

Baterías en Vehículos Eléctricos Conectados a la Red

Ing. Federico Arismendi, Ing. Alejandro Gigena, Ing. Agustín Mosto, Ing. Juan Pedro Carriquiry,
Dr. Ing. Mario Vignolo.
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.
e-mail de contacto: farismendi@fing.edu.uy

Abstract—En la actualidad, el estudio y el desarrollo de nuevas tecnologías relacionadas con los vehículos eléctricos son fundamentales para disminuir la dependencia del petróleo en el transporte. El presente artículo pone el foco en el estudio de baterías de vehículos 100% eléctricos (BEV). Se estudia la forma en que los distintos usos del vehículo afectan a la batería y en particular se analiza la conveniencia del uso de sistemas Vehículo a la Red (V2G). Se implementa un desarrollo en Matlab-Simulink que posibilita la realización de simulaciones en distintos modelos de Vehículos Eléctricos (VE), el cual permite seleccionar diferentes ciclos de conducción, realizar descargas hacia la red (V2G) y recargas de la batería. Luego de realizadas las simulaciones, se evalúa el estado de salud (SOH) con un número de ciclos determinado se obtiene la vida útil de la batería en función de los ciclos de carga residuales. A partir del software desarrollado, se realizan asimismo estudios y análisis de distintos tipos de uso de las baterías, evaluando el impacto sobre las mismas.

Index Terms—Baterías, estado de carga, descarga a la red, estado de salud, litio-ion, vehículos eléctricos, modelado.

I. INTRODUCCIÓN

El impulso de los vehículos eléctricos a nivel mundial tiene varias razones, dentro de las más destacadas está la posibilidad de reducir costos operativos, pero también el hecho de no emitir CO_2 al menos durante la conducción.

Según la IEA [1], el transporte explica la emisión del 28% del CO_2 mundial. En Uruguay, según el BEN del 2018 [2], las emisiones del sector transporte se corresponden con el 58% del total. Uruguay marca una diferencia sustancial respecto al resto del mundo, según la IEA el 42% de las emisiones mundiales proviene del sector de la energía, mientras que en Uruguay dicho sector es el responsable del 5%. Esto implica que en aquellos países con un gran aporte de energías renovables (como es en el caso de Uruguay), el hecho de comenzar a sustituir el transporte tradicional a vehículos eléctricos tiene un impacto directo en la reducción de las emisiones de CO_2 .

Por lo tanto, existe una gran oportunidad de comenzar una transición hacia la movilidad eléctrica de forma realmente sustentable. Para avanzar a paso firme, es importante generar información científica que contraste ambas tecnologías y que permita destacar sus principales ventajas y desventajas. Actualmente, las ventajas operativas que tiene el vehículo a combustión interna frente al vehículo eléctrico son su mayor autonomía y su menor costo. Ambas características están vinculadas a las baterías de los VE, por lo que los estudios sobre las mismas cobran gran relevancia.

Este estudio, aborda una herramienta desarrollada dentro de un trabajo de tesis de grado [6], en el Instituto de

Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería-Universidad de la República, concretamente dentro del Grupo de Trabajo en Vehículos Eléctricos (GTVE). La herramienta fue creada con el objetivo de predecir el consumo de energía, el comportamiento del estado de carga o State Of Charge (SOC) y la degradación sufrida o State Of Health (SOH) de una batería de iones de Litio, en determinados modelos de vehículos eléctricos disponibles en el mercado y bajos ciertos ciclos de conducción. Para alcanzar dicho desarrollo se utilizó el software Matlab-Simulink que es capaz modelar y simular el andamiento de diferentes vehículos eléctricos en distintas situaciones de uso. En dicho programa, se presta especial atención al comportamiento de las baterías y en particular a la gestión de la descarga y su impacto en el SOH de las mismas luego de su uso [6].

II. GLOSARIO DE TÉRMINOS

VE - Vehículo Eléctrico

C_{rate} - Tasa de descarga/carga

DOD - Profundidad de descarga.

SOH - Estado de salud.

SOC - Estado de carga.

WLTP - Ciclo de conducción Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure.

V2G - Descarga de un vehículo eléctrico hacia la red.

