

Efficiency and Performance Analysis of Battery-Ultracapacitor based Semi-active Hybrid Energy Systems for Electric Vehicles

M. Asensio, *Student Member, IEEE*, G. Magallán, *Member, IEEE*, G. Amaya, *Student Member, IEEE* and C. De Angelo, *Senior Member, IEEE*

Abstract— This papers presents a comparative analysis of two semi-active configurations of Hybrid Energy Storage Systems for electric vehicles combining batteries and ultracapacitors. The analysis of a proper sizing of the battery and ultracapacitor bank according to the power requirement of the vehicle is first presented. In addition, a method to select the low pass filter cut-off frequency used for power split is proposed. Losses in each of the components of the system elements are analyzed and included in the model. For both configurations, a commonly used control strategy based on the load power separation is implemented and simulations for a scaled NEDC driving cycle are performed. Then, based on a loss and performance analysis, it is determined which configuration is the most convenient for this application.

Keywords— Electric vehicles, battery, ultracapacitor, storage system sizing, hybrid energy storage system, DC/DC converter, traction system.

I. INTRODUCCIÓN

LOS VEHÍCULOS eléctricos (VE) poseen una creciente popularidad como medio de transporte en zonas urbanas, debido a que no emiten gases tóxicos y a su gran eficiencia. Sin embargo, comparados con los vehículos basados en combustibles fósiles, aún presentan ciertas limitaciones que no le permiten imponerse como el principal medio de transporte. Es por esto que las investigaciones y los desarrollos actuales están enfocados en maximizar la eficiencia energética e incrementar las densidades de energía y potencia de los sistemas de almacenamiento de los VE, para alcanzar autonomías equiparables a la de los vehículos de combustión interna. En la actualidad, las baterías son el principal elemento de almacenamiento de energía en VE. En comparación con otros elementos almacenadores, las baterías, se caracterizan por una alta densidad de energía gravimétrica (dada en Wh/kg), pero como contrapartida presentan baja densidad de potencia (en W/kg). Esto las limita a la hora de satisfacer los picos de potencia que exige el VE durante la aceleración y el frenado.

Los perfiles de corriente de carga, frecuentemente solicitados por los sistemas de tracción de VE, poseen grandes variaciones en magnitud por instantes cortos de tiempo, deteriorando y reduciendo la vida útil de la batería [1], [2], [3], [4].

M. Asensio, Universidad Nacional de Río Cuarto y CONICET, Córdoba, Argentina, maxiasensio@gmail.com.

G. Magallán, Universidad Nacional de Río Cuarto, CONICET, Córdoba, Argentina, gmagallan@ieee.org.

G. Amaya, Universidad Nacional de Río Cuarto y CONICET, Córdoba, Argentina, e.g.amaya@ieee.org.

C. De Angelo, Universidad Nacional de Río Cuarto, CONICET, Argentina, cdeangelo@ieee.org.

Con el fin de contrarrestar esta problemática surgen las propuestas de los sistemas híbridos de almacenamiento de energía (SHAE), que utilizan almacenadores auxiliares para compensar las limitaciones dinámicas de las baterías y preservar su vida útil [5], [6], [7]. Particularmente, los ultracapacitores (UC) poseen una alta densidad de potencia y una gran tasa de ciclos de carga y descarga [8]. Además, son eficientes para el intercambio de energía, ya que poseen una baja resistencia interna (generalmente un orden menor que la de las baterías). Por estas razones, la combinación de baterías y UC como SHAE resulta muy beneficiosa en aplicaciones de tracción eléctrica. En estos casos el UC es responsable de la entrega o absorción rápida de potencia requerida, mientras que las baterías proporcionan, con una dinámica más lenta, la energía de régimen permanente. Esto resulta en un intercambio de energía más eficiente con el sistema de tracción, mientras que al mismo tiempo se disminuye el estrés sobre las baterías [9], [10], [11], [12].

Existen diferentes configuraciones de interconexión de baterías y UC con el bus de CC del VE según el grado de control sobre los almacenadores [6], [8], [13], [14], [15], [16]. En particular, la configuración semi-activa presenta especial interés ya que permite una solución intermedia con control de la energía entregada por el SHAE sin la complejidad y el costo que implica la utilización de dos convertidores.

Si bien existen análisis comparativos para SHAE en configuración semi-activa, no se encuentran en la literatura análisis que comparen y evalúen qué configuración supone una mejor solución para una aplicación de VE desde el punto de vista dinámico y de pérdidas. Los trabajos existentes realizan comparaciones en base a sistemas que alimentan cargas genéricas modeladas como fuentes de corriente que no representan de forma exacta el comportamiento del sistema de tracción. A su vez, en muchos casos no se evalúan casos en que las corrientes y tensiones del sistema puedan superar umbrales de diseño y protección, y la influencia de dichas variables en el rendimiento del convertidor CC/CC [14], [15], [17], [18], [19].

En este trabajo se realiza un análisis comparativo de las dos configuraciones de SHAE semi-activas para VE. Cada configuración es evaluada desde el punto de vista de pérdidas, dimensionamiento de los almacenadores y dinámica de las corrientes y tensiones considerando el impacto en el SHAE cuando el vehículo recorre un ciclo de manejo específico. Para esto se modela el requerimiento de potencia a partir del modelo longitudinal del VE. Además, se propone un método para seleccionar la frecuencia de corte del filtro utilizado para la separación de potencias en ambas configuraciones.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección II se describen las configuraciones semi-activas bajo análisis en conjunto con el modelo longitudinal del VE, en la sección III se presenta modelado de cada configuración y un análisis de pérdidas, en la sección IV se presenta la estrategia de control junto con la determinación de la frecuencia de corte del filtro para la división de potencias, en la sección V se presentan resultados de simulación y finalmente en la sección VI se expresan las conclusiones finales.

II. REQUERIMIENTOS Y DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

El requerimiento de potencia y energía de un VE se obtiene a partir de las especificaciones de aceleración y velocidades para un cierto trayecto conocido. Utilizando el modelo longitudinal de fuerzas del vehículo se puede encontrar la fuerza de tracción, $f_t(t)$, necesaria en cada instante como:

$$f_t(t) = \underbrace{C_r M_v g \cos(\alpha(t))}_{f_{rr}} + \underbrace{\frac{1}{2} \rho C_d A v(t)^2 \operatorname{sgn}(v(t))}_{f_{ad}} + \underbrace{M_v g \sin(\alpha(t))}_{f_{rg}} + \underbrace{M_v \dot{v}(t)}_{f_{acc}} \quad (1)$$

donde, f_{rr} es la fuerza de rozamiento de las ruedas, f_{ad} es la fuerza de la resistencia aerodinámica del viento, f_{rg} es la fuerza componente del peso debido a la pendiente del camino y f_{acc} la fuerza de aceleración. En la Tabla I se describen los parámetros utilizados para el cálculo de dichas fuerzas.

