles performance reduces through its lifetime. This is the reason why car manufacturers defined the end-of-life of a battery for automotive purposes when it has lost a 20% of its capacity to store energy. This study analyzes the battery ageing of a Plug-in Hybrid electric vehicle. It presents some factors that impact on the capacity fade, some of the effects they have on the battery energy loss caused by ageing and how the energy loss is distributed. Moreover, the driver's perception of the battery ageing will be evaluated and how the battery transmits these performance losses to the rest of components in the vehicle. In fact, it has been observed that the capacity fade is transmitted almost entirely, similarly to the loss of energy and power caused by the internal resistance increase. However, the incertitude brought by external factors, such as climatology, brake energy recovery or the driving conditions, makes it really difficult for the driver to perceive this battery degradation before it reaches the end-of-life.
- **Keywords:** Electric vehicle, Battery, Lithium, Ageing, Capacity.

RESUMEN

El vehículo eléctrico está entrando en el mercado de la automoción de manera suave pero continuada. Los vehículos eléctricos que mayormente están ocupando este nicho de mercado utilizan baterías de Litio-ión para almacenar la energía eléctrica. A parte de la velocidad de carga y de la autonomía de este tipo de vehículos, una de las mayores preocupaciones que tienen, tanto los fabricantes de vehículos como los posibles compradores, hace referencia al envejecimiento de las baterías.

De un modo similar a lo que ocurre con las baterías de teléfonos móviles y ordenadores portátiles, las baterías de vehículos eléctricos van perdiendo prestaciones a lo largo de la vida del vehículo. Es por este motivo que los fabricantes de automóviles han definido que una batería ya no es apta para el sector de la automoción cuando esta ha perdido un 20% de su capacidad de almacenar energía.

En este estudio se analiza el envejecimiento de una batería de un vehículo híbrido enchufable a lo largo de su vida útil. Se muestran algunos factores que afectan a la pérdida de capacidad de la batería, sus efectos trasladados a pérdidas energéticas por envejecimiento y con qué proporción lo hacen.

Asimismo, se valora qué es capaz de percibir el conductor y cómo la batería transmite su envejecimiento al resto de componentes del vehículo.

De hecho, se observó que la pérdida de capacidad de la batería se transmite casi directamente, así como los efectos de la pérdida de potencia y energía debido al aumento de la resistencia interna. De todos modos, la incertidumbre producida por factores externos, como son la climatología, las condiciones de conducción o la recuperación de energía al frenar, hacen que la percepción de la degradación de la batería antes de que esta alcance el final de vida por parte del conductor sea casi nula.

Palabras clave: Vehículo eléctrico, Baterías, Litio, Envejecimiento, Capacidad.

1. INTRODUCCIÓN

Los vehículos eléctricos (VE) están entrando cada vez con más ímpetu en el mercado de la automoción. Aunque en España su aparición es incipiente, en otros países de Europa, como en el caso de Noruega, el EV ha llegado a conseguir el 5,6% de las ventas en el mercado de vehículos de pasajeros [1]. La mayoría de estos vehículos utilizan baterías de ión de litio para almacenar la energía [2]. Igual que pasa con otras baterías y pilas, las del EV se degradan tanto cuando están ciclando como en reposo, perdiendo capacidad y potencia [3]. En particular, se considera que estas ya no son aptas para los usos de tracción cuando han perdido un 20% de su capacidad [4],[5], definiendo la capacidad como los Ah que una batería es capaz de ofrecer.

Una batería de EV está formada por una suma de celdas conectadas en serie formando módulos y estos, conectados a su vez en serie o paralelo, forman la batería completa o el "battery pack" como muchos fabricantes les llaman.

El envejecimiento de las celdas, o el estado de salud (SOH, de *State of Health* en inglés) depende de varios factores, como son la temperatura de trabajo, la profundidad de descarga (DOD), la corriente de carga y descarga (*C-rate*) y el estado de carga (SOC) que producen distintos efectos en las baterías. En general, cuando más elevados son todos estos factores (SOC, DOD, T, *C-rate*), más se acelera el envejecimiento, aunque no siempre es así ni lo ha-

cen en la misma proporción. Por ejemplo, cuando la temperatura está por debajo de 0°C, aparecen efectos que raramente ocurren a temperaturas positivas, como la deposición metálica de Litio, que aceleran el envejecimiento de la batería cuando más fría está [6], [7], [8]. A efectos prácticos, se puede identificar el envejecimiento en una pérdida de capacidad, de energía entregada, de potencia

una de ellas. Si hay demasiada diferencia entre ellas, el BMS impone restricciones de potencia y hasta puede llegar a parar la descarga. En el caso de estudio que presentaremos, el desbalanceo máximo entre celdas estaba limitado a 0,2V. Es por este motivo que se argumenta que el envejecimiento de una batería lo marcan las celdas más degradadas [10].

