

Dimensionamiento y Modelado de un Vehículo Eléctrico Propulsado por Pilas de Combustible. Análisis Económico y de Factibilidad

Gabriel Correa Perelmuter¹, Ladislao Mathé², Emanuel Moschen², Pedro Muñoz²

¹CONICET -UNCa, Maipú 662, 4700, San Fernando del Valle de Catamarca, Argentina.

²Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – U.N.C., Av. Vélez Sarsfield 1611, 5000, Córdoba, Argentina.

Fecha de recepción del manuscrito: 26/12/2013

Fecha de aceptación del manuscrito: 14/02/2014

Fecha de publicación: 28/03/2014

Resumen—El presente trabajo aborda el diseño, el dimensionamiento y la simulación de un auto eléctrico propulsado por pilas de combustible a hidrógeno y baterías de ion-litio. Para ello se seleccionaron recorridos representativos del tránsito vehicular dentro de la ciudad de Córdoba y se recolectaron los datos a través de un GPS (velocidad, tiempo y altitud) para confeccionar ciclos de manejo y sus respectivos perfiles de elevación. El modelado matemático y simulación de los sistemas integrados se realizó en entorno MatLab/Simulink, tomando en cuenta las ecuaciones que gobiernan los distintos fenómenos físicos. Además se realizó la simulación de los sistemas según los ciclos de manejo y se obtuvo el comportamiento dinámico de los mismos. Finalmente se estudiaron los resultados obtenidos de la simulación, se elaboraron comparaciones entre éste sistema y el convencional de combustión interna y se calculó el hidrógeno necesario para el parque automotor de la ciudad de Córdoba.

Palabras clave — auto eléctrico, pilas de combustible, baterías, modelado, simulación.

Abstract—This paper addresses the design, sizing and simulation of an electric car powered by fuel cells and li-ion batteries. This was achieved by selecting representative traffic routes within the city of Córdoba and gathering the data with a GPS (speed, time and altitude) to make the driving cycles, with their respective elevation profiles. The mathematical modeling and numerical simulation of the systems was carried out in MATLAB/Simulink environment, taking into account the governing equations involved in the different physical phenomena. The Dynamic responses of the systems were obtained running the Simulink model using the different driving cycles as inputs. Finally, the simulations results were analyzed, the internal combustion vehicle was compared with the proposed system analyzing benefits and drawbacks, and the amount of hydrogen necessary for the fleet of the city of Cordoba was calculated.

Keywords — electric vehicle, fuel cell, battery, modeling, simulation.

INTRODUCCIÓN

La acumulación de personas en grandes urbes intensifica la necesidad de movilizarse, provocando que las distancias recorridas sean cada vez mayores y hace del transporte una necesidad básica. Esto conlleva un crecimiento de la demanda de energía por parte del sector de transporte. Actualmente casi un tercio de la energía total producida en Argentina por diferentes fuentes está destinada a este fin, y esta demanda es cubierta en un 94% por combustibles fósiles (Secretaría de Energía, 2013). En vista de que este recurso es limitado y favorece la contaminación ambiental, es necesario buscar alternativas más eficientes, sustentables y limpias.

Hasta el momento se han desarrollado varios modelos dedicados al estudio de la dinámica de las pilas de combustible y los vehículos eléctricos (Adcock, et al., 2008) (Cunningham, et al., 1999) (Gao, et al., 2010) (Genta,

2006) (Guzzella, 1999) (Miotti, et al., 2005). Los resultados mejoran la comprensión de los fenómenos, pero son difíciles de ensamblar con otros modelos que garanticen una buena y rápida simulación de comportamiento de los sistemas. El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de un modelo dinámico de Vehículo eléctrico de pilas de combustible con su respectivo tren de potencias con el fin de lograr un óptimo dimensionamiento del mismo acorde a las necesidades de la ciudad de Córdoba. Para ello se utilizó un modelo de pila de combustible ya validado (Correa, et al., 2011) y se desarrollaron modelos de simulación numérica del vehículo, del motor y de la batería de ión-litio. Con estas simulaciones se logró obtener datos relativos a consumos y comportamiento característicos. Para las simulaciones y dimensionamiento se emplearon recorridos típicos dentro de la ciudad de Córdoba con los perfiles de alturas correspondientes.

