



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN LOS ESTADOS DE
CARGA Y DESCARGA DE BATERÍAS ELÉCTRICAS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniera Eléctrica

AUTOR: DAYANA LIZBETH PERALTA PÉREZ
TUTOR: JOSÉ MANUEL ALLER CASTRO

Cuenca - Ecuador

2023

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Dayana Lizbeth Peralta Pérez con documento de identificación N° 0302619838, manifiesto que:

Soy la autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 06 de diciembre del 2023

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Dayana Lizbeth Peralta Pérez', enclosed within a large, hand-drawn circular scribble.

Dayana Lizbeth Peralta Pérez
0302619838

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Dayana Lizbeth Peralta Pérez con documento de identificación N° 0302619838, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del Artículo académico: “Comparación del comportamiento en los estados de carga y descarga de baterías eléctricas”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Eléctrica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 06 de diciembre del 2023

Atentamente,



Dayana Lizbeth Peralta Pérez
0302619838

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Manuel Aller Castro con documento de identificación N° 0151561800, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: Comparación del comportamiento en los estados de carga y descarga de Baterías Eléctricas, realizado por Dayana Lizbeth Peralta Pérez con documento de identificación N° 0302619838, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 06 de diciembre del 2023

Atentamente,



Ing. José Manuel Aller Castro
0151561800

Comparación del Comportamiento en los Estados de Carga y Descarga de Baterías Eléctricas

Dayana L. Peralta
Universidad Politécnica Salesiana
Cuenca, Ecuador
dperaltap@est.ups.edu.ec

José M. Aller
Universidad Politécnica Salesiana
Cuenca, Ecuador
jaller@ups.edu.ec

Resumen—Este trabajo se enfoca en analizar y comparar el comportamiento de baterías eléctricas de ion-litio durante los procesos de carga y descarga, teniendo en cuenta los efectos de degradación que son impuestos por la repetición de estos ciclos. Se examinan diversos modelos de baterías de ion-litio presentes en la literatura científica y se selecciona el modelo que relaciona directamente la formulación química con el circuito eléctrico equivalente, conjuntamente con la operación de carga y descarga, así como el proceso de degradación del acumulador. El modelo utilizado se representa mediante la integración de sus variables de estado tanto en la herramienta MATLAB como en el entorno gráfico ATPDraw, utilizando circuitos, TACs y lenguaje MODELS. Los resultados obtenidos mediante simulación, se comparan con mediciones experimentales y se concluye con los resultados obtenidos.

Palabras Clave—Baterías eléctricas, ion-litio, ciclo de carga, ciclo de descarga, Estado de carga SOC, Estado de salud SOH, estimación de parámetros.

NOMENCLATURA

CE	Circuito equivalente
EDP	Ecuaciones diferenciales parciales
P2D	Pseudo 2 Dimensiones
RC	Circuito resistivo capacitivo
SMB	Sistema de mantenimiento de baterías
SOC	Estado de carga - State of Charge
SOH	Estado de salud - State of Health

I. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de sistemas de almacenamiento de energía y la amplia adopción de vehículos eléctricos resaltan la importancia de las baterías de ion-litio en diversas aplicaciones [1]. Sin embargo, el rendimiento y la vida útil de estos acumuladores están influenciados por factores complejos, incluyendo los ciclos de carga y descarga [2]. El estudio de su comportamiento en estos estados es esencial para garantizar su eficiencia y confiabilidad a lo largo del tiempo. Este trabajo se enfoca en el análisis y modelado de este comportamiento, considerando específicamente los efectos de degradación.

El desarrollo de un modelo circuital equivalente (CE) preciso es un paso crucial en la creación de sistemas de mantenimiento de baterías SMB. En [3], se presenta una metodología innovadora para identificar los parámetros en el CE de baterías de ion-litio, teniendo en cuenta las propiedades electroquímicas. En [4], se introduce un modelo mejorado en dos dimensiones P2D que se desarrolla considerando las

ecuaciones diferenciales parciales, que describen el comportamiento de estas baterías. A través la reducción del orden del modelo, las EDPs se simplifican, lo que conduce a un enfoque más manejable. Además, en [5], se obtiene una función de transferencia de segundo orden que establece una relación entre la tensión en los terminales de la celda y la corriente. Esta respuesta se compara con la obtenida mediante el CE.