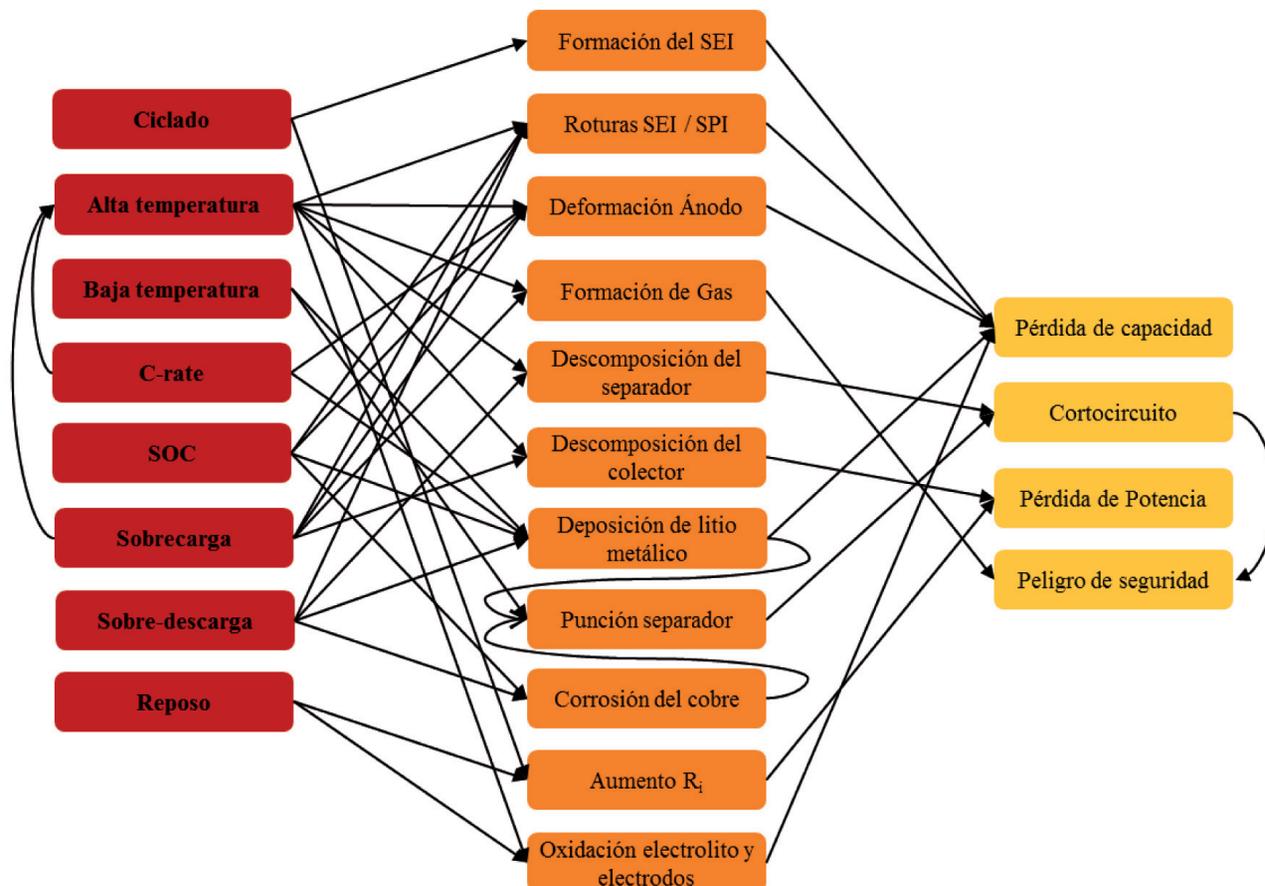


Fig.1: Esquema de los factores, efectos y repercusiones sobre el envejecimiento y degradación de una batería de Litio

y seguridad. La Fig.1 muestra, de forma esquemática, la complejidad y las interrelaciones entre los factores causantes del envejecimiento, los efectos físico/químicos que provocan y la repercusión que estos últimos tienen en las prestaciones de la batería.

Esta pérdida de capacidad, de energía y de potencia entregada las traducimos en 3 secciones que clasificaremos cómo:

- Efectos electroquímicos y químico-físicos: Los distintos elementos de una batería se degradan a medida que esta cicla. Poco a poco disminuye la cantidad de Litio útil para realizar el intercambio de electrones, también se deforman los electrodos debido a la intercalación de iones, además se crean dendritas, aparecen gases y partículas de litio metálico y toda una serie de efectos que van deteriorando la batería [8]. A modo de ejemplo, se ha observado que el Litio se deposita en forma de sales y otros compuestos en el ánodo, formando el SEI (*Solid Electrolyte Interface* en inglés), haciendo más difícil las intercalaciones de los iones en los electrodos [9].
- Desbalanceo: La pérdida por desbalanceo no es propia de la batería en sí misma, sino del sistema de control o "Battery Management System" (BMS) que tienen todas las baterías de litio para asegurar el correcto y seguro funcionamiento. Como no todas las celdas que forman una batería se degradan exactamente igual, el BMS controla el voltaje de cada

- Eficiencia: Al degradarse la batería, por las diferentes razones expuestas y mostradas en la Fig.1, también aumenta su resistencia interna (R_i). Esto hace que las pérdidas energéticas por calor aumenten, que se pierda potencia y se reduzca la eficiencia de la batería tanto en cargas como en descargas.

Para ofrecer mayores garantías al cliente, teniendo en cuenta estos tres efectos, y asegurar un envejecimiento más suave de las baterías, los fabricantes de vehículos limitan y controlan el rango de trabajo, la corriente y la temperatura de descarga de las mismas. Esto se consigue con el uso del BMS, que verifica parámetros como la corriente, el voltaje, el estado de carga y la temperatura de todas y cada una de las celdas de la batería. Por otro lado, se actúa también sobre el sistema de refrigeración, si este lo permite [11].

Basándonos en los datos de un vehículo híbrido enchufable (PHEV) y mediante los ensayos de laboratorio que se realizaron para verificar el estado de salud de las baterías, se procede a encontrar el peso de cada uno de los factores que afectan a la pérdida de capacidad e identificaremos la pérdida real de prestaciones que la batería transmite al usuario.

Para conseguir los requerimientos de aceleración, velocidad y autonomía del PHEV en estudio, se fabricó una batería con 84 celdas de litio de Grafito y NMC (con Níquel, Manganeso y Cobalto)

de 37,3Ah colocadas en módulos de 6 celdas conectadas en serie con una energía almacenable total de 11,6 kWh. Su temperatura de trabajo está limitada entre -40°C a 50°C, la intensidad máxima de carga y descarga son de 320A y 500A respectivamente, aunque nunca se llega a estos límites ya que el vehículo introduce limitaciones adicionales para reforzar la seguridad. Hay otras muchas tecnologías utilizadas como ánodo o cátodo a parte de grafito y el NMC, por ejemplo los de Níquel Aluminio Cobalto (NCA), los de Fosfato de Hierro (LFP) o de Titanio (LTO) entre otros. Las distintas combinaciones permiten obtener más o menos densidad energética, densidad de potencia, seguridad o durabilidad, dependiendo de las prestaciones que se quieren obtener. Al estar todas las celdas de la batería conectadas en serie, la intensidad de corriente que circula a través de ellas es siempre la misma. El único factor de envejecimiento de las celdas de baterías que puede variar sustancialmente, por configuración y colocación en vehículo, es la temperatura a la que están sometidas las celdas. Por este motivo, es importante el diseño del sistema de refrigeración de la batería. Este estudio pretende mostrar cómo envejece el "battery pack" y cómo afecta a las prestaciones del coche.

Al haber, en un vehículo, otros elementos que también consumen energía, la pérdida de capacidad percibida por el conductor depende también de otros factores: Como el tipo de conducción (más o menos agresivo), el trayecto y las condiciones climatológicas (por la aplicación de sistemas auxiliares de climatización) [12], [13]. Un pequeño análisis de los mismos nos permitirá valorar el peso de estas variabilidades en la percepción de pérdida de prestaciones por parte del conductor.

2. MATERIALES Y METODOS

Para la obtención de los datos necesarios para la realización del presente trabajo, se han utilizado dos fuentes experimentales de datos. La primera se centró en la recolección de valores a partir de los trayectos realizados por el PHEV, que fue prestado durante períodos de tres meses a distintas personas que tuvieran la posibilidad de cargarlo en casa. La segunda se basa en los datos obtenidos de los ensayos de mantenimiento en laboratorio a los que fue sometida la batería de dicho vehículo, cuando había perdido cerca de un 10% y un 20% del SOH.