LMO Óxido de Litio Manganeso

NMC Óxido de Litio Níquel Manganeso Cobalto

III. BATERÍAS, VEHÍCULOS Y CICLOS DE CONDUCCIÓN A ESTUDIAR

En la presente sección se realiza una breve reseña en cuanto a las baterías, vehículos y ciclos de conducción estudiados, destacando los principales aspectos de cada una de estas tecnologías.

A. Baterías

Existen distintos tipos de baterías que se han utilizado a lo largo de los años para aplicación en vehículos eléctricos. En la actualidad las baterías de iones de litio resultan ser un sistema de almacenamiento muy conveniente por su bajo peso por unidad de volumen, elevado voltaje de celda, buena conductividad eléctrica y alta eficiencia electroquímica,

en comparación con las baterías de NiMH, NiCd y Plomo-ácido, entre otras.

Las baterías de iones de litio pueden tener muchas variaciones en su composición química, pero todas tienen una cosa en común: los iones de litio que se "mecen" en el electrolito. Aunque parecen similares a primera vista, estas baterías varían en rendimiento y características dependiendo de la elección de los materiales activos (generalmente del cátodo, ya que el ánodo es usualmente de grafito), lo cual les da atributos únicos.

B. Vehículos utilizados

Los vehículos eléctricos implementados en el software, se encuentran disponibles en el mercado uruguayo.

Los mismos son:

- Renault Kangoo ZE Maxi (de 22 kWh y de 33 kWh)
- Renault Zoe R110
- BYD E5

En la tabla I se muestran los vehículos eléctricos implementados y sus principales características eléctricas y mecánicas tales como torque máximo, potencia y tensión, entre otras características.

Vehículo	Renault Kangoo 22 kWh	Renault Kangoo 33 kWh	Renault Zoe R110	BYD E5
Potencia (kW)	44	44	80	160
Torque (Nm)	226	225	225	310
Voltaje batería (V)	360	345.6	345.6	604.8
Energía batería(kWh)	22	33	41	60.5
Química batería	LMO	NMC	NMC	NMC
Peso en vacío (kg)	1553	1553	1575	1900

Tabla I

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS UTILIZADOS EN LAS SIMULACIONES.

C. Ciclos de conducción

Se le llama ciclo de conducción a una serie de datos ordenados de velocidad en función del tiempo que describen cierto recorrido. Existen multiplicidad de ciclos de conducción que buscan representar recorridos urbanos, rurales, de autopista, largos, cortos, con y sin tráfico, o que incluso agrupan varios de estos comportamientos. Los ciclos de conducción surgieron con el fin de medir las emisiones y el consumo de vehículos a combustión interna, derivando luego en una herramienta que permite medir autonomía, eficiencia y consumo energético de los vehículos eléctricos. El ciclo internacional tomado como referencia en este estudio es el WLTP [5], el cual fue diseñado por la UNECE (United Nations Economic Commission for Europe)

Para este estudio se diseñó el **Ciclo Montevideo**, el cual fue creado a partir de un relevamiento real en un VE, con el objetivo de abarcar varios sectores de la ciudad que son recorridos habitualmente por miles de usuarios. El mismo tiene una duración de más de 5500 segundos y recorre una distancia total de 42.3 km. En la figura 1 puede observarse su representación gráfica (velocidad en función del tiempo).

Este ciclo será utilizado en las simulaciones posteriormente descritas para evaluar y comparar diversos casos de estudio.

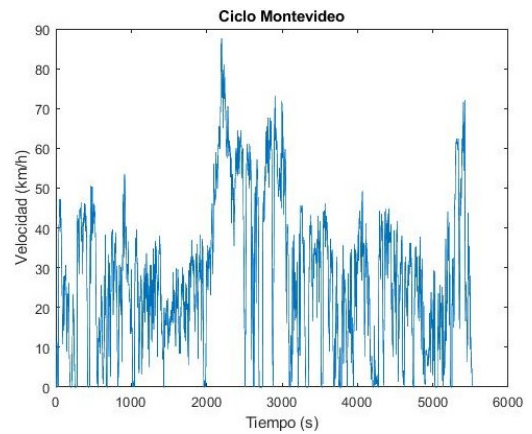


Fig. 1. Ciclo Montevideo

IV. MODELADO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

Utilizando las herramientas disponibles en Matlab-Simulink se realizó un modelado del vehículo eléctrico, el cual se organiza en siete bloques que interactúan entre sí (ver figura 2).