La potencia eléctrica requerida por el motor de tracción al sistema de almacenamiento, considerando las eficiencias del sistema mecánico, η_{mec} , y del convertidor de CC/CA que maneja al motor de tracción, η_{inv} , será:

$$P_{req}(t) = \begin{cases} \frac{f_t(t)v(t)}{\eta_{mec}\eta_{inv}} & \text{si } \dot{v}(t) \geq 0 \\ \eta_{mec}\eta_{inv}f_t(t)v(t) & \text{si } \dot{v}(t) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

En la Fig. 1 se muestra a modo ilustrativo el requerimiento de potencia, P_{req} , del sistema de tracción al sistema de almacenamiento para un determinado perfil velocidad. La forma de onda $P_{req}(t)$ es típica de aplicaciones vehiculares donde se presentan etapas de aceleración, frenado y velocidad constante.

En un SHAE compuesto por baterías y UC se busca separar el requerimiento de potencia en dos términos: un valor medio, $P_{med}(t)$, llamado “potencia media” y otro de alta frecuencia $P_{din}(t)$, denominado “potencia dinámica”,

$$P_{req}(t) = P_{med}(t) + P_{din}(t) \quad (3)$$

Idealmente, el banco de baterías debería entregar la potencia media, $P_{bat} = P_{med}$, mientras que el módulo de UC debería suministrar la potencia dinámica, $P_{uc} = P_{din}$ [17].

En la Fig. 2 se muestran la configuración de SHAE batería semi-activa (BSA) y capacitor semi-activo (CSA). En el caso BSA, un convertidor CC/CC controla el flujo de energía entre la batería y el bus de CC, mientras que el UC se conecta de

TABLA I
PARÁMETROS

Parámetro	Descripción	Unidades
C_r	Coefficiente de Rozamiento	-
M_v	Masa del Vehículo	Kg
α	Inclinación del camino	rad
ρ	Densidad del aire	Kg/m ³
C_d	Resistencia Aerodinámica	-
A	Área frontal del vehículo	m ²
v	Velocidad del vehículo	m/s
g	Aceleración de la gravedad	m/s ²

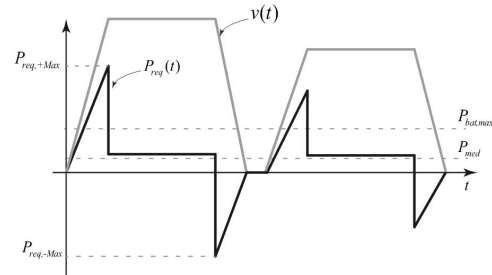


Fig. 1. Requerimiento de potencia del sistema de tracción.

forma directa al bus de CC que alimenta al inversor del motor de tracción, el cual representa la carga del sistema de almacenamiento. Para la configuración CSA, el UC se conecta al bus de CC a través de un convertidor CC/CC, mientras que la batería alimenta al bus de CC de forma directa.

II-A. Banco de Baterías

Independientemente de la configuración de SHAE, el banco de baterías debe ser dimensionado que suministre la energía necesaria, E_{bat} , y el vehículo realice el recorrido en un determinado tiempo, t_{rec} . Si se considera un caso ideal, la potencia media P_{med} puede estimarse constante, por lo tanto:

$$E_{bat} = \int_0^{t_{rec}} P_{req}(t) dt \approx P_{med}(t) t_{rec} \quad (4)$$

Generalmente, el banco de baterías se conforma a partir de la combinación de conexiones en serie y paralelo de celdas o baterías individuales $Bat_{cel} = \{V_{b,cel}; R_{b,cel}; q_{cel}\}$, donde $V_{b,cel}$ es el voltaje nominal de la celda, $R_{b,cel}$ es la resistencia en serie equivalente y q_{cel} es la capacidad energética (dada en Ah).

Se puede relacionar la expresión (4) con el número de celdas en serie, $n_{s,bat}$, utilizadas para alcanzar un nivel de tensión deseado y de ramas en paralelo, $n_{p,bat}$, para aumentar la capacidad energética y conformar el banco $Bat_{banco} = \{V_b; R_b; q_b\}$:

$$V_b = n_{s,bat} V_{b,cel} \quad (5)$$

$$R_b = n_{s,bat} R_{b,cel} / n_{p,bat}$$

$$q_b = n_{p,bat} q_{b,cel} = E_{bat}$$

De esta forma, el banco será capaz de entregar una potencia máxima $P_{bat,Max}$ que será mayor que el requerimiento medio

$P_{req,med}$, es decir $P_{bat,max} \geq P_{req,med}$. Sin embargo, debido a la baja densidad de potencia que poseen las baterías, el banco no

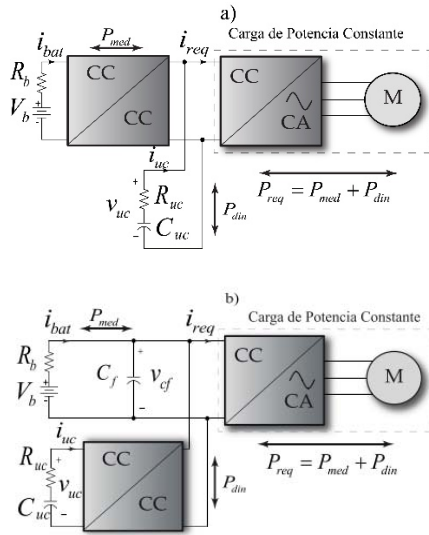


Fig. 2. Configuraciones de SHAE: (a) Batería Semi-Activa (BSA), (b) Capacitor Semi-Activo (CSA).

podrá suministrar la potencia máxima $P_{req,Max}$. Es por esto que normalmente el banco debe sobredimensionarse cuando el sistema de almacenamiento sólo está compuesto por baterías.

Por otro lado, debido a que la tensión en bornes de la batería varía en función de su estado de carga (SoC, del inglés *State of Charge*) en el rango $V_{bat,min} \leq v_{bat} \leq V_{bat,max}$, la corriente máxima $i_{bat,max}$ que deberá entregar o absorber es:

$$i_{bat} = \pm \frac{P_{bat,max}}{V_{bat,min}} \quad (6)$$

Esta corriente es la que se debe tener en cuenta para dimensionar el convertidor en la configuración BSA.