La primera parte de recolección de datos se hizo directamente a bordo del vehículo: Este vehículo prototipo híbrido enchufable se equipó para realizar, cada segundo, captura y almacenamiento de datos de corriente (A), voltaje de celdas y batería completa (V), temperatura de las celdas y batería (°C) y corriente acumulada

(Ah), permitiendo ser explotados posteriormente. Para poder comparar trayectos equivalentes, se seleccionaron aquellos trayectos en cuyos inicios la batería estaba completamente cargada y que eran suficientemente largos como para tener una descarga completa de la batería, obteniendo un total de 16 trayectos con estas mismas características. Es evidente que el vehículo realizó muchos más trayectos, de diferente duración y condiciones iniciales y finales además de los aquí descritos.

La (Fig. 2) muestra un ejemplo de descarga completa de la batería en un trayecto. Se puede apreciar cómo la descarga no es constante (eje izquierdo), teniendo pequeños altibajos en el voltaje (eje derecho) debidos a la recuperación de energía en las frenadas.

Como hemos comentado, los fabricantes de vehículos añaden limitaciones a las baterías con el fin de mejorar la seguridad y alargarles la vida útil. En el caso de estudio, la batería del PHEV se consideraba descargada cuando el SOC alcanzaba el 26% de la capacidad total de la batería. A partir de ese momento, el vehículo dejaba de funcionar en modo 100% eléctrico, arrancaba el motor de combustión y el sistema trabajaba en modo híbrido. Esto se observa también en la (Fig. 2), pues al llegar a un 26% del SOC, la batería empieza a recuperar, poco a poco, energía. Así pues, durante el funcionamiento en vehículo, las baterías nunca llegan al 0% SOC ni realizan descargas totales y la máxima DOD alcanzable es, para el caso de estudio, del 74%.

El análisis de los datos en vehículo se realizó partiendo de la relación entre la capacidad de descarga (Ah) y la DOD de 16 trayectos con descargas consideradas completas. En el cómputo global de una descarga, las pequeñas recargas que tiene la batería al frenar el coche se suman a la cantidad de energía total descargada por trayecto.

Así, para determinar la pérdida de capacidad debida al envejecimiento, se calculó primero la carga eléctrica de la batería (Cap) que se tiene a lo largo de un trayecto, realizando la sustracción de la energía recuperada en frenadas (Q_{ch}) al total de la energía descargada (Q_{dch}) (Ec.1). Una vez obtenida la capacidad neta descargada por trayecto, esta se normalizó en base a la capacidad nominal equivalente a una descarga total del 100%. Esto se realizó dividiendo la capacidad (Cap) por la DOD del trayecto obteniendo la capacidad real de la batería (Cap_{Norm}) como muestra la Ec.2.

$$Cap = Q_{dch} - Q_{ch} \tag{1}$$

$$Cap_{Norm} = \frac{Cap}{DOD} \tag{2}$$

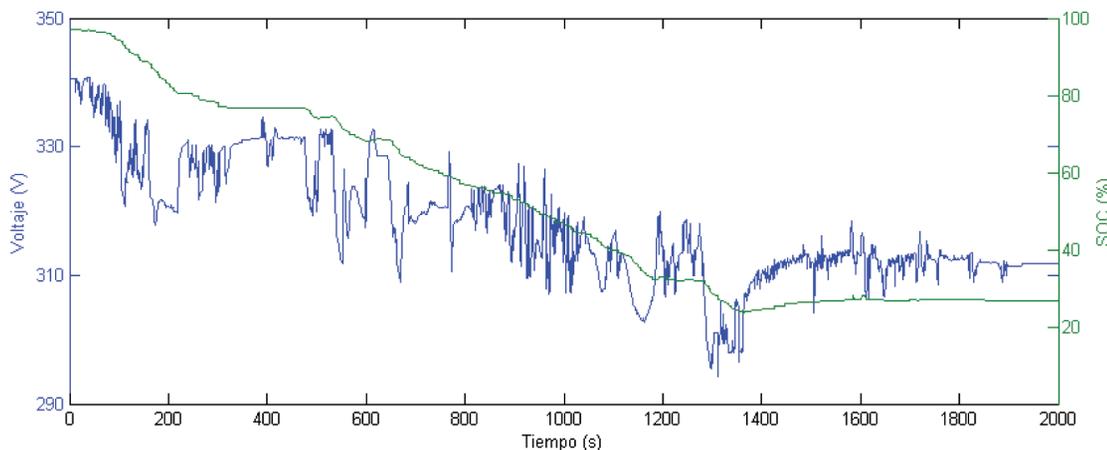


Fig. 2: Ejemplo de descarga de la batería del PHEV en uno de los trayectos de media hora de duración

Esta aproximación permitió ver cómo la capacidad de la batería se veía, efectivamente, reducida a lo largo del tiempo y uso. El SOH, que es una representación adimensional del estado de la batería frente a su estado inicial o fresca, puede ser evaluado en base a distintos factores y parámetros. En este estudio,

el cálculo del SOH se realiza como el cociente entre la capacidad de la batería en el instante actual (Cap_{Norm}) y la capacidad al inicio de la vida de la batería (Cap_{ini}) (Ec.3). Esta forma de calcular y evaluar el SOH es bastante común. De todos modos, como se describe más adelante, la medida de la R_i puede también ser utilizada a tal efecto.

$$SOH = \frac{Cap_{Norm}}{Cap_{ini}} \quad (3)$$

Para verificar estos datos obtenidos del vehículo, se procedió a analizar el funcionamiento de la misma batería en los ensayos de laboratorio. Estos ensayos consisten en pruebas de capacidad a 1C (que significa una descarga total de la batería de forma continua durante una hora), junto con los ensayos de pulsos, que son picos de corriente de 100 y 160 amperios durante 18 segundos al 50% SOC y que se utilizan para determinar el valor de la R_i . Todos estos ensayos se realizaron en una cámara climática a una temperatura controlada de 23°C de un modo similar al descrito por Schweiger, et al. [14] y cómo se realizan en la mayoría de estudios y laboratorios especializados en testado de baterías, [15], [16]. Al estar la batería fuera del vehículo y controlada por los medios del laboratorio, la descarga de la batería puede seguir por debajo del SOC 26% y alcanzar el límite real de capacidad de la batería.

Del ensayo de capacidad realizado, lo primero que se extrae es la pérdida de capacidad útil debido al desbalanceo, como veremos en los resultados.