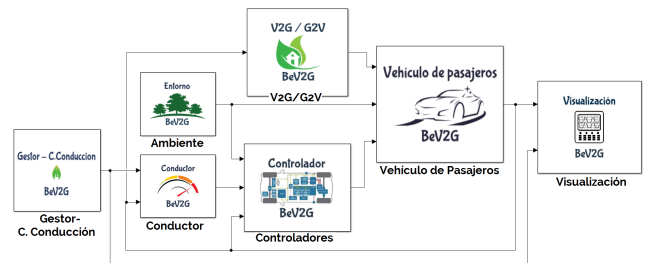


Fig. 2. Modelado - Esquema General

Entre los puntos de mayor relevancia, se implementa el modelado de las ecuaciones que describen el movimiento del VE, así como también su interacción con los requerimientos al motor y las baterías. Se determina el par que debe entregarse en el motor para impulsar al VE ante las diversas exigencias del terreno y del conductor (aceleraciones o desaceleraciones en función del ciclo de conducción utilizado).

Otro de los bloques importantes es el que modela la interacción de V2G/G2V, en el que se realiza el cálculo de la corriente que se intercambia entre el VE y la red, la cual podrá ser una corriente de carga o de descarga.

V. MODELADO DEL ESTADO DE SALUD (SOH)

A. Algoritmo utilizado

El algoritmo a implementar está basado en una publicación desarrollada por la Universidad de Chalmers, Gotemburgo, Suecia (ver [4]). En dicho artículo, luego de realizar diversos ensayos y estudios, se propone una función que ajusta la capacidad remanente en la batería luego de realizar cierto número de ciclos de descarga para las baterías de química NMC.

El modelo utiliza como variables de entrada: el SOC inicial, SOC final, C_{rates} , la temperatura de la batería, la profundidad de descarga DOD y la cantidad de ciclos completos equivalentes (FCE, full cycle equivalent), los cuales equivalen a una descarga y una posterior carga

completa (del 100% al 0% y del 0% al 100%).

La función que ajusta la capacidad máxima (Ah) remanente en la batería se muestra en la ecuación 1:

$$Cap(SOC, C_{rate}, T, FCE) = a \cdot e^{b \cdot FCE} + c \cdot e^{d \cdot FCE} \quad (1)$$

Se realizaron varios ensayos a distintos C_{rates} y temperaturas con el fin de ajustar los parámetros a , b , c y d de forma de representar con el modelo los resultados experimentales.

Se destaca que a depende del SOC, b depende del SOC y del C_{rates} , c depende del parámetro a y por último d depende de la temperatura, el C_{rates} y el intervalo del SOC en el que se encuentre la descarga. La ecuación fue ajustada mediante los datos experimentales relevados al realizar las cargas (a $\frac{C}{8}$) y las descargas (a 1C, 2C, 4C) y diferentes niveles de SOC (tramos de a 10%), para las temperaturas de 25°C y 35°C.

Las expresiones completas de estos parámetros pueden encontrarse en los artículos de referencia [4] y [6].

Para hallar el SOH, se utiliza el concepto de “capacidad perdida”, la cual consta de la resta entre la capacidad máxima inicial (también conocida como capacidad nominal) menos la remanente determinada por la ecuación 1.