La operación de las Baterías de ión-litio y las pilas de combustible PEM implica algunos fenómenos multifísicos complejos, incluyendo reacciones electroquímicas, difusiones de gas y las generaciones de calor (Gao, et al., 2010) (Yoon & Huang, 2010) (Boulon, et al., 2012). Debido a la complejidad de los fenómenos físicos en ellos,

Dirección de contacto:

Gabriel Correa Perelmuter, Dr. Luis Novillo Martínez 1250 CP 5016, Córdoba. Tel: 0351-153337718, gabrielcorrea.cba@gmail.com

así como la falta de información sobre los materiales utilizados, y con el fin de obtener un modelo de menor esfuerzo computacional, que conserve el significado físico de cada elemento, se realizó el mismo con parámetros concentrados con tratamiento unidimensional. El modelo de elementos concentrados simplifica la descripción del comportamiento de los sistemas físicos distribuidos espacialmente en una topología que consiste en entidades discretas que se aproximan al comportamiento del sistema distribuido bajo ciertos supuestos.

Los modelos dinámicos son herramientas poderosas, que, sobre la base de varios perfiles de ciclos de manejo y condiciones de contorno, hacen que sea posible llevar a cabo simulaciones de todo el ciclo, analizar el rendimiento del sistema de pila de combustible y baterías, y prever posibles problemas antes de que se lleven a cabo las pruebas de campo. En particular, después de una debida validación a través de sistemas reales, estos pueden representar una herramienta potente para proyectos futuros, así como para el diseño y desarrollo de componentes de sistemas con el fin de mejorar la configuración para su uso específico. Además, podrían ser de ayuda en el diseño de los componentes de pila y el balance de planta de la misma, por ejemplo, sistemas de humidificación, el circuito de refrigeración, así como la lógica de control de la temperatura y la interfaz eléctrica.

SELECCIÓN DE VEHÍCULO Y COMPONENTES (TREN DE POTENCIA)

La selección de la carrocería base con la cual trabajar se ha realizado en función de un aspecto fundamental: el vehículo debería ser de producción local. Las empresas que fabrican autos de manera completa en la ciudad de Córdoba son Fiat y Renault, actualmente con los modelos Palio y Siena por la primera y Clio, Symbol, Fluence y Kangoo por la segunda. Se optó por la elección de un auto pequeño y compacto, ya que incurre en menor gasto energético, son más económicos y son los más aceptados por el público en general.

Debido a las características tales como peso y precio se decidió trabajar con el Renault ClioMio 3 puertas.

Tren de potencia

La principal fuente de energía es el hidrógeno almacenado en un recipiente a presión (350 bar), el cual se transforma en electricidad en la pila de combustible (FC Stack), con el auxilio de una batería de ion-litio para los momentos en que ésta no llega a generar la potencia requerida, lo cual puede deberse a retrasos en la respuesta de la pila, picos de potencia o simplemente porque supera la capacidad de la misma.

Esta electricidad se transforma en movimiento en un motor eléctrico y a través de un diferencial se transmite el torque a las ruedas delanteras. Aunque en este trabajo no se lo considera, el motor brushless elegido para la impulsión del vehículo tiene la capacidad de funcionar como freno regenerativo absorbiendo energía mecánica y transformándola en energía eléctrica para almacenar en las baterías. El sistema de control del vehículo toma la orden del conductor y gestiona el flujo de energía necesaria para cumplir con lo requerido habilitando el paso de electricidad desde el FC Stack o, si la potencia no es suficiente, desde la

Batería a través de los convertidores DC/DC y alimentando el motor con el Inversor DC/AC. Cada subsistema, a su vez, tiene su propio sistema de control y dispositivos auxiliares necesarios para su correcto funcionamiento.