II-B. Banco de UC

El UC debe dimensionarse contemplando principalmente la energía necesaria durante las etapas de aceleración y frenado del vehículo. De esta manera, en función de la capacidad del UC, C_{uc} , y sus tensiones nominales mínima y máxima ($V_{uc,min}$ y $V_{uc,max}$), la energía máxima de almacenamiento del UC, $E_{uc} = \frac{1}{2}C_{uc}(V_{uc,max}^2 - V_{uc,min}^2)$ debe satisfacer la expresión:

$$E_{uc} \geq 2 \max \left(\int \underbrace{P_{req}(t) - P_{med}(t)}_{P_{din}(t)} dt \right) \quad (7)$$

Se considera el máximo requerimiento energético para el dimensionamiento del UC, ya que la integral de la potencia dinámica de la expresión (7) evaluada en el tiempo del recorrido será igual a cero; principalmente porque, en un caso ideal, la energía solicitada por el vehículo para acelerar es la misma que los motores de tracción devolverán durante el frenado regenerativo. Repitiendo el análisis realizado para el banco de baterías, se supone que el modulo del UC se conforma a partir de celdas individuales

$C_{uc,celda} = \{V_{uc,cel}; C_{uc,cel}; R_{uc,cel}\}$, donde $V_{uc,cel}$ es el voltaje nominal de la celda, $R_{uc,cel}$ es la resistencia en serie equivalente y $C_{uc,cel}$ es la capacidad del UC. Considerando el número de celdas en serie y de ramas en

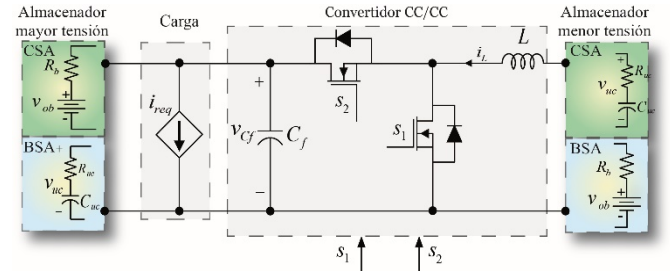


Fig. 3. Esquema general de SHAE semi-activo.

paralelo, $n_{s,uc}$ y $n_{p,uc}$ respectivamente, para conformar el banco de UC $C_{uc,banco} = \{v_{uc}; C_{uc}; R_{uc}\}$:

$$\begin{aligned} v_{uc} &= n_{s,uc} V_{uc,cel} \\ R_{uc} &= n_{s,uc} R_{uc,cel} / n_{p,uc} \\ q_{uc} &= n_{p,uc} C_{uc,cel} / n_{s,uc} \end{aligned} \quad (8)$$

El requerimiento de potencia al UC dependerá de la estrategia de control implementada, y estará dentro de los límites $P_{req,Max} - P_{med} \leq P_{uc} \leq P_{req,Max}$. En el peor caso, la corriente máxima que entregará el UC (y el convertidor CC/CC) será,

$$i_{uc,max} = \pm \frac{P_{req,max}}{V_{uc,min}} \quad (9)$$

III. MODELADO Y ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

Para realizar el análisis comparativo entre las dos configuraciones semi-activas de SHAE (BSA y CSA), en la Fig. 3 se muestra un esquema genérico que representa a ambas configuraciones. El conjunto inversor y motor de tracción se modela como una carga de potencia constante, debido al comportamiento de impedancia negativa que presenta visto desde el bus de CC. Esto se debe principalmente al control de par-velocidad aplicado a los motores de tracción en estas aplicaciones [20], [21]. Dicha carga se conecta en paralelo con uno de los almacenadores de energía (AE) en función de la configuración de SHAE adoptada y el AE restante se conecta al bus de CC a través de un convertidor CC/CC. En este trabajo se considera que el nivel de tensión nominal del bus de CC será igual en ambas configuraciones y siempre será mayor que el nivel del AE cuya transferencia de energía es controlada directamente a través del convertidor. Para el análisis, se considera un convertidor CC/CC no aislado y de alta eficiencia del tipo buck-boost (compuesto por los transistores S_1 y S_2 y el inductor L), cuyo puerto de mayor tensión se conecta al bus de CC y el de menor tensión se conecta con el AE que se busca controlar.

Por recomendaciones de fabricantes el UC no debe descargarse por debajo de $V_{uc,min} = V_{uc,max} / 2$ [17], lo que permite una utilización del 75% de la energía total almacenable. Por lo tanto, la tensión de régimen del UC debe escogerse para utilizar la energía disponible en partes iguales durante aceleraciones sin que el UC se descargue por debajo de su tensión mínima y durante frenados sin que exceda su límite máximo de tensión [13]. Para el caso CSA, esta tensión es $V_{uc} = V_b / \sqrt{2}$ y para BSA, sabiendo que en todo momento $v_b < v_{uc}$, será $V_{uc} = V_b \sqrt{2}$.

Las pérdidas del SHAE estarán dadas por las pérdidas en el banco de baterías, $P_{loss,bat}$, pérdidas en el UC, $P_{loss,uc}$, y las pérdidas en el convertidor de CC/CC, $P_{loss,conv}$:

$$P_{loss,SHAE} = P_{loss,bat} + P_{loss,uc} + P_{loss,conv} \quad (10)$$

En las subsecciones siguientes se analizan las pérdidas de cada uno de estos elementos.

III-A. Pérdidas en las baterías

La batería se modeló de forma genérica como una fuente de tensión v_{ob} en serie con una resistencia equivalente R_b . La tensión en bornes estará dada por $v_b = v_{ob} - R_b i_b$, donde i_b es la corriente de batería. A su vez v_{ob} representa la tensión a circuito abierto y puede ser considerada como un fuente de tensión controlada según la siguiente expresión [22], [23]:

$$v_{ob} = \begin{cases} i_b^* > 0 \rightarrow v_{ob} - K \frac{Q}{i_t - 0.1Q} i_b^* - K \frac{Q}{Q - i_t} i_t + A e^{-B i_b} \\ i_b^* < 0 \rightarrow v_{ob} - K \frac{Q}{Q - i_t} (i_b^* + i_t) - K \frac{Q}{Q - i_t} i_t + A e^{-B i_b} \end{cases} \quad (11)$$

donde A es el voltaje de la zona exponencial (dada en V), B es la capacidad de la zona exponencial (en Ah^{-1}), Q es la capacidad máxima de la batería (Ah), i_t es la capacidad extraída (en Ah), i_b^* es la corriente de batería de dinámica lenta o filtrada (en A) y K (en Ah^{-1}) es la constante de polarización. Considerando constante la resistencia interna, las pérdidas del banco de batería $P_{loss,bat}$ se aproximan como:

$$P_{loss,bat} \approx i_b^2 R_b \quad (12)$$

Debe notarse que el dimensionamiento del banco de baterías según el número de celdas en serie y paralelo, impacta en la resistencia serie total y en la eficiencia del banco.

III-B. Pérdidas en el banco de Ultracapacitores

El banco de UC se modela como una capacidad C_{uc} en serie con una resistencia equivalente R_{uc} y su tensión en bornes, v_{uc} , está dada por $v_{uc} = v_{C_{uc}} - i_{uc} R_b$, con

$$C_{uc} \dot{v}_{C_{uc}} = i_{uc} \quad (13)$$

donde i_{uc} es la corriente del UC y $v_{C_{uc}}$ es la tensión de la capacidad interna del UC. Las pérdidas del banco de UC, $P_{loss,uc}$, pueden aproximarse considerando constante la resistencia en serie equivalente:

$$P_{loss,uc} \approx i_{uc}^2 R_{uc} \quad (14)$$

III-C. Pérdidas en el convertidor CC/CC

El modelo conmutado del convertidor de la Fig. 4, incluyendo los almacenadores, para el caso de CSA puede escribirse como:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_{C_f} \\ \dot{v}_{C_{uc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{i_L R_{uc} + v_{C_{uc}}}{L} \\ \frac{v_{ob}}{R_b C_f} - \frac{v_{C_f}}{R_b C_f} - \frac{P_{req}}{R_b C_f} \\ -\frac{i_L}{C_{uc}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{v_{C_f}}{L} \\ \frac{i_L}{C_f} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (15)$$

donde i_L es la corriente del inductor, v_{C_f} es la tensión del capacitor de filtro, C_f , del bus de CC, L es la inductancia, P_{req} es la potencia requerida por el inversor y u es la acción de control que representa la señal de activación de la llave S_1 .