Por otro lado, las pérdidas energéticas por calor (Q_{heat}) también influyen en el consumo final de energía. De hecho, el calor emitido por una batería no es sencillo de evaluar, al haber pérdidas reversibles e irreversibles. Aun así, el efecto Joule (Ec.4) es la que tiene mayor impacto a bajos C-rate [17]. Así, para calcular las pérdidas por calor es necesario conocer la resistencia interna de la batería, razón por la que se realizan ensayos de pulsos. La resistencia se mide mediante la ley de Ohm dividiendo la caída de voltaje ΔV por la intensidad que la atraviesa (Ec.5) durante el pulso de corriente. La R_i se calculó tanto con picos de descarga como con picos de carga a los 2, 10 y 18 segundos. La R_i de una batería se divide en 3 componentes: óhmicos, de transferencia de carga y de difusión [18]. Asimismo, la R_i de una batería cambia según la temperatura y el SOC [19], así que se debe ir con cuidado a la hora de utilizar la ecuación 4.

$$Q_{heat} = R_i \cdot I^2 \quad (4)$$

$$R_i = \frac{\Delta V}{I} \quad (5)$$

De hecho, la R_i aumenta a medida que la batería envejece. Con los ensayos de pulsos a mitad y final de vida del vehículo se podrá observar dicha evolución y valorar el aumento de las pérdidas por calor y las pérdidas de potencia debido al envejecimiento.

Al estar las celdas monitorizadas, se consiguen datos reales de todas y cada una de ellas, permitiendo ver su evolución, es decir, su R_i y capacidad. Esto nos permitirá determinar la existencia de alguna tendencia de degradación en algunos módulos y, en consecuencia, determinar si el sistema de refrigeración ha estado bien definido.

Una vez determinada la pérdida real de prestaciones del vehículo, y basándonos de nuevo en los datos obtenidos de los trayectos del VE, analizaremos las variaciones de percepción debidas al tipo de conducción y de los consumos auxiliares.

Por tanto, además de ver el efecto de la temperatura por trayecto, se analizará la cantidad y variabilidad de la recuperación de energía en frenadas, valorando qué incertidud añade a la hora apreciar el envejecimiento.

3. RESULTADOS

Una vez determinado como se realizarán las diferentes recogidas de datos, procedemos a la explicación de los resultados. El objetivo principal en el presente estudio es determinar hasta qué punto se transmiten las pérdidas de capacidad al conductor de un EV. Partiremos inicialmente con los datos obtenidos a bordo del coche.

La figura 3 nos muestra la relación entre los Amperios-hora descargados (Q_{dch}) respecto la DOD de los 16 trayectos analizados. Los trayectos están numerados del 1 al 16, siendo el nº1 el primer trayecto que se encontró con una descarga considerada completa del vehículo y el 16 el más reciente en condiciones similares, pero con la batería más envejecida. El envejecimiento de la batería se debe a los efectos acumulados a lo largo de todos los trayectos del vehículo, estos 16 trayectos sirven para visibilizar dicho envejecimiento. Se pueden observar dos tendencias (Fig. 3a): La primera muestra que a más DOD más energía aporta la batería. La segunda, visibiliza como los trayectos realizados al inicio del proyecto (en color más oscuro) tienen, en general, una mayor aportación de energía que aquellos realizados más recientemente (en colores más claros). Así pues, se puede intuir que efectivamente hay una

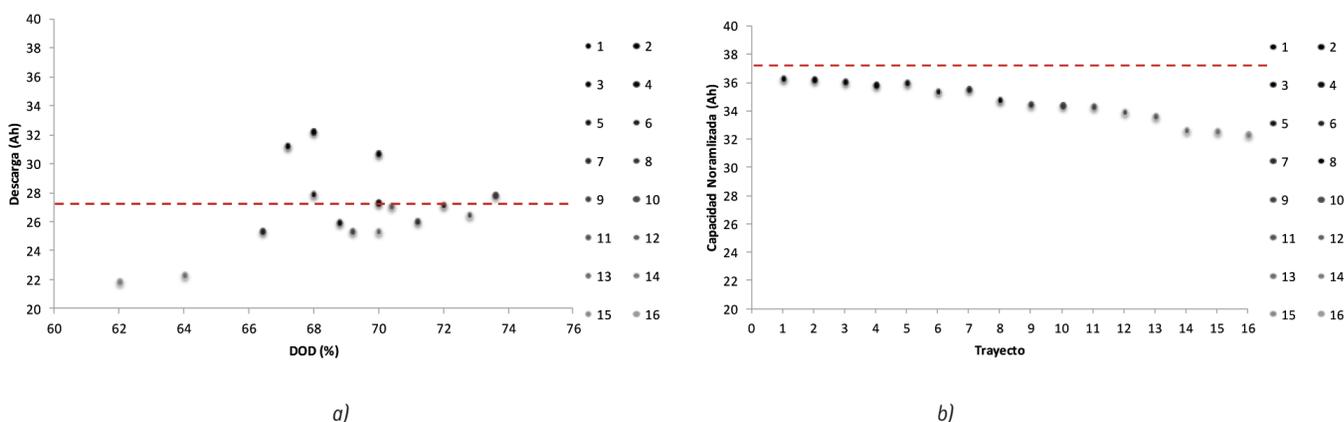


Fig. 3: a) Relación entre la corriente descargada por trayecto (Ah) respecto a la correspondiente DOD de cada trayecto con datos directos sin manipular. La línea discontinua representa la capacidad teórica de la batería sin contar con el efecto de la recuperación de energía. b) Capacidad normalizada (37Ah de base, línea de puntos roja) de las celdas en cada uno de los trayectos analizados

pérdida de capacidad. Al mismo tiempo, se puede apreciar también la fuerte variabilidad debida a la recuperación de energía en frenadas que corregiremos al normalizar.

Una vez calculado el valor de la capacidad normalizada según las Ecuaciones 1 y 2, se ratifica la tendencia decreciente de la capacidad útil de las celdas a medida que los vehículos van cir-

culando y la batería envejece, como podemos ver claramente en la Fig. 3 b.

Con lo visto hasta el momento se pone en evidencia que la batería transmite su pérdida al vehículo. Para entrar más en profundidad, pasaremos a analizar los resultados de los ensayos de la batería en laboratorio. La Fig. 4 muestra conjuntamente los re-