El objetivo principal de los trabajos [6]–[9] y [10] es establecer una correspondencia entre las resistencias y capacitancias del (CE) con el modelo y los parámetros electroquímicos de las baterías. Al lograr esta correlación, se mejora la precisión del modelo en diversas condiciones de operación. La integración de las propiedades internas de la batería en este enfoque posibilita la evaluación de futuras aplicaciones, tales como la estimación del estado de carga (SOC) y el estado de salud (SOH). Esto se logra mediante la identificación de los procesos electroquímicos y el modelo circuital, permitiendo mayor precisión en el análisis del comportamiento de los acumuladores en diferentes condiciones de operación.

En [11] resalta la importancia de utilizar un modelo de circuito equivalente de segundo orden RC. En este contexto [12], [13], se detallan los procedimientos de identificación de los parámetros del modelo a través de pruebas de rendimiento en ciclos de carga y descarga. El modelo resultante de [11], considera parámetros variables y se desarrolla utilizando el entorno Simscape®, como herramienta para obtener información precisa y realizar un análisis exhaustivo de los resultados de la simulación.

Cada modelo revela que la incorporación del estado de carga y descarga en el comportamiento de la batería de ion-litio, disminuye el margen de error, mejorando su precisión global. Los métodos propuestos se encuentran actualmente en proceso de validación mediante el uso de herramientas como MATLAB y ATP-EMTP [11], [14]–[16]. Esta metodología conjunta abre nuevas perspectivas en la mejora continua de los modelos de CE para mejorar el rendimiento, la vida útil, la autonomía, así como la gestión y mantenimiento de baterías en diversas aplicaciones.

En este trabajo se presenta una metodología que permite determinar mediante experimentos simples los parámetros del CE de las baterías de ion-litio, con el propósito de estimar el SOC y el SOH, durante su período de operación. Esta información puede ayudar a desarrollar diagnósticos rápidos

del estado de una batería dada.

II. METODOLOGÍA

El objetivo de este trabajo consiste en modelar el comportamiento de una batería de ion-litio mediante un CE. Para este fin se plantea el modelo propuesto en [11], debido a que conjuga los principios electroquímicos de este acumulador con su correspondiente CE. Para determinar los parámetros del CE de este modelo se utiliza una modificación del experimento propuesto en dicha publicación con algunas variaciones requeridas por las herramientas utilizadas.

En este desarrollo se han utilizado principalmente dos herramientas de simulación numérica. Por una parte programas escritos en el lenguaje de MATLAB® [17]–[19] y la herramienta de simulación circuital ATP-EMTP en su entorno gráfico ATPDraw, que permite incluir módulos de programación en el lenguaje MODELS [20]–[22].

II-A. Modelo de Circuito Equivalente

En el caso de una batería sometida a ciclos de carga y descarga frecuentes, el voltaje de la celda varía constantemente con el tiempo. Esta relación se encuentra documentada en [3], [23]–[25], donde se estudian los parámetros eléctricos de CE de manera más detallada. El CE propuesto en este trabajo y compatible con la publicación citada anteriormente, se presenta en la Fig. 1. Este modelo considera los aspectos electroquímicos que se relacionan estrechamente con las fluctuaciones internas tanto en la fase sólida como en la electrolítica de la batería.

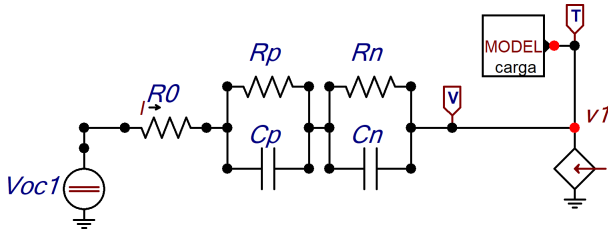


Figura 1. Diagrama esquemático del CE de una batería de ion-litio [3]

La tensión en bornes de la batería $V(t)$, se puede determinar mediante la siguiente expresión,

$$v = V_{ca} - R_o i - v_p - v_n, \quad (1)$$

donde:

- V_{ca} es la tensión de circuito abierto
- R_o es la resistencia interna de la batería
- v_p es la tensión instantánea del borne positivo
- v_n es la tensión instantánea del borne negativo
- i es la corriente instantánea en la batería

El modelo de la batería de ion-litio se obtiene al desarrollar las ecuaciones diferenciales del CE ilustrado en la Fig. 1. Para los electrodos positivo y negativo se obtiene,

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{1}{C_p} \left(i - \frac{v_p}{R_p} \right), \quad (2)$$

$$\frac{dv_n}{dt} = \frac{1}{C_n} \left(i - \frac{v_n}{R_n} \right), \quad (3)$$

donde,

- R_p es la resistencia del electrodo positivo
- R_n es la resistencia del electrodo negativo
- C_p es la capacitancia del electrodo positivo
- C_n es la capacitancia del electrodo negativo

El modelo definido mediante (1) a (3) es un circuito RC de segundo orden.