Para el caso de BSA se prescinde del capacitor de filtro C_f ya que el UC se conecta en el bus de CC y el modelo puede escribirse como:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_{C_{uc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_{ob} - v_{C_{uc}} - i_L R_b + \left(\frac{P_{req}}{v_{C_{uc}}} - i_L \right) \frac{R_{uc}}{L}}{L} \\ \frac{P_{req}}{C_{uc} v_{C_{uc}}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_{C_{uc}} - \left(\frac{P_{req}}{v_{C_{uc}}} - i_L \right) \frac{R_{uc}}{L}}{L} \\ -\frac{i_L}{C_{uc}} \end{bmatrix} u \quad (16)$$

En ambos casos las pérdidas del convertidor pueden modelarse de forma aproximada como la suma de las pérdidas de conducción de las llaves $P_{loss,cond}$, pérdidas de conmutación $P_{loss,sw}$ y las pérdidas del inductor $P_{loss,ind}$ [24]:

$$P_{loss,conv} \approx \underbrace{i_L^2 R_{on}}_{P_{loss,cond}} + \underbrace{0.5 f_s (t_r + t_f) |i_L| V_{bus}}_{P_{loss,sw}} + \underbrace{i_L^2 R_L}_{P_{loss,ind}} \quad (17)$$

donde R_{on} es la resistencia de conducción de las llaves, t_r y t_f son los tiempos de encendido y apagado, f_s es la frecuencia de conmutación, R_L es la resistencia óhmica asociada al inductor, $|i_L|$ es el valor absoluto de la corriente del inductor y V_{bus} es la tensión del bus de CC.

IV. ESTRATEGIA DE CONTROL

Existen diferentes estrategias de control para un SHAE con baterías y UC, pero la más utilizada, y aplicada en este trabajo, consiste en la separación de la potencia instantánea requerida, P_{req} mediante la utilización de un filtro pasabajos, generalmente de primer orden. A la salida del filtro se obtiene la referencia de potencia media P_{med}^* utilizada para generar la referencia de corriente para el control del convertidor de la configuración BSA:

$$i_b^* = \frac{P_{med}^*}{v_b} \quad (18)$$

La corriente del UC en esta configuración resultará $i_{uc} = i_{req} - i_b v_b / v_{uc}$, donde i_{req} es la corriente solicitada por el inversor, v_b es la tensión de batería e i_b su corriente.

A su vez, para la configuración CSA, la referencia de potencia dinámica, $P_{din}^* = P_{req} - P_{med}^*$, se utiliza para generar la referencia de corriente $i_{uc,din}^*$ que debe entregar el UC:

$$i_{uc,din}^* = \frac{P_{din}^*}{V_{uc}} \quad (19)$$

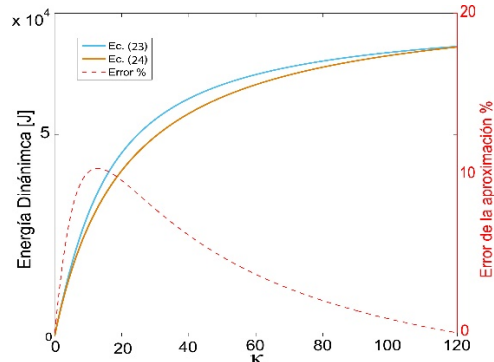


Fig. 4. Energía dinámica y su aproximación en función de κ .

Mientras que la corriente entregada por el banco de baterías será $i_b = i_{req} - i_{uc} v_{uc} / v_{C_f}$.

Además, en ambas configuraciones es necesario realizar un control de tensión del UC para mantener el voltaje en un valor de referencia deseado, por ejemplo, preparándolo para la carga en el frenado regenerativo o la descarga en las aceleraciones. Generalmente consiste en un lazo de control externo que genera

una referencia de corriente lenta, $i_{v_{uc}}^*$, que se suma a la referencia de corriente dinámica $i_{uc,din}^*$ o media $i_{b,med}^*$ que debe entregar el convertidor CC/CC mediante un control de bajo nivel [25].

IV-A. Cálculo de la frecuencia de corte del filtro pasabajos

La función de transferencia del filtro pasabajos de primer orden utilizado para la separación de potencias se expresa como:

$$FPB(s) = \frac{P_{req}(s)}{P_{med}(s)} = \frac{1}{1 + \kappa s} \quad (20)$$

donde la frecuencia de corte del filtro está dada por $f_c = 1/2\pi\kappa$. El criterio de selección de la constante κ propuesto en este trabajo consiste en tomar el peor caso de aceleración o frenado del ciclo de manejo del VE, de forma que el UC entregue una porción de la energía requerida durante el tiempo de aceleración o frenado, t_a , y se pueda aprovechar la energía del UC para la cual fue dimensionado según (7). Suponiendo que la potencia requerida en la entrada del filtro

durante el intervalo de tiempo $0 \leq t \leq t_a$ es una rampa del tipo $P_{req} = P_{max} t / t_a$, la potencia media a la salida del filtro será:

$$P_{med}(t) = \frac{P_{max}}{t_a} \kappa e^{-t/\kappa} - \frac{P_{max}}{t_a} \kappa + \frac{P_{max}}{t_a} t \quad (21)$$

Por lo tanto, la potencia dinámica $P_{din} = P_{req} - P_{med}$ resulta:

$$P_{din}(t) = \frac{P_{max}}{t_a} \kappa (1 - e^{-t/\kappa}) \quad (22)$$

Integrando (22) respecto al tiempo y evaluando desde $0 \leq t \leq t_a$, se obtiene la energía dinámica que debe entregar el UC durante el intervalo:

$$E_{din} = P_{max} \kappa (1 + \frac{\kappa}{t_a} (e^{-t_a/\kappa} - 1)) \quad (23)$$

A su vez, para poder despejar κ en forma analítica de la expresión (23), es posible aproximar (23) como [26]:

$$E_{din} \approx \frac{P_{max} t_a}{\beta + t_a / \kappa} \quad (24)$$

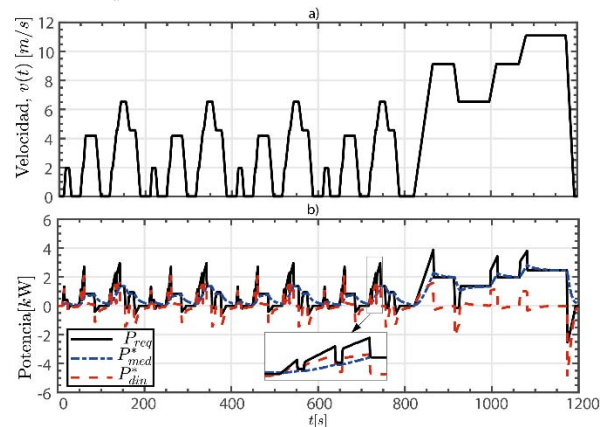


Fig. 5. a) Ciclo de manejo NEDC escalado, y b) Potencia Requerida P_{req} y referencias de potencia dinámica P_{din} y potencia media P_{med} .