En la Fig. 1 se puede ver un diagrama con tren de potencia adoptado.

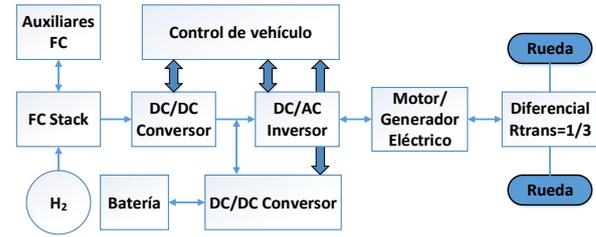


Fig. 1: Tren de potencia adoptado.

Como la mayoría del tiempo la pila de combustible funciona a potencias menores de 20 kW (ver sección SIMULACIÓN COMPUTACIONAL) y tendríamos un sistema completamente sobredimensionado, se seleccionó una pila de combustible que entregue la mayoría de la energía requerida (según nuestro criterio entre el 80 y el 90 %) y una batería que tenga una capacidad de potencia suficiente para abastecer al sistema en los momentos picos o cuando la pila no alcance la potencia requerida, además de poder almacenar energía residual de las pilas o proveniente del freno regenerativo. Por lo tanto se decidió utilizar una pila de combustible de 15 kW con un tanque de H2 de 1,79 kg complementada con una batería de 30 Ah capaz de drenar una potencia pico de al menos 60 kW.

MODELO DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN

Modelo de las fuerzas en el auto y potencia eléctrica requerida

Para computar la energía necesaria para la automoción se consideraron los efectos de rodadura de la rueda, de fuerza gravitatoria en una pendiente y de resistencia aerodinámica (Gao, et al., 2010). Estos efectos se modelan como fuerzas aplicadas al automóvil, las cuales deben ser vencidas por el torque aplicado a la rueda.

Los efectos de rodadura se calculan como se indica en la ecuación(1). Donde f_r es el factor de resistencia a la rodadura y se puede obtener con la ecuación(2), tomando $f_0 = 0,013$ y $K = 6,51 \cdot 10^{-6} [s^2/m^2]$ (Genta, 2006).

$$F_r = M \cdot f_r \cdot \cos(\alpha) \quad (1)$$

$$f_r = f_0 + K \cdot V^2 \quad (2)$$

La ecuación (3) considera la sumatoria de fuerzas teniendo en cuenta el torque producido por la rueda y el radio deformado de la misma.

$$\begin{aligned} M \cdot a &= M \cdot \frac{dV}{dt} = T_r / r_d - F_r - F_a - F_g \rightarrow \\ &\rightarrow T_r / r_d = M \cdot \frac{dV}{dt} + F_r + F_a + F_g \end{aligned} \quad (3)$$

La rueda se acopla al motor a través de un diferencial con una relación de reducción $i = \omega_r / \omega_m = 1/3$. La pila de combustible y la batería se conectan al motor a través de un convertor DC/DC primero y un inversor DC/AC luego.

Para conocer la potencia necesaria se deben tener en cuenta los rendimientos de los diversos componentes que integran el sistema. Para los componentes electrónicos se consideró un rendimiento 0,95 para cada componente, $\eta_{elec}=0,95.0,95$, de acuerdo con la literatura; el rendimiento del diferencial se consideró como $\eta_{mec}=0,85$ (Heißing & Ersoy, 2011). Para definir el rendimiento del motor (η_{mot}) se utilizaron las especificaciones del fabricante y se construyó un mapeo del rendimiento en función de la potencia requerida en el motor y las revoluciones del mismo.