II-B. Determinación de Parámetros

El modelo de la batería ion-litio consta de seis parámetros: La tensión de circuito abierto V_{ca} , La resistencia interna R_o , la resistencia y capacitancia del ánodo R_p y C_p , así como la resistencia y capacitancia del cátodo R_n y C_n . Adicionalmente el modelo determina dos variables, la tensión en bornes v y la corriente i hacia o desde la carga.

Para determinar el voltaje V_{ca} se mide la tensión en bornes de la batería sin carga. El segundo paso consiste en determinar la caída instantánea de tensión cuando se consume una corriente determinada y la resistencia interna se obtiene como,

$$R_o = \frac{\Delta V}{I_{descarga}} = \frac{V_{ca} - v(t_o)}{I_{descarga}} \quad (4)$$

donde $I_{descarga}$ es la corriente pico durante el pulso de descarga utilizado en el experimento para determinar los parámetros y $v(t_o)$ es la tensión inicial en bornes cuando inicia el ensayo.

Para determinar los parámetros R_p , R_n , C_p y C_n , se realiza una descarga de la batería y se mide la tensión $v(t)$ y la corriente $i(t)$ en cuatro diferentes instantes de tiempo $t = \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$. Utilizando el modelo y los datos obtenidos en estos cuatro instantes de tiempo, se formula un sistema de cuatro ecuaciones no lineales con las respuestas del modelo del CE. Para resolver este sistema de ecuaciones se utiliza el método Gauss-Jordan.

La corriente de descarga se determina mediante la expresión siguiente,

$$i = \frac{v_p}{R_p} + C_p \frac{dv_p}{dt} = \frac{v_n}{R_n} + C_n \frac{dv_n}{dt}. \quad (5)$$

Por lo tanto, al representar mediante un gráfico la curva de tensión y corriente, se obtiene el resultado que se muestra en la Fig. 2.

A partir de (1) y (5), se puede identificar las resistencias de polarización R_p , R_n y las capacitancias de polarización C_p y C_n como plantea [11]. Las tensiones del ánodo v_p y cátodo v_n , se calculan mediante,

$$v_p = v_p(0)e^{-\frac{t}{\tau_p}} + i R_p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right), \quad (6)$$

$$v_n = v_n(0)e^{-\frac{t}{\tau_n}} + i R_n \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right), \quad (7)$$

donde:

- τ_p constante de tiempo positiva

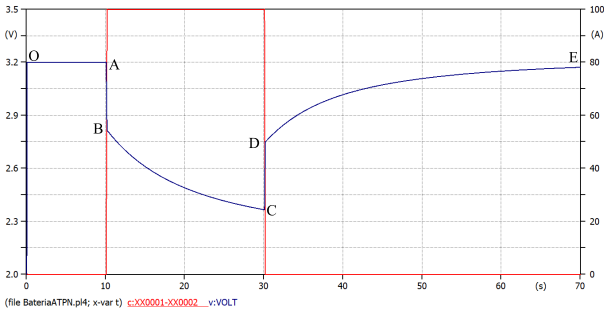


Figura 2. Diagrama esquemático de tensión y corriente en la batería durante el proceso de descarga mediante un pulso de corriente

τ_n constante de tiempo negativa
 $v_p(0)$ tensión inicial extremo positivo
 $v_n(0)$ tensión inicial extremo negativo

El segmento \overline{BC} que se aprecia en la Fig.2, es la respuesta de estado cero del circuito RC , correspondiente a las tensiones de cada extremo de los electrodos de polarización, cuyas respuestas son:

$$v_p = i R_p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}\right), \quad (8)$$

$$v_n = i R_n \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}}\right), \quad (9)$$

durante este el período \overline{BC} , los condensadores C_p y C_n se cargan. Al pasar a cero la corriente de descarga, el segmento \overline{CD} define la tensión de carga de ambos condensadores. La respuesta subsiguiente determina la descarga de estos condensadores sobre sus respectivas resistencias, debido a que la corriente de descarga es nula,

$$v_p(T) = i R_p \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau_p}}\right), \quad (10)$$

$$v_n(T) = i R_n \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau_n}}\right). \quad (11)$$