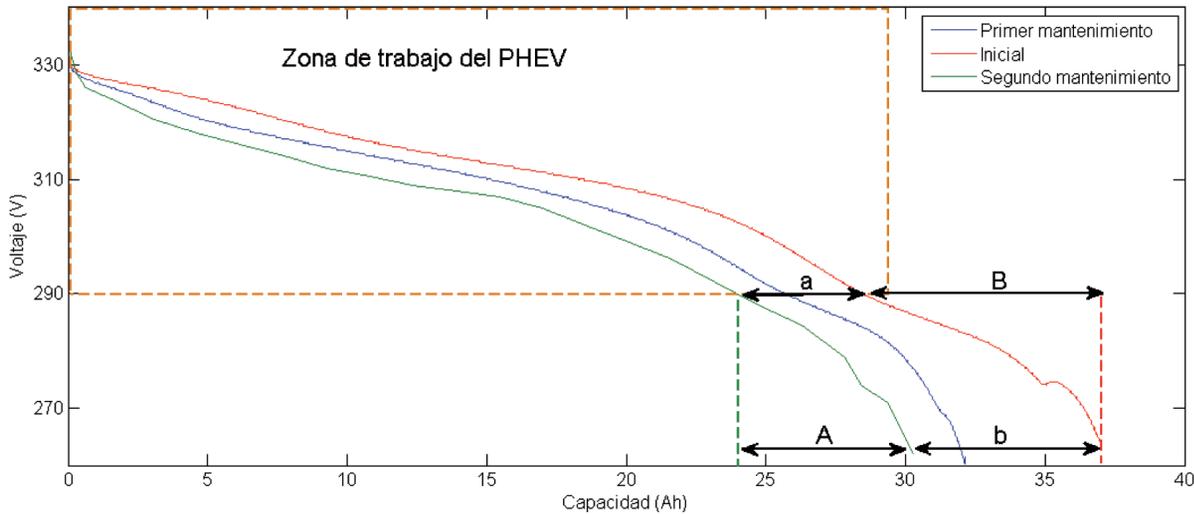


Fig. 4: Curva característica de descarga de la batería inicial, en el primero y en el segundo mantenimiento. La parte rallada muestra la zona de trabajo durante su uso en el PHEV, mientras que el resto de curva solo puede conseguirse en condiciones de laboratorio

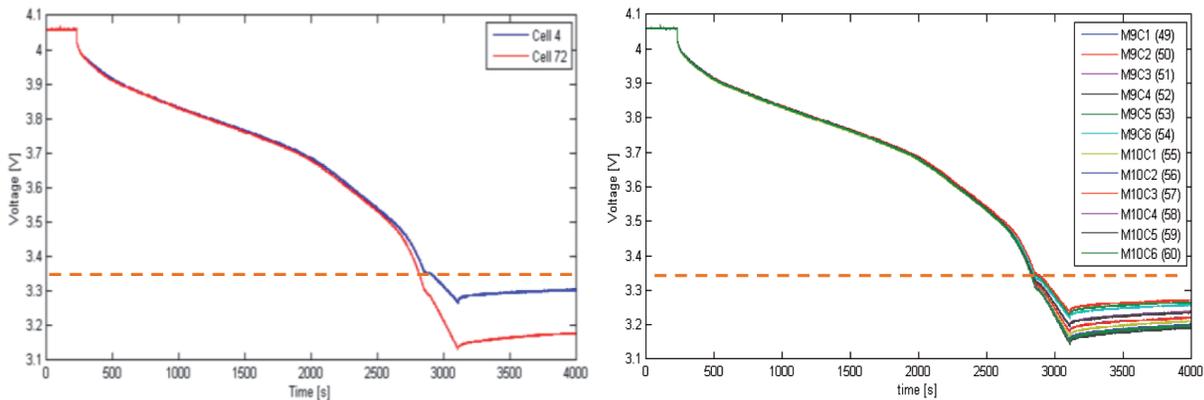


Fig. 5: Izquierda: Desbalanceo máximo de las celdas de la batería, correspondientes a la n° 4 (4ª celda del módulo 1) y la n° 72 (6ª celda del módulo 11). Derecha: Curva característica de tensión durante el segundo mantenimiento de todas las celdas de los módulos 9 y 10

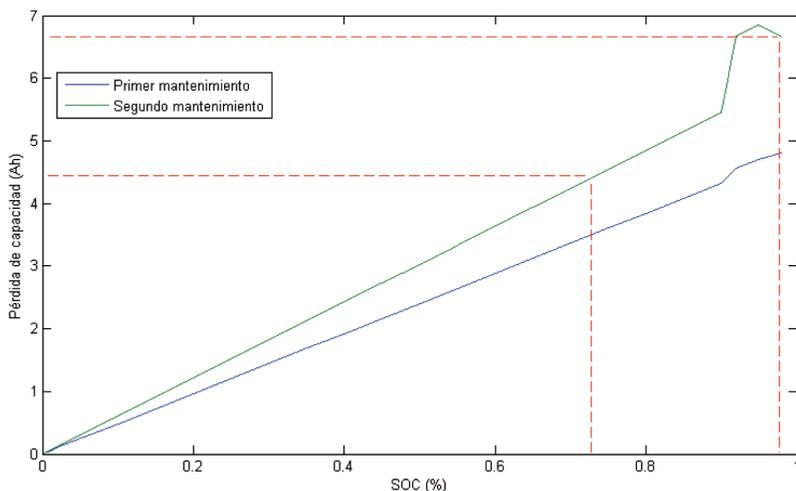


Fig. 6: Evolución de la pérdida de capacidad de la batería respecto a la capacidad obtenida en el ensayo inicial

sultados de las pruebas de mantenimiento al inicio del proyecto, con la batería nueva y los otros dos ensayos, cuando la batería había perdido cerca de un 10 y un 20% de la capacidad inicial. Se indica también, a modo de aclaración, la zona de trabajo del PHEV hasta el 26% del SOC, mostrando con las identificaciones A y B la capacidad no aprovechada por el vehículo al inicio de la vida de la batería y al final de su vida útil (2º mantenimiento).

Asimismo se constata que la capacidad perdida, en términos absolutos, es menor cuando la batería está al 26% SOC que cuando está totalmente descargada, identificadas como a y b, donde a es menor que b, y también menores que A y B respectivamente. La Fig. 4 permite, también, visibilizar la pérdida de energía útil para una misma capacidad, es decir, la pérdida de energía equivale al área que

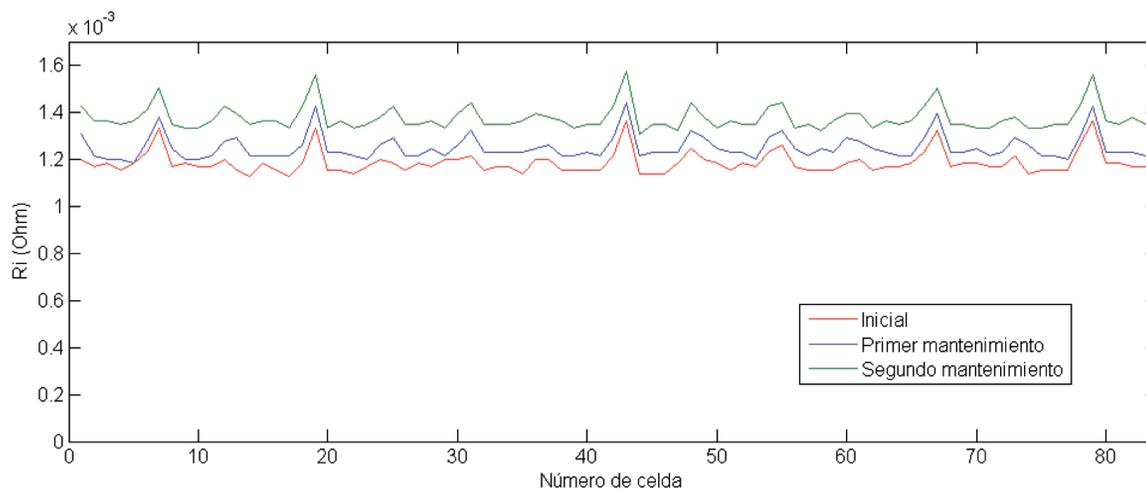


Fig. 7: Resistencia interna de cada celda en la prueba de impulsos a 100 A de descarga pasados 18 segundos

queda entre la curva final (verde) y la inicial (roja) para una misma capacidad. Esto se debe en parte a la menor eficiencia y al aumento de la R_i al envejecer la batería. Finalmente, al constatar unos valores de voltaje menores, también se puede intuir la reducción de potencia que se deriva.