$$T_m = T_r \cdot i / \eta_{mec} \rightarrow P_m = T_m \cdot \omega_m \rightarrow P_e = \frac{P_m}{(\eta_{elec} \cdot \eta_{mot})} \quad (4)$$

Finalmente

$$P_e = \frac{\left(\frac{dV}{dt} + (f_0 + K \cdot V^2) \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2} C_D \cdot \rho \cdot V^2 + g \cdot \sin(\alpha) \right) \cdot M \cdot V}{(\eta_{elec} \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{mec})} \quad (5)$$

Modelo de Batería

Se ha optado por el empleo de un Stack de baterías Li-Po. El modelo desarrollado está basado en resultados experimentales sobre una batería nueva no teniendo en cuenta el envejecimiento de la misma, factor que influye de manera inversa en la cantidad de energía que se puede almacenar.

Las variables de entrada son la temperatura ambiente y la potencia requerida; y las salidas son la potencia entregada y el calor cedido a la atmósfera.

La batería puede simplificarse a un simple acumulador de carga que entrega una tensión variable (E) con una cierta resistencia interna ($R_{sy} R_{ts}$) y una característica de respuesta transitoria (representada por C_{ts}) (Huria, et al., 2012).

$$V_{(s)} = E_{(s)} - I_{R_{ts}(s)} \left(R_s + \frac{R_{ts}}{R_{ts} C_{ts} s + 1} \right) \quad (6)$$

Estado de descarga (SOD)

$$SOD(I_{(t)}, t) = SOD_{inicial} + \frac{1}{Cap_{bat}} \int_0^t I_{(t)} dt \quad (7)$$

$$E(I_{(t)}, T_{(t)}, SOD(I_{(t)}, t), t) = f_1(SOD(I_{(t)}, t), I_{(t)}) + f_2(SOD(I_{(t)}, t), T_{(t)}) \quad (8)$$

Donde, $I(t)$ es la corriente de descarga de la batería, Cap_{bat} es la capacidad máxima de la batería, $SOD_{inicial}$ es el estado de descarga en el que quedó la batería del estado anterior y f_1 y f_2 son funciones empíricas de descarga de una batería determinada.

Características de descarga

Este modelo está basado en resultados experimentales de los fabricantes de baterías, de modo que haciendo uso de las características de descarga se determina la tensión a bornes de la batería para cada instante.

El fabricante provee, entre otros datos, las curvas de descarga $E=f(SOD)$ para distintas tasas de descarga y las de $E=f(SOD)$ para distintos valores de temperatura.

En primer lugar, se obtuvo la función $f_1(SOD(I_{(t)}, t), I_{(t)})$, la cual determina la tensión para cada par de valores [SOD, I] (Fig. 2); esta función tiene implícita la curva de

polarización de la batería $E=f(I_{(t)})$. Esta función f_1 , se cumple solamente para cuando la temperatura de la batería es de 25 °C, por lo que se debió adicionar la función $f_2(SOD(I_{(t)}, t), T_{(t)})$, que tenga en cuenta los cambios de temperatura. Esta función f_2 , para cada par de valores [SOD, T] (Fig. 3), entrega la corrección de tensión por temperatura ΔE (González & Acevedo, 2010).

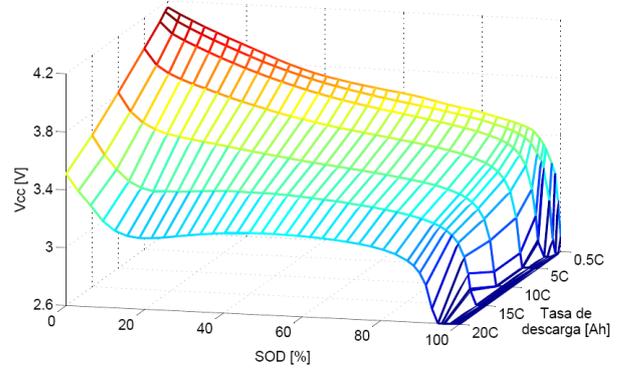


Fig. 2: Característica de descarga a 25 °C.