Luego de esto se puede calcular el SOH de la batería como:

$$SOH = SOH_{inicial} - \frac{Capacidad_{perdida}}{Capacidad_{nominal}} \quad (2)$$

Para determinar la cantidad de ciclos n de vida útil, se consideró un valor de SOH del 80%, esto se debe a que varios fabricantes recomiendan la sustitución de la batería cuando se alcanza dicho valor. Luego, el FCE puede obtenerse de la ecuación 1. Una vez hallado el valor de FCE, es posible obtener la cantidad de ciclos reales n de la siguiente forma:

$$n = \frac{FCE \cdot 100}{DOD} \quad (3)$$

La ecuación anterior, permite hallar cuántos “ciclos de vida n ” se pueden hacer antes que el SOH de la batería llegue al 80%. A modo de ejemplo, permite estimar cuántos ciclos puede realizar la batería desde un 50% del SOC hasta un 20%. A modo de aclaración, los “ciclos n ” no son un ciclo completo de descarga/carga sino que consta de un ciclado personalizado (por ejemplo el anterior nombrado desde un 50% a un 20%).

Capacidad utilizable - Generalmente los VE no utilizan el 100% de la energía en sus baterías (capacidad máxima real), sino que por motivos relacionados con la degradación de las baterías, suelen utilizar una energía menor (capacidad máxima utilizable). Dado que el algoritmo utilizado trabaja con datos de energía real y que los datos de energía en VE dados por fabricantes corresponden a la energía utilizable, es que se debe modificar estos valores cuando se utiliza el algoritmo. Esta modificación se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$Capacidad_{max_real} = \frac{Capacidad_{max_utilizable}}{0.9} \quad (4)$$

SOC utilizable vs real - El algoritmo del SOH utiliza los datos de capacidad real y de energía real de la batería, por lo tanto utiliza un porcentaje determinado del SOC real. Los datos de SOC que se obtienen del VE durante los recorridos corresponden al SOC utilizable, por lo tanto será necesario escalarlo del 0% al 100% real para poder trabajar correctamente con el algoritmo.

C_{rate} - Los ensayos fueron realizados para un C_{rate} fijo, por lo que no era necesario distinguir entre tramos. En la realidad, al simular un VE se tendrán tramos de corrientes muy diversas (debido a las exigencias del recorrido), por lo tanto para el C_{rate} se toma el promedio de la corriente entregada por la batería para cada intervalo de 10% del SOC, dividida por la capacidad nominal de la misma.

Otra consideración relevante es que en el artículo citado se utilizó una batería NMC con una capacidad nominal de 26 Ah. Para utilizar el modelo con otras baterías NMC de diferente capacidad, se deberá normalizar el ritmo de descarga dividiendo la corriente que efectivamente entrega la batería por la capacidad nominal de la misma, para trabajar con el C_{rate} correspondiente.

VI. INTERFAZ GRÁFICA

Se generó una interfaz gráfica utilizando la GUI (Graphical User Interfaces) de Matlab-Simulink con el fin de crear una herramienta para realizar simulaciones y acceder a datos obtenidos en el modelo de forma práctica y sencilla. A través de la misma es posible simular todas las posibilidades que brinda el modelado.

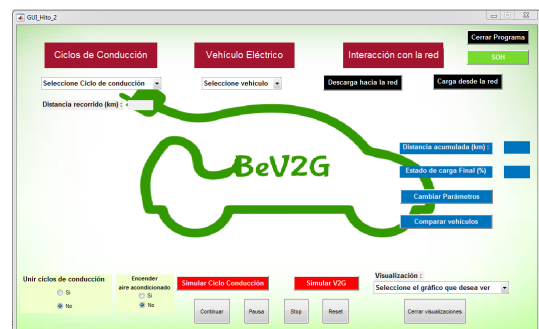


Fig. 3. Interfaz gráfica - Vista principal

La interfaz permite simular el comportamiento en distintos VE al realizar variados ciclos de conducción. Tanto los vehículos como los ciclos de conducción a simular son seleccionables desde una lista desplegable. Además, el programa permite interactuar con la red tanto para cargar el vehículo como para descargar el vehículo hacia la red (V2G).

Luego de simulados todos los ciclos que se desean evaluar sobre un determinado VE, la interfaz permite hallar el SOH de su batería (aplicando el algoritmo anteriormente detallado), en el caso que el ciclo seleccionado sea realizado x

cantidad de veces. También la interfaz permite hallar cuantos ciclos (n) podremos realizar con características predefinidas hasta que el SOH de las baterías llegue a un 80%.