En donde la constante $\beta = 19/10$ es ajustada para minimizar el error entre las funciones. De la Fig. 4 se puede observar que la función de aproximación (24) se mantiene siempre por debajo de la función original (23) en un rango de $0 \leq \kappa \leq 120$, y que el error de aproximación es acotado por debajo del 10%. Además, al aproximar la función por defecto para cualquier valor de κ comprendido en el rango mencionado, se asegura que la energía dinámica será igual o mayor al valor deseado. El criterio propuesto para la selección de κ consiste en igualar la energía dinámica, E_{req} , a un determinado porcentaje, q , de la energía total requerida durante el intervalo:

$$\frac{P_{max} t_a}{\beta + t_a / \kappa} = q \frac{P_{max} t_a}{2} \quad (25)$$

donde $0 \leq q \leq 1$. Finalmente, despejando κ se obtiene:

$$\kappa = \frac{t_a}{2/q - \beta} \quad (26)$$

IV. ANÁLISIS Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Para evaluar las dos configuraciones semi-activas de SHAE se realizó un análisis mediante simulación considerando los parámetros y características de un vehículo experimental urbano disponible en el grupo de investigación

GEA - UNRC. El mismo está diseñado para desenvolverse en la ciudad a bajas velocidades con requerimientos de autonomía relativamente bajos. Los parámetros y características del vehículo real se muestran en la Tabla II.

A su vez, se adoptó un ciclo manejo NEDC (*New European Driving Cycle*) inicialmente sin considerar pendientes en el camino y luego evaluando sus efectos para el mismo perfil. Además, el ciclo fue escalado para que el vehículo alcance una velocidad máxima de 40 km/h (13 m/s) respetando los tiempos originales. En la Fig. 5 se muestra dicho ciclo de manejo, considerando pendientes nulas, en conjunto con el requerimiento de potencia instantáneo, P_{req} , que se le solicita al sistema de almacenamiento para un VE. Además se muestran la potencia dinámica, P_{din} , y la potencia media, P_{med} , de referencia para ambas configuraciones. Ambas se obtuvieron a partir del

TABLA II
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

VE	Valor	Convertidor	Valor
C_r	0.02	V_{bus}	42 V
M_v	650 Kg	R_{on}	8 mΩ
α	0 rad	R_L	5 mΩ
ρ	1.225 Kg/m ³	f_s	50 kHz
C_d	0.5	t_r	195 ns
A	0.5 m ²	t_f	190 ns

filtrado de la potencia requerida mediante un filtro pasa-bajos con una frecuencia de corte de $f_c = 0.008\text{Hz}$ dada por una constante de tiempo $\kappa = 20$. En este caso se seleccionó para asegurar que el UC entregue aproximadamente el 50% ($q = 0.50$) durante el tramo de aceleración más exigente, entre $t = 820\text{s}$ y $t = 860\text{s}$ ($t_a = 40\text{s}$), cuyo pico máximo es $P_{max} = 4000\text{W}$.

V-A. Configuración CSA

El banco de baterías se conforma con una tensión nominal de 42V para respetar las características del vehículo existente y una capacidad energética de 200Ah para brindarle al VE una autonomía equivalente a 30 ciclos NEDC escalado (aproximadamente 150 kilómetros de autonomía). Se consideraron las características de la celda de Litio-ion NCR18650B : $V_{b,cel} = 3.6\text{V}$, $q_{b,cel} = 3.2\text{Ah}$ y $R_{b,cel} = 0.05\Omega$. De esta forma se precisan 12 celdas en serie y 62 ramas en paralelo (un total de 744 celdas individuales) con una resistencia serie total de $R_b = 0.01\Omega$. A su vez, de la hoja de datos se pueden obtener los parámetros del modelo dado por (11): $A = 3.9\text{V}$, $B = 0.1572\text{Ah}$ y $K = 0.076\text{Ah}^{-1}$.

Con respecto al UC se considera el dimensionamiento de un banco de 187F a partir de la expresión, con una tensión nominal de 42V y una tensión de trabajo de $42/\sqrt{2} = 30\text{V}$, utilizando 16 celdas comerciales BCAP3000 [28]:

$V_{uc,cel} = 2.7\text{V}$, $C_{uc,cel} = 3000\text{F}$ y $R_{uc,cel} = 0.29\text{m}\Omega$; lo que resulta en una $R_{uc} = 4.64\text{m}\Omega$.

En la Fig. 6 se muestra la corriente requerida por el inversor, dada por la expresión $i_{req} = P_{req} / v_{C_f}$, la corriente de batería i_{bat} , la corriente de UC, i_{uc} , la tensión de batería, v_{bat} , y la tensión de UC, v_{uc} , en las gráficas a) - e) respectivamente. Se observa que el UC entrega una corriente con dinámicas rápidas, principalmente solicitadas durante aceleraciones y frenados del vehículo, ya que cumple con la expresión (19) y satisface el requerimiento de potencia dinámica. A su vez, esto provoca que la batería entregue sólo la diferencia entre la corriente solicitada por el inversor, i_{req} , y la corriente a la salida del convertidor CC/CC, lo que resulta en una corriente con transiciones lentas que satisface la potencia media de la carga. Debe notarse que la corriente que entrega el UC debe circular por el convertidor

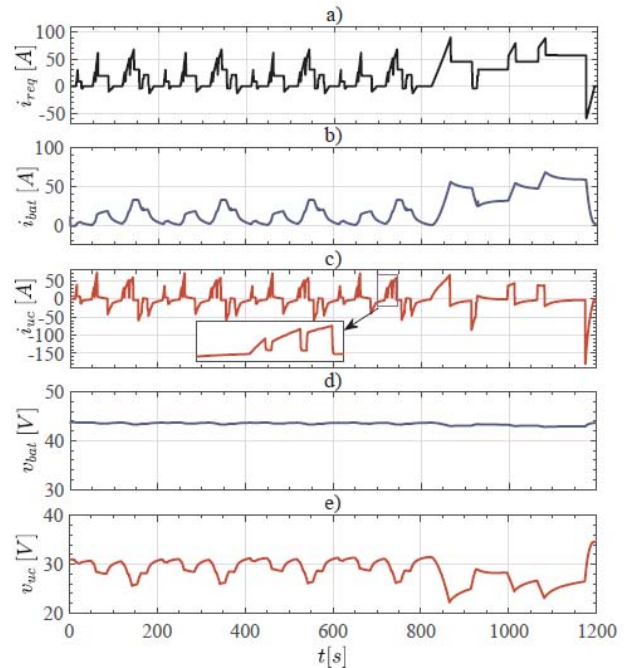


Fig. 6. Resultados para SHAE en configuración CSA.