Según la Ecuación 3, de la prueba de capacidad en laboratorio se obtiene que el SOH de la batería fue de 88 y 82,8% para el primer y el segundo mantenimiento.

A medida que la batería se descarga, la BMS va actualizando el SOC de la misma. Por este motivo pudimos saber que cuando la descarga se paró por culpa del desbalanceo, a la batería aún le quedaban el 2 y 2,8% de capacidad respectivamente (Fig. 5). La BMS interviene en el proceso de descarga y reduce el valor de corriente de descarga a medida que se acerca al límite de desbalanceo, razón por la que se percibe un cambio de comportamiento en voltajes cercanos a los 273 V para la batería completa o 3.35V para las celdas (Fig. 4 y 5). La diferencia máxima que generó el paro de la descarga se encontró entre las celdas 4 y 72 (Fig. 5 izquierda) aunque dentro de los módulos hay igualmente importantes variaciones de voltaje (Fig. 5 derecha).

La pendiente de la tensión de las celdas respecto al tiempo o descarga aumenta en la zona baja del SOC, el desbalanceo entre celdas es entonces más visible, dando lugar a una zona de trabajo más inestable.

Relacionando la pérdida de capacidad con el estado de carga de la batería se observa, en la Fig. 6, que esta pérdida es proporcional al estado de carga, es decir, que aumenta linealmente con la cantidad

de capacidad descargada sin haber ninguna irregularidad más que la que aparece por la intervención de la BMS al final de la descarga.

Así pues, las pérdidas en una descarga completa en laboratorio con una batería al 82% del SOH son cercanas a los 6,7Ah, pero lo que se transmite al conductor es solamente una pérdida de 4,4 Ah, ya que la descarga termina al 26% SOC en vehículo.

Se procede, una vez identificadas las pérdidas electroquímicas y por desbalanceo, al análisis de envejecimiento de las celdas partiendo de la evolución de la R_i a lo largo del tiempo. En la Fig. 7 se puede observar que todas las celdas tienen un aumento de cerca de 0,1 y 0,2 miliohmios entre el estado inicial y las dos medidas de mantenimiento realizadas en laboratorio, cuando se realiza la prueba de impulsos a 100A de descarga. Teniendo en cuenta que la R_i inicial de las celdas es de media de 0,0012 Ohmios, el aumento medio de la R_i entre el inicio y el final de vida de las celdas es de un 19%, lo que implica un aumento de las pérdidas por calor por envejecimiento del mismo porcentaje.

Aunque con ligeras diferencias, en la Fig. 6 se ve que, efectivamente, la R_i de todas las celdas aumenta homogéneamente, confirmando que este método también es útil para la visualización del estado de salud de la batería en pruebas de laboratorio. Tal y como hemos afirmado en la introducción, el único factor relacionado con el envejecimiento que podría ser distinto entre las celdas de la batería, era la temperatura. Estos datos demuestran que el sistema de refrigeración de las mismas, ha sido dimensionado correctamente, transfiriendo de manera ecuánime la temperatura a través de todas las celdas.

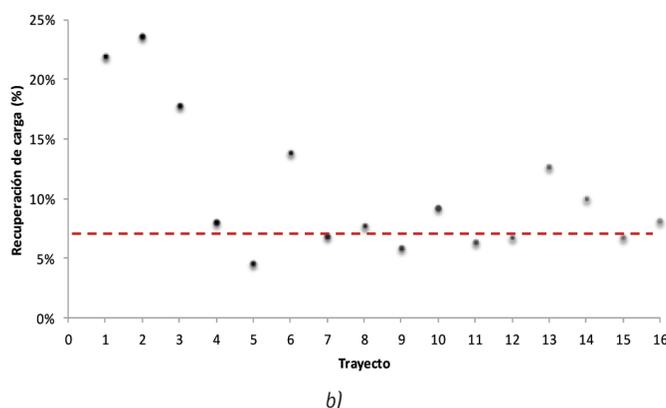
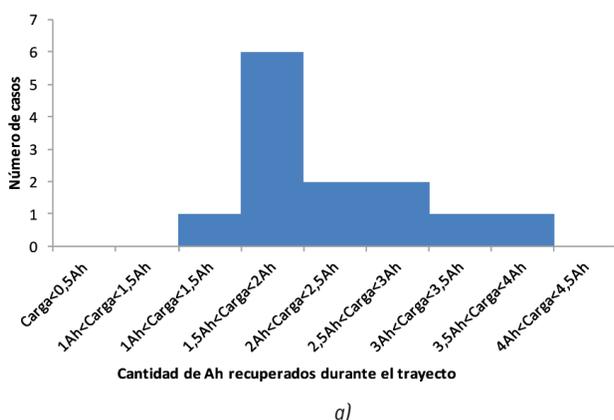


Fig. 8: a) Histograma por cantidad de Ah recuperados mediante las frenadas. b) Porcentaje de carga recuperada (eje ordenadas) en cada uno de los trayectos analizados (eje abscisas), siendo los trayectos de un gris más claro los más recientes, y la media (línea discontinua)

En todo caso, un aumento de las pérdidas por calor del 19% puede parecer alarmante y, para ratificarlo, se procedió al cálculo de las pérdidas por calor (Ec.4) en distintos casos de descarga.

Con la R_i de la batería completa (suma de la R_i de todas las celdas) se obtiene que por descargas a 1C (que es equivalente a 37 Amperios), la batería pierde, en forma de calor y durante una hora, 0,099 kWh, lo que representa algo menos del 1% del total de su energía. El incremento debido al aumento de la resistencia interna significa tan solo un 0,19% más.

$$Q_{heat} = R_i \cdot I^2 = 0,0728 \cdot 37^2 = 99,66 \text{ W} \quad (4)$$

En estas condiciones, el aumento de las pérdidas por calor no parece tan grave, pero al tratarse de una ecuación cuadrática, a medida que aumenta la corriente estas pérdidas aumentan exponencialmente. Así, con descargas a 4C (lo que equivale a 148 Amperios) estas pérdidas alcanzan valores de 0,39 kWh, lo que significa un 3,4% de la energía total de la batería y el efecto del aumento de la R_i con la batería vieja supone acabar en un 4,1% de pérdidas por calor.