El tiempo T representa la extensión del pulso en el segmento \overline{BC} , el cual es equivalente a 20 s en este experimento. La corriente de entrada en la sección \overline{DE} es cero, lo que se puede considerar como la respuesta homogénea del circuito RC . El voltaje en los terminales es,

$$v = v_{oc} + v_p(0)e^{-\frac{t}{\tau_p}} + v_n(0)e^{-\frac{t}{\tau_n}} \quad (12)$$

Mediante la utilización de la expresión para la respuesta calculada en (12), es posible determinar los valores de $v_p(0)$, $v_n(0)$, τ_p y τ_n , ajustando mediante el algoritmo Gauss-Jordan los datos experimentales correspondientes. A partir de estos valores ajustados, también se pueden calcular los valores de R_p , R_n , C_p y C_n ,

$$R_p = \frac{v_p(0)}{i \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau_p}}\right)}, \quad (13)$$

$$R_n = \frac{v_n(0)}{i \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau_n}}\right)}, \quad (14)$$

$$C_p = \frac{\tau_p}{R_p}, \quad (15)$$

$$C_n = \frac{\tau_n}{R_n}. \quad (16)$$

La identificación de los parámetros durante el proceso de carga guarda similitudes con lo planteado en [11].

II-C. Cálculo del SOC y SOH

Para calcular el SOC, expresada en porcentaje de la batería completamente cargada, se utiliza [26]:

$$SOC = SOC_0 - \frac{\Delta t}{Q} \times \frac{I}{Ciclo_{carga}}, \quad (17)$$

Para calcular el estado de salud SOH, se aplica [26]:

$$SOH = \exp\left(-\frac{Ciclo_{carga} \times k}{Q_{max}^k}\right) \quad (18)$$

donde $k = 0,6$, normalmente para un deterioro de la batería ion-litio en 1000 ciclos de carga y descarga.

II-D. Análisis del circuito RC en ATPDraw

Para estimar los valores de v_p , v_n , τ_p y τ_n , utilizando ATPDraw se desarrolla un programa en el entorno MODELS. Como este módulo de programación solamente maneja matrices unidimensionales, es necesario utilizar punteros a los vectores que representan las matrices bidimensionales. Para realizar la inversión de la matriz jacobiana obtenida mediante el código mostrado en el Listado 1, se utiliza el método de arreglo extendido, propio de la reducción de Gauss-Jordan [27].

Inicialmente, se procede a completar una matriz con los cálculos de las derivadas correspondientes a cada término de interés. Los valores del jacobiano son almacenados en un vector de dimensión $1 \times n$.

```
-- Inicializacion de la matriz extendida
J2[1..32]:= [0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,
            0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1]
-- Calculo del Jacobiano adaptado para MODELS
for i:=1 to n do
  J2[2*n*(i-1)+1]:=-exp(-t1[i]/X[3])
  J2[2*n*(i-1)+2]:=-exp(-t1[i]/X[4])
  J2[2*n*(i-1)+3]:=-X[1]*exp(-t1[i]/X[3])*...
  ...t1[i]/X[3]**2
  J2[2*n*(i-1)+4]:=-X[2]*exp(-t1[i]/X[4])*...
  ...t1[i]/X[4]**2
endfor
```

Listado 1. Cálculo de la matriz Jacobiana

Una vez que se ha generado el vector jacobiano mediante la aplicación del Algoritmo 1, se procede a su inversión. Esta operación se realiza a través de un proceso de programación detallado en el Listado 2, donde se emplean arreglos unidimensionales con punteros, adaptándose así a las particularidades del lenguaje MODELS.

Input:

F : conjunto de funciones que definen el sistema de ecuaciones no lineales;

J : matriz jacobiana de F ;

x_0 : estimacion inicial;

tol : tolerancia para la convergencia;

max_iter : número máximo de interacciones

Output:

x : solución aproximada del sistema de ecuaciones

Asignar x a x_0 ;

Inicializar $iter$ en 0;

while $iter < max_iter$ **do**

 Calcular $F(x)$;

 Calcular $J(x)$;

 Resolver el sistema lineal $J(x) \cdot \delta_x = -F(x)$ utilizando un método para resolver sistemas lineales;

 Asignar x a $x + \delta_x$;

 Incrementar $iter$ en 1;

if se alcanza la convergencia then

 Detener el ciclo;

end

end

Devolver x como la solución aproximada del sistema de ecuaciones;