CC/CC, por lo que el mismo debe ser dimensionado considerando la corriente máxima. En este caso en particular la corriente alcanza un máximo de $i_{uc,max} = -180\text{A}$. Como se observa en la figura, a partir de las formas de las corrientes de los AE, se cumple con los objetivos del SHAE ya que se preserva la vida útil de las baterías y se evita sobredimensionar el banco, al solicitarles corrientes con dinámicas lentas y de amplitud menor que la requerida por la carga. A su vez, se observa en la Fig. 6 d) que la tensión de batería disminuye paulatinamente a medida que el vehículo avanza en el trayecto debido a su estado de carga, pero la misma no presenta grandes variaciones o caídas de tensión. Esto se debe a que el UC entrega los picos de potencia durante la aceleración y absorbe aquellos en el frenado, lo que otorga cierta estabilidad al bus de CC ante los requerimientos de carga. También en la Fig. 6 e) se observa que el UC presenta una gran variación de

tensión, pero no representa un inconveniente para el sistema de tracción debido a que está desacoplado del bus de CC. Sin embargo, si el UC no se dimensiona de forma correcta, puede trabajar fuera de su rango nominal de tensión, exigiendo picos excesivos de corriente (para el caso de una tensión mínima) o puede ser cargado por encima de su tensión máxima provocando la actuación de protecciones del sistema de tracción y almacenamiento.

V-B. Configuración BSA

En esta configuración, para mantener la tensión del bus de CC en 42 V se dimensiona el UC preservando el mismo nivel energético que en el caso anterior. Para esto se utilizan 23 celdas de UC de 2.7 V nominales, 2000 F y $R_{uc,cel} = 0.35 m\Omega$ en serie, lo que resulta en un módulo de 62 V nominales y una tensión de trabajo de 43V, $C_{uc} = 87F$ y una $R_{uc} = 7.5 m\Omega$. Con respecto al banco de baterías, para lograr una tensión de 30 V se precisan 9 celdas en serie, y 82 ramas en paralelo para

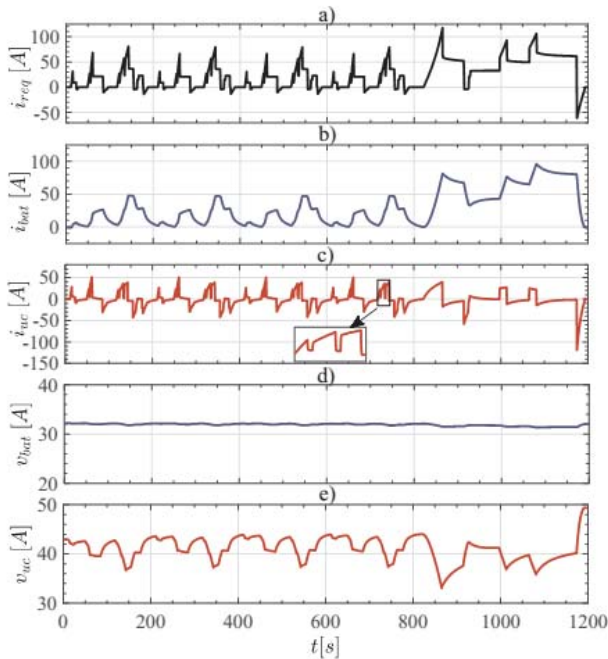


Fig. 7. Resultados para SHAE en configuración BSA.

mantener el mismo nivel energético que en el caso CSA. Finalmente el banco de baterías se conforma por un total de 738 celdas unitarias del mismo tipo que las usadas para el caso CSA, resultando en un banco de 30 V nominal, 262 Ah y una $R_b = 7.7 m\Omega$. En la Fig. 7 se muestran resultados de simulación para esta configuración de la corriente requerida por el inversor, i_{req} , la corriente de batería, i_{bat} , la corriente de UC, i_{uc} , la tensión de batería, v_{bat} , y la tensión de UC, v_{uc} en las gráficas a) - e) respectivamente. Se observa que la corriente de batería presenta dinámicas lentas ya que satisface el requerimiento de potencia media según la expresión (18). Además el UC entrega una corriente con variaciones rápidas, dada por la diferencia entre la corriente de la carga, i_{req} , y la corriente a la salida del

convertidor CC/CC, satisfaciendo la potencia dinámica requerida por la carga. Sin embargo, la corriente de batería posee magnitudes más elevadas con respecto al caso de la configuración CSA debido a que su tensión de trabajo es menor en esta configuración y el requerimiento de potencia media es el mismo. El convertidor CC/CC que controla el flujo de energía de la batería debe dimensionarse para soportar esta corriente. Esta corriente generalmente es menor en amplitud con respecto a la del caso CSA, pero de mayor valor RMS.

Por otro lado, a lo largo del recorrido se observa una amplia variación de tensión en bornes del módulo del UC, conectado directamente en el bus de CC en paralelo al inversor. Esto puede generar inestabilidades en el control del motor de tracción y en el bus de CC, debido al comportamiento de impedancia negativa que presenta el conjunto inversor y motor, provocando también la actuación de protecciones del sistema. Además, la corriente de carga dada por $i_{req} = P_{req} / v_{uc}$ llega a niveles superiores al caso CSA debido a que la variación de tensión del UC provoca que el nivel de tensión del bus de CC sea menor en

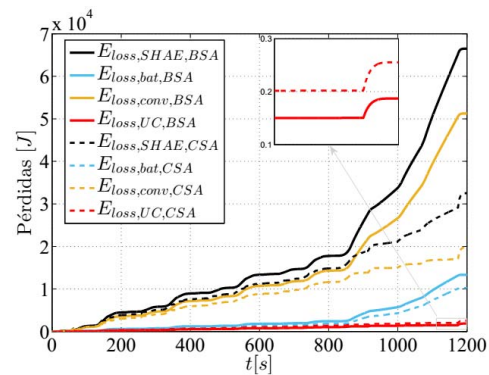


Fig. 8. Pérdidas de ambas configuraciones de SHAE.

esta configuración. Para evitar estos inconvenientes el banco de UC debe ser re-dimensionado en función de la variación de tensión máxima especificada sobre el bus de CC, lo que resulta en un sobredimensionamiento respecto a la expresión (7).

V-C. Comparación de Pérdidas

Para realizar una comparación de pérdidas de las dos configuraciones de SHAE se calculó la energía de las mismas integrando la expresión (10):

$$\begin{aligned}
 E_{loss,SHAE} &= \int P_{loss,SHAE} dt \\
 &= \underbrace{\int P_{loss,uc} dt}_{E_{loss,uc}} + \underbrace{\int P_{loss,bat} dt}_{E_{loss,bat}} + \underbrace{\int P_{loss,conv} dt}_{E_{loss,conv}}
 \end{aligned} \quad (27)$$

En la Fig. 8 se muestra la evolución de la energía de pérdidas totales y de cada elemento por separado para ambas configuraciones de SHAE a lo largo del ciclo de manejo del vehículo. Se observa que la configuración BSA presenta una mayor cantidad de pérdidas totales al final del ciclo (aproximadamente dos veces mayor). Esto se debe a que la mayor porción de pérdidas de la configuración BSA están dadas por el convertidor de CC/CC que debe conducir la corriente necesaria para satisfacer la potencia media o de

régimen de la carga, y si bien sus magnitudes son menores con respecto a la configuración CSA, el valor RMS de esta corriente es mayor e influye en gran medida en las pérdidas totales acumuladas.