Durante la conducción del PHEV llegaron a alcanzarse picos de corriente mayores a los 250 A. Al tener datos detallados de la intensidad en el vehículo en cada uno de los 16 trayectos, se procedió a calcular la pérdida de energía por calor durante la conducción para determinar en qué rango de pérdidas nos encontramos. Los resultados nos muestran que, de media, se pierde el 2,7% de energía en un trayecto, con máximos de 3,2% y mínimos del 1,9%. Estas variaciones son debidas mayormente al tipo de conducción (cuanto más agresiva sea, más potencia se le pide al vehículo y más pérdidas se derivan), y tipo de recorrido (urbano, desnivel, etc.). Con estos datos se puede apreciar que el efecto del aumento de la R_i en un 20% repercute en un incremento medio de las pérdidas en energía por calor de tan solo un 0,57%, lo que es casi imperceptible para el conductor.

No debemos olvidar que el aumento del R_i afecta de la misma manera a los valores de potencia que puede entregar la batería. Así, con los picos máximos de 250 A, esta pérdida equivale a un 5,5% con una batería fresca siendo el efecto del aumento de la R_i un incremento de un 1,1%.

A parte de la variabilidad debida a las pérdidas por calor, hay otro factor intrínseco en la conducción que perturba la correcta percepción de la pérdida de autonomía y prestaciones del vehículo. Este factor es la recuperación de energía mediante las frenadas.

Para apreciar los efectos de dicho factor, se ha estudiado la energía recuperada por trayecto observando que la mayoría de los ellos descargan entre 1 y 3Ah (Fig. 8 a). Eliminando los 3 primeros trayectos, donde la recuperación que tienen es mayor a 5Ah, debido principalmente a que buena parte de la carga proviene de haber accionado el motor de combustión durante los últimos kilómetros del trayecto (Fig. 2), se obtiene un promedio de carga recuperada en frenada de 2,06Ah, que equivale a un 8% (Fig. 8 b), mientras que la desviación estándar es de 0,78 Ah, lo que equivale al 3% del total de la energía de la batería. Asimismo, la desviación estándar de 0.78 Ah representa el 38% respecto al total de energía recuperada al frenar, lo que indica que la variabilidad en este sentido es notable.

De hecho, es interesante anotar que el trayecto 5 (Fig. 8 b), con una descarga total de 27,2 Ah y un estado de salud del 96,5% es el que tuvo menos recuperación de energía, lo que, en términos de percepción por el conductor, lo puso al mismo nivel de capacidad que el trayecto nº 13, que es uno de los que más energía recuperó y en el que la batería tenía un SOH del 90%. Se demuestra así que este 3% de desviación realmente perturba la capacidad de percepción de la pérdida de energía por parte del conductor de un VE, llegando a camuflar fácilmente hasta un 6% de SOH.

Sumando y restando los efectos que hacen variar la capacidad de la batería recogidos hasta el momento, se puede trazar una zona de incertidumbre alrededor del envejecimiento real de la batería. Este envejecimiento, en la Fig. 9, está representado por la línea más clara, y representa la capacidad percibida en un trayecto medio. Esta zona, franja azul en la Fig. 9 con unos límites del $\pm 5\%$ de la capacidad de la batería, indica que la percepción de la capacidad de la batería del coche puede variar en casi un 10% según el tipo y condiciones del trayecto. Así, cuando la batería ha perdido un 20% de su capacidad, la percepción del envejecimiento se definiría como la diferencia entre el caso menos favorable cuando la batería estaba fresca y el más favorable cuando la batería está envejecida. Es decir, el tramo marcado por las líneas discontinuas en la Fig. 9, que equivale a un 7.57%. Se puede apreciar que la zona de incertidumbre está centrada en la capacidad perdida transmitida, es decir, aquella que no considera los efectos del desbalanceo por quedar fuera de la zona de trabajo en el vehículo eléctrico.

De este modo, se observa que la batería transmite su pérdida energética pero esta es difícilmente apreciable por parte del conductor debido a las propias dinámicas de conducción.

4. DISCUSIÓN

Se ha podido observar que la pérdida de energía por procesos electroquímicos es proporcional a la descarga, así, esta pérdida de la energía en la batería (que representa el 96,5% del total) repercute directamente en la autonomía y prestaciones del vehículo.

Hemos visto que a SOC bajo aparece la zona de inestabilidad y propensión al desbalanceo. Pero como los fabricantes de automóviles definen unos límites de trabajo fuera de esta zona, se aseguran que el conductor no percibirá las pérdidas por restricciones que la BMS aplica, que en nuestro caso es de cerca de un 3%.

A lo largo de un trayecto, la descarga de la batería no es constante ni continua, así podemos afirmar que la percepción de la pérdida de capacidad de la batería por parte del conductor se ve severamente

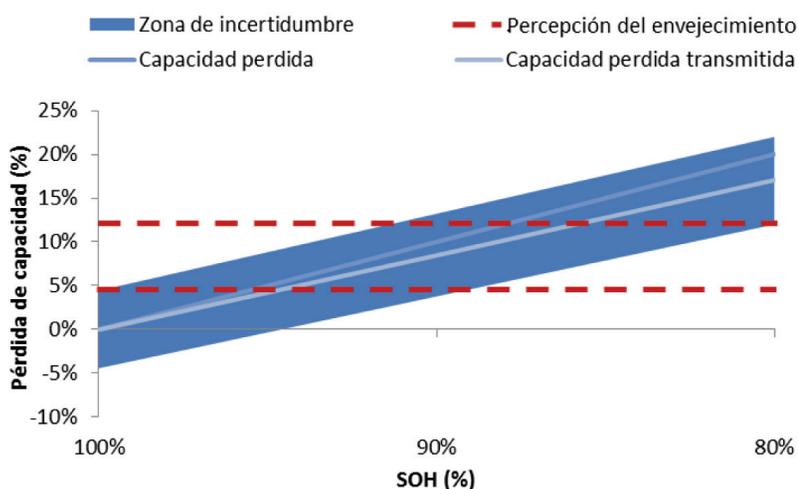


Fig. 9: Pérdida de capacidad real, pérdida transmitida y zona de incertidumbre. Las líneas punteadas indican la zona de percepción de degradación de la batería

reducida al no tener una base de comparación estable.

Una de las causas de la reducción de dicha percepción es la debida a las pérdidas por calor. Hemos podido constatar que, dependiendo del trayecto, la cantidad de energía útil de la batería variaba en un 2 %.