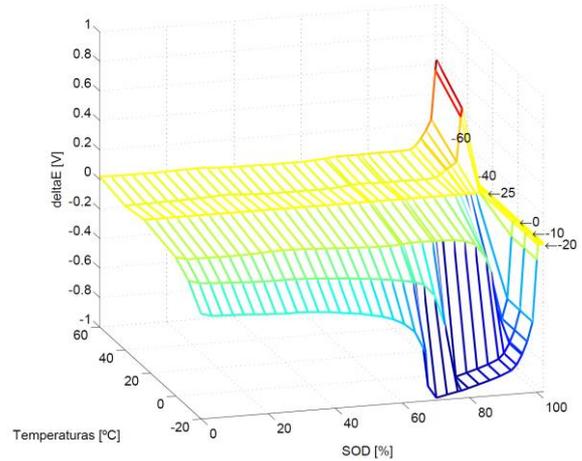


Fig. 3: delta E en función de la Temperatura y el SOD a 1 C.

Modelo térmico

Como la tensión de vacío depende de la temperatura interna de la batería, esta debe ser calculada dinámicamente durante la simulación. El cambio de temperatura de la batería está gobernado por el balance de energía que se describe a continuación:

$$m_{bat} \cdot C_p \frac{dT_{(t)}}{dt} = I_{s_{(t)}}^2 \cdot R_s + I_{ts_{(t)}}^2 \cdot R_{ts} - h_c \cdot A (T_{(t)} - T_{amb}) \quad (9)$$

Donde, m_{bat} es la masa total de la batería, C_p es la capacidad calorífica, $I_s^2 \cdot R_s$ es el calor generado por la resistencia R_s , $I_{ts} \cdot R_{ts}$ es el calor generado por la resistencia R_{ts} , h_c coeficiente de transferencia de calor y A es el área de transferencia de calor.

Validación del modelo

La validación del modelo se realizó con los resultados relevados en uno de los vuelos del proyecto ENFICA (Romeo, et al., 2012). Como valor de entrada, el modelo utiliza la potencia requerida por el avión y da como respuesta un valor de potencia, corriente, voltaje,

temperatura y SOD los cuales fueron comparados con los valores que se midieron durante el vuelo.

Con el objetivo de obtener una respuesta lo más cercana posible a la que el sistema real tendría en condiciones similares, se realizó un proceso de optimización de parámetros del modelo. El modelo contiene cinco parámetros de valor desconocido: el calor específico equivalente del Stack C_p , el coeficiente de transferencia de calor h_c , las resistencias internas de la batería R_s y R_{ts} y el capacitor del circuito interno de la batería C_{ts} .

Como primera aproximación se tomaron valores de literatura.

Debido a que se dispone de datos experimentales del proyecto ENFICA (Romeo, et al., 2012) se utilizó el mismo tipo de baterías (56 celdas KOKAM de 30 Ah de alta capacidad) para realizar la optimización de parámetros. En primer lugar se aplicó un factor de corrección de la tensión para obtener, con la batería completamente cargada, el mismo valor que en el vuelo. Esta discrepancia es atribuida al efecto de envejecimiento de la batería que no se tiene en cuenta en el modelo desarrollado. Luego, utilizando la función `fminsearch()` disponible en la librería de Matlab, se optimizaron los parámetros tomados de literatura minimizando el error en la tensión y la temperatura.