Algoritmo 1: Método Newton-Gauss utilizando la matriz jacobiana

```

for i:=1 to n do      -->i-> rows
for j:=1 to n do      -->j-> columns
if i <> j AND J2[2*n*(i-1)+i] <> 0 THEN
p:=J2[2*n*(j-1)+i]/J2[2*n*(i-1)+i]
for k:=1 to 2*n do
J2[2*n*(j-1)+k]:=J2[2*n*(j-1)+k]-...
... (J2[2*n*(i-1)+k]*p)
endfor
endif
endfor
endfor
for i:=1 to n do
for j:=n+1 to 2*n do
if J2[2*n*(i-1)+i] <> 0 THEN
J2[2*n*(i-1)+j]:=J2[2*n*(i-1)+j]/...
... J2[2*n*(i-1)+i]
endif
endfor
endfor

```

Listado 2. Inversa de la matriz Jacobina con arreglos de una dimensión

Una vez invertida la matriz jacobiana, se determina unos nuevos valores de v_p , v_n , τ_p y τ_n . Con los errores existentes entre los valores de estos parámetros en la iteración anterior y los recientemente obtenidos se determina la condición de convergencia sumando los cuadrados de todos estos errores. En este caso particular la convergencia se alcanza cuando el error cuadrático es inferior a $1,0 \times 10^{-5}$. Con los valores finales de la convergencia $v_n(0)$, $v_p(0)$, τ_p y τ_n , se utilizan las expresiones (13)-(16), para determinar los parámetros del modelo de la batería de ion-litio R_p , R_n , C_p y C_n .

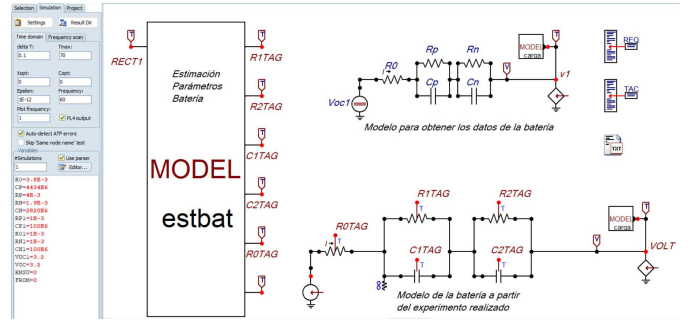


Figura 3. Programación en ATPDraw del modelo de la batería y su identificación de parámetros.

En la Fig. 3 se presenta el modelo ATPDraw que modela la batería real, realiza en ensayo para determinar los parámetros mediante una descarga y determina el modelo con base a las medidas realizadas, mediante el algoritmo de identificación de parámetros descrito en esta sección. A través del proceso de programación en el entorno MODELS de ATPDraw, se obtienen los valores específicos para cada parámetro del modelo. Este proceso es esencial para la caracterización detallada de la batería, permitiendo una representación precisa de su comportamiento a lo largo de los ciclos de carga y descarga.

En el modelo del CE, representado en la Fig. 1, se identifican los parámetros críticos: V_{ca} , R_o , R_p , R_n , C_p y C_n . El sistema experimenta un período estático prolongado, como se evidencia en la Fig. 2, segmento \overline{OA} , donde la batería se mantiene en estado estacionario con corriente nula y voltaje estable. Posteriormente, se aplica una corriente de 100 A, lo que provoca una disminución del voltaje hasta el punto \overline{B} . Durante el proceso de descarga, que abarca 20 s, el efecto de polarización influye en la curva \overline{BC} , reflejado el cambio en el voltaje. Una vez completada la descarga, la corriente vuelve a 0 y el voltaje se eleva hasta el punto \overline{D} debido al efecto de polarización. Desde este punto, se observa la formación de la curva final, influenciada por el proceso de variación de tensión.

III. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de los experimentos con el modelo de la batería, la determinación de los parámetros y el comportamiento de ella en la operación de un vehículo a lo largo de una trayectoria.

III-A. Ensayo de la batería

Para ejemplificar el ensayo de una batería típica de ion-litio se utilizó el modelo propuesto por [11] y explicado en la sección anterior. En la Tabla I.