El programa permite la modificación de varios parámetros con el fin de generar versatilidad en las simulaciones. Se permite modificar características (eléctricas y mecánicas) del VE a simular, características del ambiente (por ej. temperatura) y características de la carga/descarga a la red (por ej. potencia de descarga).

VII. PRUEBA EN VE REAL

De forma de poder validar el modelado se realizó una prueba en un VE real, propiedad de UTE (empresa pública de servicios eléctricos, dedicada a la generación, transporte, distribución y comercialización de energía eléctrica en Uruguay), aprovechándose la instancia para relevar un nuevo ciclo de conducción real (Ciclo Montevideo), obteniéndose también las pendientes del recorrido. El vehículo utilizado fue un Renault Kangoo ZE Maxi de 22 kWh de batería.

Para las pruebas, se realizaron 5 recorridos que cubren diversos caminos habituales en la ciudad de Montevideo. Los recorridos incluyen pendientes pronunciadas, recorridos urbanos y recorridos de carretera o rambla, en donde se alcanzan las mayores velocidades. Con estos recorridos se genera el ciclo de conducción llamado Ciclo Montevideo.

Durante los recorridos con el VE real se registraron las exigencias máximas del motor y baterías, y luego de finalizados los recorridos se utilizaron los datos de energía consumida y estado de carga final para ajustar el modelado realizado en Matlab-Simulink.

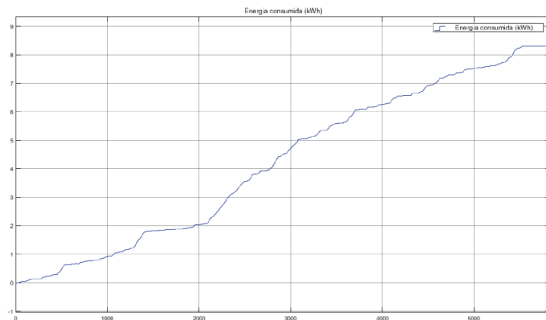


Fig. 4. Simulación de energía consumida en función del tiempo para el VE utilizado en la prueba real

Luego de haber realizado el ajuste correspondiente, el valor final de la energía consumida en la simulación es de 8.24 kWh. En el recorrido real se registró un consumo de 8.34 kWh, lo que implica un -1.2% de error entre el modelo y los datos recabados en la experiencia, lo cual se considera aceptable.

VIII. ESTUDIOS REALIZADOS

A. SOH en función del kilometraje diario recorrido

En pos de estimar cuanto se deterioran las baterías de los vehículos eléctricos analizados con el uso, se simula

un recorrido diario en función de ciclos WLTP [5] y se estima el SOH de las baterías en función del tiempo de uso transcurrido.

En la tabla II se despliegan los datos simulados para los vehículos de Renault, Kangoo de 33 kWh y Zoe R110, y para el modelo E5 de BYD. Se simulan 2, 4 y 6 ciclos WLTP diarios, que equivalen a 46.5 km, 93.0 km y 139.6 km respectivamente. Con estos recorridos diarios se estima el SOH a los 5, 7 y 9 años, respectivamente.

Vehículo	Nº de WLTP diarios	Distancia recorrida (km)	SOC final (%)	SOH a los 5 años (%)	SOH a los 7 años (%)	SOH a los 9 años (%)
Renault Kangoo 33 kWh	2	46.5	81.8	97.4	96.4	95.4
	4	93.0	63.5	91.9	88.8	85.8
	6	139.6	44.2	85.9	80.6	75.5
Renault Zoe R110	2	46.5	85.1	97.9	97.0	96.2
	4	93.0	70.2	94.5	92.4	90.0
	6	139.6	55.3	89.2	85.1	81.1
BYD E5	2	46.5	84.6	97.9	97.0	96.1
	4	93.0	69.0	94.3	92.1	90.0
	6	139.6	53.4	88.8	84.6	80.5

Tabla II

SOH DE LAS BATERÍAS LUEGO DE RECORRER 2, 4 Y 6 CICLOS WLTP DIARIOS DURANTE 5, 7 Y 9 AÑOS.