Obteniéndose los siguientes valores:

TABLA 1: CONSTANTES DE LA BATERÍA

Parámetro	Literatura	Optimizado
R_s	0,0425	0,0104
R_{ts}	0,0155	0,0231
C_{ts}	100	10000
C_p	1062	177,2418
h_c	10	2,3395

Los resultados se pueden ver en las Fig. 4 y Fig. 5:

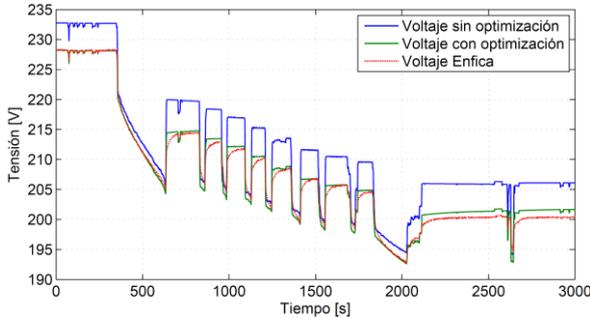


Fig. 4: Comparación Tensiones Modelo – ENFICA.

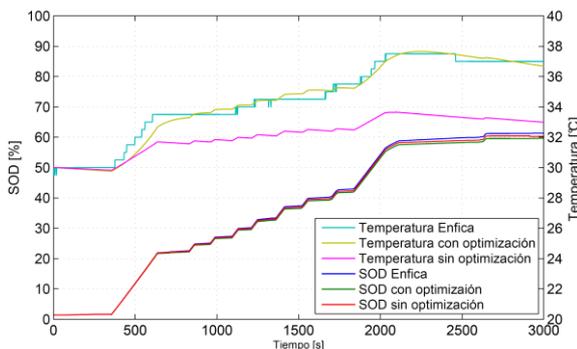


Fig. 5: Comparación SODs y Temperaturas Modelo – ENFICA. Resultado optimización

Como se puede ver, la optimización de los parámetros mejoró sustancialmente el comportamiento eléctrico y térmico del modelo (ver Tabla 2), y se puede decir que es capaz de predecir el comportamiento del sistema con un error relativamente bajo.

$$e[\%] = \frac{100\%}{n} \sum_1^n \frac{\text{ValorModelo}_n - \text{ValorENFICA}_n}{\text{ValorENFICA}_n} \quad (10)$$

TABLA 2: ERRORES EN LOS PARÁMETROS DE LA BATERÍA

Parámetro	INICIAL	OPTIMIZADO
Tensión	2,27 %	0,46 %
SOD	3,01 %	2,05 %
Temperatura	7,93 %	1,10 %

Modelo de la Celda de Combustible

El modelo de celda de combustible fue extraído del trabajo de (Correa, et al., 2011). Dicho modelo se implementó para una pila y los sistemas de las instalaciones auxiliares (BoP) que son capaces de caracterizar los fenómenos transitorios, incorporando simultáneamente tres importantes aspectos dinámicos: los cambios de temperatura en la pila de combustible, los cambios de flujo en los canales, y la respuesta dinámica en términos del efecto capacitivo de las capas dobles de carga en los electrodos de la pila PEMFC. Este modelo describe los efectos térmicos y fluido-dinámicos de los componentes de BoP, así como el comportamiento electroquímico de la pila de combustible.

Modelo del motor

El modelado del motor se realizó con el objetivo de conocer la respuesta temporal del mismo, como también la corriente y la tensión que demanda frente a los requerimientos de torque y revoluciones establecidos por los ciclos de manejo.

Los motores brushless tienen el mismo principio de funcionamiento que los de corriente continua, la diferencia radica en la manera en que se produce la conmutación. Desde el punto de vista del modelado, y para los fines de este trabajo, se puede considerar que no hay diferencias entre uno y otro.

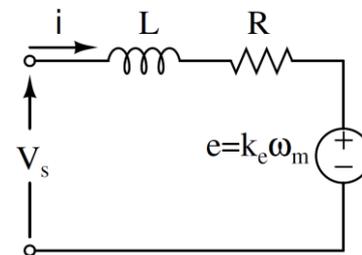


Fig. 6: Circuito equivalente de un motor de CC.