Tabla I
DATOS DE LOS PARÁMETROS DE LA BATERÍA A SER MODELADA

$V_{oc}(V)$	$R_o(m\Omega)$	$R_p(m\Omega)$	$C_p(F)$	$R_n(m\Omega)$	$C_n(F)$
3,2	3,8	4,0	4,434	1,9	2,820

III-B. Parámetros de la batería

Para determinar experimentalmente los parámetros de la batería presentada en la Tabla I. se realiza el experimento virtual de descargar la batería con 100 A, durante 20 s, tal como se ilustra en la Fig. 2. A partir de este gráfico se determinan los valores que se muestran en la Tabla II.

Tabla II
MEDICIONES REALIZADAS DURANTE EL EXPERIMENTO

	V_{ca}	$\Delta V(0)$	$V(t_1)$	$V(t_1)$	$V(t_1)$	$V(t_1)$
$t(s)$	0	0	39,2	42,4	49,5	56,8
$V(t)(V)$	3,2	0,07	2,7910	2,8314	2,8666	2,8972

Con los datos obtenidos durante el experimento, presentados en la Tabla II y utilizando el Algoritmo 1, se obtienen los valores intermedios p , n , $v_p(0)$ y $v_n(0)$, que se presentan en la Tabla III.

Tabla III
MEDICIONES REALIZADAS DURANTE EL EXPERIMENTO

$\tau_p(s)$	$\tau_n(s)$	$v_p(0)V$	$v_n(0)V$
17,68	5,30	0,2702	0,1856

Finalmente, utilizando los datos obtenidos pro el programa de la Tabla III, se calculan mediante las expresiones (13)-(16), los parámetros del modelo de la batería. En la Tabla IV, se presentan los resultados obtenidos, los parámetros iniciales de la batería y el error obtenido en la estimación.

Tabla IV
MEDICIONES REALIZADAS DURANTE EL EXPERIMENTO

Parámetro	Valor real	Valor cal	error %
$V_{ca}(V)$	3,2	3,1885	0,3594
$R_0(m\Omega)$	3,8	3,7986	0,0368
$R_p(m\Omega)$	4,0	3,9892	0,2700
$C_p(F)$	4,434	4,433	0,0225
$R_n(m\Omega)$	1,9	1,8991	0,0474
$C_n(F)$	2,820	2,7951	0,9535

De los resultados presentados en la Tabla IV, se observa que el error máximo entre los valores reales de los parámetros de la batería de ion-litio y la estimación realizada mediante el experimento virtual son inferiores, en el peor caso a 1.0%. Esto determina que la estimación de los parámetros en función del una descarga de 100 A, durante 20 s, permiten un ajuste preciso del modelo de la batería.

III-C. Comportamiento de la batería

En la Fig. 4, [26], se presenta la ruta utilizada para llevar a cabo el análisis, utilizando como punto de partida, la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca, y el Condominio El Pacífico, situado en la intersección de las calles Cornelio Crespo Vega y Tarquino Cordero como destino. La distancia total de la ruta es de 7,65 km, con un tiempo estimado de trayecto de 28 min.

La representación circuital de la batería permite simular el recorrido de un vehículo eléctrico, durante el cual se produce la

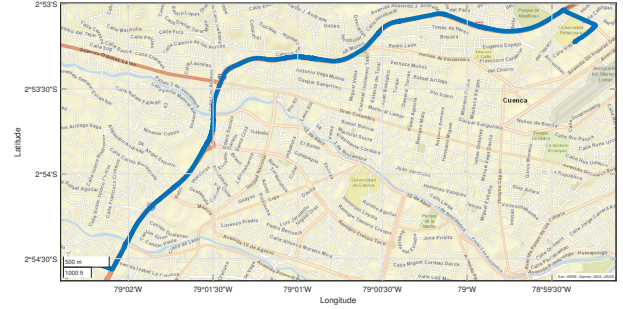


Figura 4. Ruta para determinar el comportamiento de la batería de ion-litio [26].

Tabla V
COMPORTAMIENTO DE LA BATERÍA DURANTE EL RECORRIDO

$Q_n(Ah)$	$Q_{max}(Ah)$	$k(pu)$	$SOC(\%)$	$SOH(\%)$
$2,89 \times 10^5$	$3,18 \times 10^5$	0,6	99,99993	74,08

descarga controlada del acumulador de ion-litio. En la Tabla V, se presenta el comportamiento del estado de carga SOC para un recorrido y el SOH para 1000 ciclos de carga y descarga. También se indican las capacidades de carga Q_n y la capacidad máxima Q_{max} del acumulador, así como su coeficiente k de envejecimiento, utilizado en (6). En la Fig. 5, se presenta el comportamineto del SOC de la batería, durante un trayecto y en la Fig. 6, el SOH después de 1000 ciclos repetitivos de carga y descarga. La trayectoria establecida en estos ciclos incluye periodos de aceleración, frenado y pendientes, proporcionando así una representación detallada del SOC y SOH de la batería en condiciones realistas de conducción.