En la tabla II se observa que el deterioro de la baterías varía vehículo a vehículo, obteniendo para las mismas distancias diarias un deterioro más profundo cuando el DOD es mayor. El valor del DOD para cada simulación queda determinado por el SOC final, ya que el SOC inicial para todas las simulaciones mostradas es del 100%.

La tabla II, que usa el algoritmo para la determinación del SOH, a DOD poco profundos estima una larga vida útil, tal vez más larga de lo que se supondría en primera instancia. A DOD más profundos se observa una disminución coherente en el SOH. En la actualidad no se cuenta con las herramientas para validar o refutar el modelo de forma experimental. El grupo de trabajo considera que a DOD profundos, el algoritmo es más confiable, o al menos, arroja resultados asimilables a los esperados. A DOD menores al 30% el deterioro estimado parece ser reducido.

B. Impacto del V2G sobre la batería

Al realizar un recorrido diario, dependiendo del kilometraje realizado, puede disponerse (o no) de cierta cantidad de energía remanente en la batería del vehículo eléctrico. Una gestión inteligente de la energía remanente aplicada al uso doméstico, o a la inyección de energía hacia la red (V2G - Vehicle to Grid), podría plantear una ventaja económica para el usuario.

Las empresas suministradoras de energía suelen disponer de tarifas en las que difiere el costo según el horario de consumo. Para éstas, una gestión inteligente implicaría cargar el vehículo en el período más barato para luego realizar los recorridos necesarios del día a día y, al estacionar el vehículo, volcar el excedente de energía remanente en la batería hacia el consumo en el período caro de la energía, que suele coincidir con el horario típico en que las personas retornan a sus hogares.

Se construye la tabla III, en la cual se simulan dos y cuatro ciclos WLTP diarios, seguidos de una descarga hacia la red (V2G) hasta alcanzar un 10% del estado de carga de las

baterías. La consigna de descarga en este escenario fue de 3,7 kW.

Vehículo	Distancia recorrida (km)	SOC final recorrido (%)	Energía V2G (kWh)	SOH a los 5 años (%)	SOH a los 7 años (%)	SOH a los 9 años (%)
Renault Kangoo 33 kWh	46.5	81.8	23.7	76.5	68.0	59.8
	93.0	63.5	17.7	76.6	68.2	60.2
Renault Zoe R110	46.5	85.1	30.8	76.3	67.8	59.7
	93.0	70.2	24.7	76.5	68.0	60.0
BYD E5	46.5	84.6	45.1	76.3	67.7	59.5
	93.0	69.0	35.7	76.5	68.0	60.0

Tabla III

SOH DE LAS BATERÍAS AL REALIZAR UN RECORRIDO DIARIO Y V2G

En la tabla III se observa que para los tres vehículos incluidos en el cuadro se tiene un deterioro muy similar para el mismo tiempo transcurrido, con diferencias menores al 1% del SOH para las distancias simuladas. Los resultados son similares porque por las siguientes razones:

- El algoritmo considera que las baterías son todas de la misma química (NMC).
- Los casos simulados tienen la misma profundidad de descarga (DOD), de un 90%. Este es el parámetro que influye más en el deterioro según el algoritmo. Nótese que a pesar de tener el mismo DOD, la cantidad de energía que entrega cada vehículo es diferente.
- Los ritmos de descarga (Crate) son similares para los vehículos simulados.

Comparando los porcentajes del SOH a los 5, 7 y 9 años reflejados en los cuadros II (sin V2G) y III (con V2G), se puede observar cómo impacta la descarga de energía en la salud de las baterías. Se hace claro que el deterioro provocado por el V2G es considerable, y que acortará la vida útil de la batería. La diferencia en el deterioro será mayor cuanto menor sea la distancia diaria recorrida. En la tabla IV se observa el deterioro adicional que alcanza la batería al recorrer las distancias diarias y realizar V2G hasta un 10% del SOC.