Otro factor de incertidumbre que influye a la hora de percibir la degradación de la batería que aparece durante la conducción es la recuperación de energía al frenar. Esta incertidumbre fue valorada en un 3%.

Así pues, partiendo del 20% de pérdida de capacidad real de la batería al final de la vida útil en vehículo, el conductor se daría cuenta de bastante menos. Al trabajar en la zona estable de voltaje el conductor ya solamente percibe un 17%, por eliminación de las pérdidas por desbalanceo. A este valor se le tienen que añadir los factores de incertidumbre debidos a las pérdidas por calor y la recuperación en frenada, que significan una perturbación de la misma de un $\pm 5\%$. De hecho, esta variabilidad de la percepción de las prestaciones del vehículo también ocurre al inicio de vida de la batería, pudiendo parecer que tiene más capacidad de la que tiene en realidad. Así, la percepción de la pérdida de capacidad al final de la vida en vehículo es cercana al 7,5%, es decir, tan solo el 38% de la pérdida real.

Finalmente se debe añadir que, al estar este estudio basado en la capacidad de almacenaje y en la energía suministrada por la batería y no en los kilómetros recorridos por el vehículo, hay otros factores como los consumos auxiliares que afectan más aún a la percepción real de las prestaciones del vehículo. Uno de los mejores ejemplos de consumos auxiliares es el sistema de climatización, que consume energía de forma variable según la época del año o la hora del día. Así, un EV nuevo comprado en invierno y utilizando la calefacción tendrá menos autonomía que otro a punto de llegar a su final de vida útil pero circulando en primavera con temperaturas agradables. De hecho, la circulación a temperaturas muy frías de -20°C reduce la autonomía de un EV a menos de la mitad, y esto nada tiene que ver con el envejecimiento de la batería.

Se puede resumir que, aunque la batería transmita directamente sus pérdidas al VE, hay muchos otros factores que perturban substancialmente la percepción del conductor. Definiendo un final de vida de las baterías al 80% de SOH, podemos asegurar que la capacidad de percepción por el usuario de la pérdida de prestaciones de la batería es casi inapreciable, ofreciendo cierta tranquilidad tanto al fabricante como al comprador del vehículo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ACEA, "Consolidated Registrations - By Country," 2014. [Online]. Available: <http://www.acea.be/statistics/tag/category/by-country-registrations>. [Accessed: 11-Dec-2014].
- [2] M. Gil-Agusti, L. Zubizarreta, V. Fuster, and A. Quijano, "Baterías: Estado actual y futuras tendencias (1ª parte)," DYNA Ing. e Ind., vol. 89, no. 6, pp. 584-589, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7298>
- [3] T. Waldmann, M. Wilka, M. Kasper, M. Fleischhammer, and M. Wohlfahrt-Mehrens, "Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries - A Post-Mortem study," J. Power Sources, vol. 262, pp. 129-135, Sep. 2014.
- [4] A. Eddahech, O. Briat, and J.-M. Vinassa, "Determination of lithium-ion battery state-of-health based on constant-voltage charge phase," J. Power Sources, vol. 258, pp. 218-227, Jul. 2014.
- [5] V. V. Viswanathan and M. Kintner-Meyer, "Second Use of Transportation Batteries: Maximizing the Value of Batteries for Transportation and Grid Services," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, vol. 60, no. 7, pp. 2963-2970.
- [6] A. Delaille, S. Grolleau, and F. Duclaud, "SIMCAL Project: calendar aging results obtained on a panel of 6 commercial Li-ion cells," in Electrochemical

Energy Summit de l'Electrochemical Society, 2013, vol. 101, no. 2.

- [7] M. Dubarry, V. Svoboda, R. Hwu, and B. Y. Liaw, "Capacity and power fading mechanism identification from a commercial cell evaluation," J. Power Sources, vol. 165, no. 2, pp. 566-572, Mar. 2007.
- [8] J. Vetter, P. Nov, M. R. R. Wagner, C. Veit, P. Novák, K.-C. Möller, J. O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler, and A. Hammouche, "Ageing mechanisms in lithium-ion batteries," J. Power Sources, vol. 147, no. 1-2, pp. 269-281, Sep. 2005.
- [9] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, F. Suard, and D. Riu, "A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications," J. Power Sources, vol. 241, pp. 680-689, 2013.
- [10] R. Teodorescu, D. U. Sauer, P. Rodriguez, M. Swierczynski, and P. Doc, Industrial / PhD Course Storage Systems based on Electrochemical Batteries for Grid Support Applications. Aalborg: Aalborg University, Denmark, 2013.
- [11] L. Canals Casals and B. Amante García, "A review of the complexities of applying second life electric car batteries on energy businesses," in Energy Systems Conference, 2014.
- [12] L. De Vroey, R. Jahn, M. El Baghdadi, and J. Van Mierlo, "Plug-to-wheel energy balance - Results of a two years experience behind the wheel of electric vehicles," in Electric Vehicle Symposium EVS 27, 2013, no. June 2011, pp. 1-5.
- [13] J. Laurikko and A. Haakana, "Realistic estimates of EV range based on extensive laboratory and field tests in Nordic climate conditions," in EVS27 Electric vehicle symposium, 2013, pp. 1-12.
- [14] H.-G. Schweiger, O. Obeidi, O. Komesker, A. Raschke, M. Schiemann, C. Zehner, M. Gehnen, M. Keller, and P. Birke, "Comparison of several methods for determining the internal resistance of lithium ion cells," Sensors (Basel), vol. 10, no. 6, pp. 5604-25, Jan. 2010.
- [15] L. Canals Casals, M. González Benítez, and B. Amante García, "A cost analysis of electric vehicle battery second life businesses," in XVIII International congress on project management and engineering, 2014, pp. 0946-0958.
- [16] Ś. Maciej, D. I. Stroe, S. Member, A. Stan, R. Teodorescu, and D. U. Sauer, "Selection and Performance-Degradation Modeling of LiMO / Li Ti O and LiFePO / C Battery Cells as Suitable Energy Storage Systems for Grid Integration With Wind Power Plants : An Example for the Primary Frequency Regulation Service," Trans. Sustain. ENERGY, vol. 5, no. 1, pp. 90-101, 2014.
- [17] A. Jossen, "Fundamentals of battery dynamics," J. Power Sources, vol. 154, no. 2, pp. 530-538, 2006.
- [18] P. V. Braun, J. Cho, J. H. Pikul, W. P. King, and H. Zhang, "High power rechargeable batteries," Curr. Opin. Solid State Mater. Sci., vol. 16, no. 4, pp. 186-198, 2012.
- [19] T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri, and R. Jackey, "High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells," in Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, 2012, pp. 1-8.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a la UPC y SEAT su apoyo y permitirnos investigar y divulgar los avances en electro-movilidad.