IV. CONCLUSIONES

Los experimentos realizados para evaluar el modelo de la batería de ion-litio, la determinación de sus parámetros y su comportamiento durante la operación de un vehículo eléctrico proporcionaron resultados útiles para identificar la autonomía y el ciclo de vida esperado.

A través del ensayo de la batería de ion-litio, utilizando el método propuesto por [11], se logró una estimación precisa de los parámetros, con un error inferior al 1,0 %.

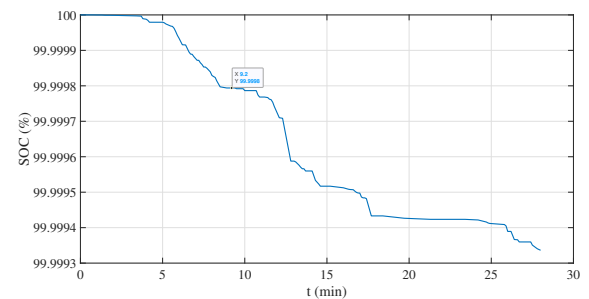


Figura 5. Evolución del SOC a lo largo de la ruta utilizada.

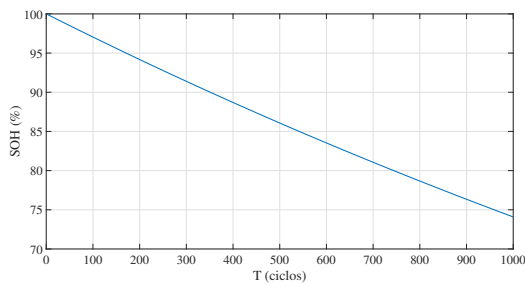


Figura 6. Evolución del SOH a lo largo de 1000 ciclos de carga y descarga, considerando la degradación.

La experimentación virtual de descarga con 100 A durante 20 s y la medición de voltajes en cuatro tiempos, permitió la parametrización del modelo circuital de la batería, utilizando un algoritmo de solución de ecuaciones no lineales mediante el método de Newton. Este enfoque demostró ser efectivo y robusto para la caracterización precisa de baterías en condiciones específicas de operación.

Adicionalmente, la representación detallada de la batería en un escenario realista operando en un vehículo eléctrico, a través de la simulación de un recorrido vehicular específico, demostró la capacidad del modelo para evaluar la autonomía de la batería y su deterioro a través de los ciclos de carga y descarga.

Estos resultados respaldan la utilidad y precisión del modelo propuesto, así como la efectividad de la metodología empleada para la determinación de los parámetros del modelo.

Este estudio contribuye a la caracterización de baterías de ion-litio, facilitando su implementación efectiva en sistemas de tracción de vehículos eléctricos y promoviendo el desarrollo continuo de tecnologías de almacenamiento de energía.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca y al Grupo de Investigación en Energía todo el apoyo prestado para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] M. Amini, M. H. Nazari, and S. H. Hosseini, "Optimal scheduling and cost-benefit analysis of lithium-ion batteries based on battery state of health," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 1359–1371, 2023.
- [2] L. Cheng, Y. Wan, Y. Zhou, and D. W. Gao, "Operational reliability modeling and assessment of battery energy storage based on lithium-ion battery lifetime degradation," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 10, no. 6, pp. 1738–1749, 2022.
- [3] X. Zhang, J. Lu, S. Yuan, J. Yang, and X. Zhou, "A novel method for identification of lithium-ion battery equivalent circuit model parameters considering electrochemical properties," *Journal of Power Sources*, vol. 345, pp. 21–29, 2017.
- [4] J. C. Forman, S. Bashash, J. L. Stein, and H. K. Fathy, "Reduction of an electrochemistry-based li-ion battery model via quasi-linearization and padé approximation," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 158, no. 2, p. A93, dec 2010.
- [5] B. Wang, S. E. Li, H. Peng, and Z. Liu, "Fractional-order modeling and parameter identification for lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 293, pp. 151–161, 2015.
- [6] H. He, R. Xiong, and J. Fan, "Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach," *energies*, vol. 4, no. 4, pp. 582–598, 2011.