Además, las pérdidas en el banco de baterías también son mayores para el caso BSA debido a su resistencia interna elevada. Las pérdidas en el banco de UC son mayores en la configuración CSA con respecto a la de BSA, por el hecho de que la corriente entregada por el UC es mayor, sin embargo, al ser un elemento con una baja resistencia serie las pérdidas que aporta al sistema no son considerables.

V-D. Análisis considerando un camino con pendientes

Para simplificar el análisis, en la sección anterior se consideró que el camino no presenta pendientes o desniveles a lo largo del recorrido. Si se considera un trayecto con pendientes, la fuerza de tracción necesaria, según (1), que deben aplicar los motores de tracción se verá alterada debido a la fuerza componente del peso del vehículo, f_{rg} , que en este caso no es nula. En la Fig. 9 a) se muestra el ciclo de manejo NEDC escalado a lo largo de 600 segundos de recorrido conjuntamente con la pendiente del camino $\alpha(t)$. Para el análisis, se divide el

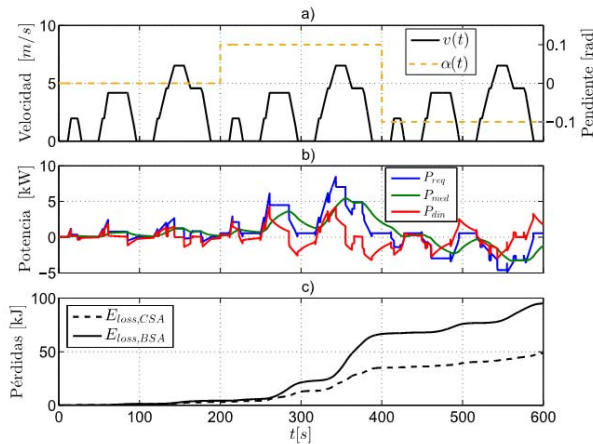


Fig. 9. Ciclo de manejo NEDC escalado ($v(t)$) y pendiente del camino ($\alpha(t)$), b) requerimientos de potencia del VE y c) pérdidas de ambas configuraciones de SHAE.

recorrido en tres partes iguales con diferentes pendientes: se considera una pendiente nula ($\alpha=0\text{rad}$) desde $t=0\text{s}$ a $t=200\text{s}$, luego se mantiene en $\alpha=0.1\text{rad}$ hasta $t=400\text{s}$ y finalmente se cambia a una pendiente negativa $\alpha=-0.1\text{rad}$ para mostrar el efecto durante el descenso con frenado regenerativo. En la Fig. b) se muestra el requerimiento de potencia del sistema de tracción al SHAE en ambas configuraciones considerando el camino con estas pendientes. Además, se consideró la potencia necesaria para mantener el vehículo detenido en un camino con pendiente teniendo en cuenta el torque electromagnético de un motor de inducción estándar de 4 HP.

Se observa que el requerimiento de potencia será mayor cuando la pendiente es positiva ya que la fuerza de tracción debe ser mayor para mover el vehículo debido a la aparición

de la componente f_{rg} . Esto impacta directamente en los niveles de tensión y corriente en el SHAE y debe tenerse en cuenta para dimensionar correctamente los elementos almacenadores, considerando siempre el peor caso de pendiente. En la Fig. 9 c) finalmente se muestran la evolución de la energía de pérdidas totales para cada configuración. Se observa que la configuración BSA continúa presentando una mayor cantidad de pérdidas con respecto a la configuración CSA, para todas las condiciones de pendiente impuestas en el camino.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un análisis comparativo de las configuraciones batería semi-activa y capacitor semi-activo de SHAEs para VEs. En primer lugar, se presentó un análisis de dimensionamiento del banco de baterías y UC, para ambas configuraciones según los requerimientos del vehículo, y se detallaron las pérdidas de cada elemento que compone el SHAE. Se propuso además un método para seleccionar la frecuencia de corte del filtro pasabajos utilizado para la separación de potencias, con el objetivo de aprovechar la energía del UC dimensionada

Posteriormente, se realizó un análisis de simulación de ambas configuraciones considerando los parámetros de un vehículo experimental pequeño que realiza un ciclo de manejo del tipo

TABLA III
CONCLUSIONES

Parámetros a Evaluar	CSA	BSA
Pérdidas en Batería, $E_{loss,bat}$	10 kJ	14 kJ
Pérdidas en UC, $E_{loss,uc}$	2.5 kJ	1.9 kJ
Pérdidas en Conv. CC/CC, $E_{loss,conv}$	20 kJ	51 kJ
Pérdidas Totales, $E_{loss,SHAE}$	32 kJ	67 kJ
ΔV_{MAX} BUS CC	2 V	15 V
I_{MAX} Convertidor CC/CC	-180 A	100 a
Celdas de Batería	744	738
Celdas de UC	17	23

NEDC escalado en amplitud y en un camino sin pendientes. En la Tabla III se resumen los resultados más importantes obtenidos en este trabajo. Las pérdidas totales a lo largo del ciclo de manejo fueron mayores para la configuración BSA (más del doble que para el caso CSA), debido principalmente a una mayor cantidad de pérdidas en el convertidor CC/CC y en el banco de baterías. El banco de UC presentó una mayor cantidad de pérdidas para el caso CSA pero no influye de manera significativa en las pérdidas totales debido a la alta eficiencia del UC.

Además, se observó que la configuración CSA presentó una menor variación de tensión, ΔV_{max} , en el bus de CC (2 V frente

a 15 V para el caso BSA) lo que le confiere una mayor estabilidad frente a cargas que presentan comportamiento de impedancia negativa como es el conjunto inversor y motor del sistema de tracción. Como desventaja para la configuración CSA se debe mencionar que el convertidor CC/CC debe ser dimensionado para una corriente mayor que para el caso BSA (en este caso casi dos veces mayor).

Extendiendo el análisis para un camino con pendientes, se observó que la potencia requerida resulta mayor con respecto a un camino sin pendientes, por lo que debe tenerse en cuenta

para el dimensionamiento de los almacenadores. Sin embargo, las conclusiones de eficiencia se mantienen para cada configuración independientemente del ángulo de pendiente del camino.

Se concluye que la configuración en CSA es más conveniente en aplicaciones vehiculares donde se presentan altos índices de aceleraciones y frenado regenerativo debido su menor nivel de pérdidas respecto a la configuración en BSA y mayor estabilidad con respecto a la tensión del bus de CC.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con el apoyo de la UNRC, la ANPCyT, (Subsidio PICT 2014-2760) y el CONICET (subsidio PIP 2014-2016 GI 11220130100517CO).