Vehículo	Distancia recorrida (km)	SOC final recorrido (%)	Energía V2G (kWh)	$\Delta(SOH)$ 5 años (%)	$\Delta(SOH)$ 7 años (%)	$\Delta(SOH)$ 9 años (%)
Renault Kangoo 33 kWh	46.5	81.8	23.7	-21.5	-29.5	-34.9
	93.0	63.5	17.7	-16.6	-23.2	-29.8
Renault Zoe R110	46.5	85.1	30.8	-22.1	-30.1	-37.9
	93.0	70.2	24.7	-19.0	-26.1	-33.3
BYD E5	46.5	84.6	45.1	-22.1	-30.2	-33.9
	93.0	69.0	35.7	-18.9	-26.2	-33.3

Tabla IV

COMPARACIÓN EN EL DETERIORO DE LAS BATERÍAS CONSIDERANDO EL USO SIN V2G Y CON V2G

En la tabla IV, el $\Delta(SOH)$ es la diferencia relativa entre no inyectar energía a la red y hacerlo. Se observa que para un mismo vehículo, al aumentar la distancia del recorrido diario la diferencia disminuye. También disminuye la energía que se tiene disponible para entregar a la red. Esto es coherente, dado que al incrementar la distancia del recorrido diario se acorta la distancia entre los DOD logrados.

En la columna de “Energía V2G (kWh)” de la tabla IV se observa que la cantidad de energía disponible para entregar a la red es elevada. Un algoritmo de optimización deberá entonces determinar la cantidad de energía óptima para entregar a la red (a un C_{rate} también optimizado), que nivele el sacrificio de capacidad en la batería con el beneficio económico que pueda llegar a obtenerse de la entrega de energía a la red. Parece entonces razonable plantearse el

beneficio que puede obtenerse de entregar energía a la red, dado que ha quedado en evidencia el impacto negativo que tiene realizar este tipo de uso de forma no optimizada.

C. Simulación de un banco de baterías estático

Asumiendo que las baterías de los vehículos eléctricos pasan a un mercado secundario cuando su SOH alcanza el 80%, se simula el uso de estas baterías que han sido descartadas para la movilidad eléctrica, como bancos de baterías para aplicaciones estacionarias.

Para la simulación se plantea una descarga a consigna de potencia constante, contemplando dos escalones. El primero, con una duración de dos horas y una potencia de 3.7 kW. El segundo, de una hora, con una potencia de 7.4 kW. En el cuadro V se presentan los datos simulados para las baterías que originariamente eran de los vehículos eléctricos mencionados. En la columna “Energía disponible (kWh)” se encuentra la energía que es capaz de almacenar la batería cargada a pleno. En la columna “SOC final (%)” se presenta el estado de carga final de la batería, luego de haber entregado los escalones de potencia. En “Energía diaria entregada (kWh)” se muestra la energía inyectada en los dos escalones. Las columnas de SOH a los 5, 7 y 9 años muestran el deterioro que tendrá la batería de uso secundario, planteando como origen, el momento en que se instala con el fin de batería estacionaria. Por lo tanto, un SOH de 100% se corresponde con un SOH de 80% de la capacidad de almacenamiento de la batería original.

Vehículo	Energía disponible (kWh)	SOC final (%)	Energía diaria entregada (kWh)	SOH 5 años (%)	SOH 7 años (%)	SOH 9 años (%)
Renault Kangoo 33 kWh	26.4	43.9	14.8	85.7	80.4	75.2
Renault Zoe R110	32.8	54.9	14.8	89.0	84.8	80.8
BYD E5	48.4	69.4	14.8	94.2	92.0	89.9

Tabla V

USO SECUNDARIO DE LAS BATERÍAS DE LOS VEHÍCULOS

Para el caso de los vehículos E5 y Zoe, se observa (cuadro V) que la exigencia en consumo de energía es baja, ya que la batería se mantienen por encima del SOC=50%. Se les podrá exigir a estas baterías secundarias mayor aporte de energía, dado que su capacidad de almacenamiento es alta. El mercado seguramente determine que la batería del Kangoo Ze Maxi de 33 kWh, a un 80% de su capacidad máxima sea más económica que las del Zoe o el E5. El cuadro V muestra que la batería del Kangoo es apta para prestar el servicio, ya que a los nueve años seguirá siendo capaz de entregar los 14.8 kWh que se le solicitan (al SOH=75.2% será capaz de entregar 19.1 kWh).