- [7] S. Susanna, B. R. Dewangga, O. Wahyungoro, and A. I. Cahyadi, "Comparison of simple battery model and thevenin battery model for soc estimation based on ocv method," in *2019 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, July 2019, pp. 738–743.
- [8] S. Liu, A. Forsyth, and R. Todd, "Battery loss modelling using equivalent circuits," in *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Sep. 2019, pp. 2478–2484.
- [9] G. Plett, *Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling*. Artech, 2015.
- [10] R. Jurgen, *Modeling of Li-ion Battery Performance in Hybrid Electric Vehicles (2009-01-1388)*. SAE, 2011, pp. 83–88.
- [11] Y. Jin, W. Zhao, Z. Li, B. Liu, and L. Liu, "Modeling and simulation of lithium-ion battery considering the effect of charge-discharge state," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1907, no. 1. IOP Publishing, 2021, p. 012003.
- [12] J. Meng, G. Luo, M. Ricco, M. Swierczynski, D.-I. Stroe, and R. Teodorescu, "Overview of lithium-ion battery modeling methods for state-of-charge estimation in electrical vehicles," *Applied sciences*, vol. 8, no. 5, p. 659, 2018.
- [13] S. M. Rezvanzaniani, Z. Liu, Y. Chen, and J. Lee, "Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (ev) safety and mobility," *Journal of power sources*, vol. 256, pp. 110–124, 2014.
- [14] D. N. T. How, M. A. Hannan, M. S. Hossain Lipu, and P. J. Ker, "State of charge estimation for lithium-ion batteries using model-based and data-driven methods: A review," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 136 116–136 136, 2019.
- [15] T. L. and, "Bodo's power systems @ validating battery management systems with simulation models bodo's power systems @ 55 content," *Market Manager and Power Electronics Control and MathWorks*, 2019.
- [16] S.-C. Wang and Y.-H. Liu, "A pso-based fuzzy-controlled searching for the optimal charge pattern of li-ion batteries," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 5, pp. 2983–2993, May 2015.
- [17] N. Lin, S. Cao, and V. Dinavahi, "Massively parallel modeling of battery energy storage systems for ac/dc grid high-performance transient simulation," *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 1–12, 2022.
- [18] L. W. Yao, J. A. Aziz, P. Y. Kong, and N. R. N. Idris, "Modeling of lithium-ion battery using matlab/simulink," in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Nov 2013, pp. 1729–1734.
- [19] F. Nisar, S. Haider, I. Alam, A. Waqar, T. Ahmed, and M. Usman, "A model for the optimization of battery capacity and power transmitters of on-line electric vehicles for closed/open environments," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, pp. 1–13, 2021.
- [20] J.-H. Kim, S.-J. Lee, E.-S. Kim, S.-K. Kim, C.-H. Kim, and L. Prikler, "Modeling of battery for ev using emtp/atpdraw," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 98–105, 2014.
- [21] V. Costa, L. B. Morais, B. D. Bonatto, M. C. Passaro, and E. V. de Lorenzi, "Development of a simulation interface for assessing electromagnetic transients in multiple li-ion battery technologies assuming parameter variability," *Electrical Engineering*, pp. 1–16, 2023.
- [22] M. Kizilcay, H. Hoidalén, and A. Ametani, "Emtp-atp," *Numerical Analysis of Power System Transients and Dynamics*, vol. 78, p. 47, 2015.
- [23] A. Szumanowski and Y. Chang, "Battery management system based on battery nonlinear dynamics modeling," *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 57, no. 3, pp. 1425–1432, 2008.
- [24] S. Wang, C. Fernandez, M. Chen, L. Wang, and J. Su, "A novel safety anticipation estimation method for the aerial lithium-ion battery pack based on the real-time detection and filtering," *Journal of cleaner production*, vol. 185, pp. 187–197, 2018.
- [25] B. Sun, X. He, W. Zhang, H. Ruan, X. Su, and J. Jiang, "Study of parameters identification method of li-ion battery model for ev power profile based on transient characteristics data," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 661–672, Jan 2021.
- [26] B. F. Gonzalez Cedillo and N. J. Pelaez Alvarez, "Análisis de operación de vehículos eléctricos en tracción, frenado reostático y regenerativo," B.S. thesis, 2023.
- [27] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling, *Numerical recipes in Fortran 77*, 2nd ed. Cambridge University Press, 1992.