REFERENCIAS

- [1] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, and A. Emadi, "Energy storage systems for automotive applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 6, pp. 2258–2267, 2008.
- [2] Y. Zhang, C. Y. Wang, and X. Tang, "Cycling degradation of an automotive LiFePO₄ lithium-ion battery," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 3, pp. 1513–1520, 2011.
- [3] M. Einhorn, F. V. Conte, C. Kral, and J. Fleig, "Comparison, selection, and parameterization of electrical battery models for automotive applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 3, pp. 1429–1437, 2013.
- [4] M. Aneke and M. Wang, "Energy storage technologies and real life applications - A state of the art review," *Applied Energy*, vol. 179, pp. 350–377, 2016.
- [5] X. Wang, D. Yu, S. Le, Z. Zhao, and P. Wilson, "A novel controller of a battery-supercapacitor hybrid energy storage system for domestic applications," *Energy & Buildings*, vol. 141, pp. 167–174, 2017.
- [6] A. Khaligh and Z. Li, "Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, 2010.
- [7] R. A. Dougal, S. Liu, and R. E. White, "Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 25, no. 1, pp. 120–131, 2002.
- [8] E. Chemali, M. Preindl, P. Malysz, and A. Emadi, "Electrochemical and Electrostatic Energy Storage and Management Systems for Electric Drive Vehicles: State-of-the-Art Review and Future Trends," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 3, pp. 1117–1134, 2016.
- [9] A. Florescu, S. Bacha, I. Munteanu, A. I. Bratcu, and A. Rumeau, "Adaptive frequency-separation-based energy management system for electric vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 280, pp. 410–421, 2015.
- [10] J. Armenta, C. Núñez, N. Visairo, and I. Lázaro, "An advanced energy management system for controlling the ultracapacitor discharge and improving the electric vehicle range," *Journal of Power Sources*, vol. 284, pp. 452–458, 2015.
- [11] Z. Cabrane, M. Ouassaid, and M. Maaroufi, "Analysis and evaluation of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for photovoltaic installation," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 45, pp. 20 897–20 907, 2016.
- [12] R. E. Araújo, R. De Castro, C. Pinto, P. Melo, and D. Freitas, "Combined sizing and energy management in EVs with batteries and supercapacitors," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 7, pp. 3062–3076, 2014.
- [13] A. Kuperman and I. Aharon, "Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 2, pp. 981–992, feb 2011.
- [14] J. Cao and A. Emadi, "A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 1, pp. 122–132, 2012.
- [15] Z. Song, H. Hofmann, J. Li, X. Han, X. Zhang, and M. Ouyang, "A comparison study of different semi-active hybrid energy storage system topologies for electric vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 274, pp. 400–411, 2015.
- [16] C. Zhao, H. Yin, and C. Ma, "Quantitative efficiency and temperature analysis of battery-ultracapacitor hybrid energy storage systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1791–1802, 2016.
- [17] I. Aharon and A. Kuperman, "Topological Overview of Powertrains for Battery-Powered Vehicles With Range Extenders," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 868–876, mar 2011.
- [18] Z. Song, J. Li, X. Han, L. Xu, L. Lu, M. Ouyang, and H. Hofmann, "Multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles," *Applied Energy*, vol. 135, pp. 212–224, 2014.
- [19] M. Asensio, G. Magallán, and C. De Angelo, "Experimental evaluation of different semi-active configurations for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system (HESS)," 2015 16th Workshop on Information Processing and Control, RPIC 2015, 2016.
- [20] A. Emadi, A. Khaligh, C. H. Rivetta, and G. A. Williamson, "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: Definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 4, pp. 1112–1125, 2006.
- [21] A. Rahimi and A. Emadi, "An Analytical Investigation of DC/DC Power Electronic Converters With Constant Power Loads in Vehicular Power Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 6, pp. 2689–2702, 2009.
- [22] O. Tremblay, L. Dessaint, and A. Dekkiche, "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles," in 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, no. V. IEEE, sep 2007, pp. 284–289.
- [23] O. Tremblay and L. Dessaint, "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications," *World Electric Vehicle Journal Vol.*, vol. 3, pp. 289–298, 2009.
- [24] J. Shen and A. Khaligh, "A Supervisory Energy Management Control Strategy in a Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 3, pp. 223–231, 2015.
- [25] B. Hredzak, V. G. Agelidis, and G. D. Demetriades, "A low complexity control system for a hybrid DC power source based on ultracapacitor-lead-acid battery configuration," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 6, pp. 2882–2891, 2014.
- [26] M. Alioto, G. Palumbo, and M. Poli, "Evaluation of energy consumption in RC ladder circuits driven by a ramp input," in *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 12, no. 10, 2004, pp. 1094–1107.



Maximiliano Asensio (S'13) Nació en General Alvear, Provincia de Mendoza, Argentina. En el año 2012 recibió el título de Ingeniero Electrónico de la Universidad Nacional de San Luis (UNSL). Actualmente, posee una beca doctoral del CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina) para realizar el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC). Es miembro del GEA desde Abril del 2013 y del Laboratorio de Control Automático (LCA, UNSL) desde el año 2009. Sus temas de interés son: Electrónica de Potencia, Sistemas de Control, Vehículos Eléctricos Puros e Híbridos y Fuentes de Energía Renovables.



Guillermo A. Magallán (S'08, M'10) Nació en Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina. Recibió el título de Ingeniero en Electrónica (2002) en la Universidad Tecnológica Nacional de

Paraná (UTN Regional Paraná). Recibió los títulos de Magister y Doctor en Ciencias de la Ingeniería en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto en 2009 y 2010, respectivamente. Actualmente es Profesor Adjunto en la Universidad Nacional de Río Cuarto y es Investigador Asistente del CONICET. Desde 2005 es miembro del GEA. Sus temas de interés en investigación son: Control de tracción en vehículos eléctricos e híbridos, Sistemas híbridos de almacenamiento de energía, procesamiento digital de señales, implementación de control en tiempo real.



E. Gastón Amaya (S'14) Nació en Villa Mercedes, Provincia de San Luis, Argentina. En el año 2014 recibió el título de Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional de San Luis (UNSL). Actualmente, posee una beca doctoral del CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina) para realizar el

Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC). Es miembro del GEA desde Abril del 2014 y miembro del Laboratorio de Control Automático (LCA, UNSL) desde el año 2010. Sus temas de interés son: Gerenciamiento de Energía en Vehículos Eléctricos, Estrategias de Manejo de Energía, Vehículos Eléctricos Puros e Híbridos, Sistemas de Generación Distribuida.



Cristian H. De Angelo (S'96 - M'05 - SM'10) recibió su título de Ingeniero Electricista en la Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina, en 1999, y el grado de Dr. en Ingeniería en la Universidad Nacional de La Plata, Argentina, en 2004. Desde 1994, se encuentra trabajando en el Grupo de Electrónica Aplicada, Facultad de

Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto. Actualmente es Profesor Adjunto en la Universidad Nacional de Río Cuarto e Investigador Independiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina. Sus temas de interés en investigación incluyen diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas, accionamientos eléctricos, vehículos eléctricos, y energías renovables.