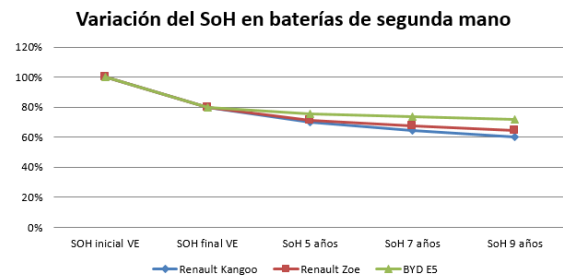


Fig. 5. Evolución del SOH de las baterías

En la figura 5 se muestra la evolución del SOH de las baterías durante su vida útil. El momento en que se empieza a contar el tiempo es cuando la misma pasa de ser la fuente de alimentación del vehículo eléctrico a banco de acumulación estacionario. Por lo tanto, las referencias de 5, 7 y 9 años son contados a partir del 80% de SOH mostrado en la figura. El tiempo en que la batería alcance este 80% dependerá del uso que se le de al vehículo.

IX. CONCLUSIONES

Se detallan a continuación las principales conclusiones obtenidas. Las mismas son presentadas de forma diferenciada para cada uno de los temas tratados.

Modelado e Interfaz -

Prueba real en VE y ciclos de conducción - Se validó el software implementado mediante una prueba en un VE real. Dicha prueba constó en la realización de un recorrido en una Renault Kangoo ZE de 22 kWh de baterías, relevamiento del ciclo de conducción, SOC inicial, SOC final, energía consumida en el trayecto y pendiente del recorrido. Simulando este recorrido en el SW, se obtuvieron resultados satisfactorios con un error menor al 1.4% para la energía consumida y el SOC final.

Se elaboró un ciclo de conducción urbano de la ciudad de Montevideo que incluye pendientes. El mismo fue de gran utilidad y podrá ser utilizado para trabajos futuros.

Es importante considerar las pendientes al relevar un ciclo real. Para el Ciclo Montevideo, la autonomía disminuye al menos un 22.7% para los vehículos estudiados.

Vida secundaria de las baterías - Las baterías estudiadas muestran que la variación de su SOH bajo una aplicación estacionaria es sensiblemente menor, lo que implica que es razonable pensar en aprovechar su capacidad residual luego de haber sido recambiadas. En este sentido los datos de simulación muestran que en el peor de los casos (Renault Kangoo) la degradación es del 20% a los 9 años lo que implica una vida útil adicional utilizable en diversas aplicaciones que impliquen ciclos más lentos y de menor DOD.

Análisis de vida útil de las baterías - Para un mismo recorrido, la vida útil de la batería disminuye más rápidamente cuando la capacidad de almacenamiento de la batería es menor, dado que se alcanzan mayores profundidades de descarga.

Al realizar V2G, la vida útil de la batería se reduce considerablemente si no se implementan algoritmos de optimización adecuados que mitiguen o neutralicen el impacto.

De acuerdo al modelo implementado, puede concluirse que el DOD tiene mayor incidencia que el C-rate en la afectación del SOH de la batería de un vehículo eléctrico. En este sentido podría considerarse como una buena práctica para la utilización de las baterías, el no realizar descargas con un DOD mayor al 80%, esto evitaría degradaciones precipitadas.

REFERENCES

[1] IEA International Energy Agency. Estadísticas emisiones CO₂., <https://www.iea.org/statistics/co2emissions/>
[2] BEN Balance Energético Nacional, <https://ben.miem.gub.uy/>

[3] Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Acuerdo de París. <https://www.mvotma.gub.uy/internacional/item/10010212-acuerdo-de-paris>.
[4] Torbjorn Thiringer Evelina Wikner. *Extending battery lifetime by avoiding high SOC. Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV), special issue of Applied Sciences, 2018. ISSN 2076-3417*
[5] Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP) <https://es.wikipedia.org/wiki/WLTP>
[6] Alejandro Gigena, Agustín Mosto, Jonathan Acosta. Baterías en Vehículos Eléctricos Conectados a la Red. Tesis de grado. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería. 2019. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/22331>
[7] D.Linden y Thomas B. Reddy. Handbook of batteries, 3rd ed., McGrawHill. 2002