En la figura se muestra el circuito equivalente de un motor de corriente continua, el cual puede ser descrito por las siguientes ecuaciones:

$$V_s = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + e \quad (11)$$

$$T_e = k_f \cdot \omega_m + J_m \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (12)$$

La fuerza contra electromotriz inducida (e) y el torque eléctrico (T_e) tienen la siguiente expresión:

$$e[V] = k_e [V \cdot s] \cdot \omega_m [s^{-1}] \quad (13)$$

$$T_e [Nm] = k_e \left[\frac{Nm}{A} \right] \cdot i [A] \quad (14)$$

Operando y aplicando transformada de la Laplace:

$$I(s) = \frac{V_s(s) - k_e \cdot \omega_m(s)}{R + L \cdot s} \quad (15)$$

$$\omega_m(s) = \frac{k_e \cdot I(s) - T_L(s)}{k_f + J_m \cdot s} \quad (16)$$

A través de estas ecuaciones se puede realizar el modelo de control del motor.

Modelo de control del motor

El motor se puede comandar a través de la velocidad o del torque. Se eligió hacerlo en función de la velocidad de giro del eje ya que el objetivo es cumplir con los ciclos de manejo establecidos.

Se armó el circuito interno del motor en Simulink empleando las ecuaciones antes descriptas y se realizó la compensación del sistema utilizando el método de Ziegler-Nichols en lazo abierto y lugar de raíces, previamente linealizado el torque requerido a una velocidad de 70 km/h (221,127 rad/s). La respuesta frente a un escalón de 70 km/h antes y después de compensar se puede ver en la Fig. 7.

Cabe destacar que se consideró la inercia total del vehículo acoplada al eje del motor debido a problemas surgidos durante las simulaciones, de modo que el frenado del mismo se lleva a cabo desde el motor, funcionando como freno regenerativo o dinámico.

La tensión a bornes del motor es proporcional a la diferencia entre las revoluciones requeridas y las que está dando el mismo en cada momento. Cuando se pide una aceleración positiva, la tensión y la corriente son positivas, el motor está entregando energía mecánica en su eje a costa de un consumo eléctrico. Debido a que la inercia del vehículo está vinculada al eje del motor en las ecuaciones constitutivas del mismo y no se modeló el frenado, el motor ajusta su funcionamiento para cumplir con los requerimientos de los ciclos. Cuando la velocidad requerida disminuye, la tensión aplicada también lo hace y el valor de la fuerza contra electromotriz debida al giro del eje puede llegar a superarla, ocasionando que la corriente tome valores negativos y el motor funcione como freno regenerativo. En caso que la diferencia con la velocidad requerida sea aún mayor, la tensión toma valores negativos al igual que la corriente, funcionando en este caso como un freno dinámico.

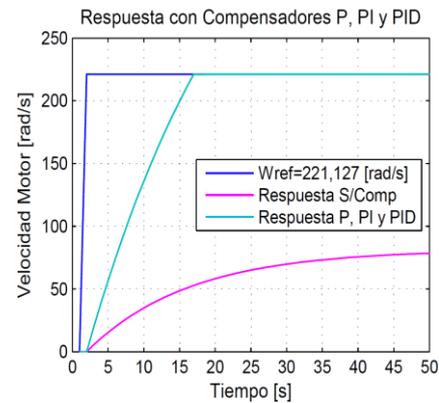


Fig. 7: Respuesta frente a una entrada escalón de 70 km/h.

CICLOS DE MANEJO

Se han utilizado en las simulaciones ciclos de manejo internacionales (EPAH, FTP 75, ECU) y algunos recorridos en la ciudad de Córdoba realizados con el fin de representar las condiciones reales de manejo en esta ciudad. Se han realizado distintos recorridos típicos dentro de la ciudad de Córdoba a fin de recolectar los datos de alturas, distancias y velocidades por medio de un GPS resultando en cinco ciclos de manejo, llamados CBA 1, CBA 2, CBA 3, CBA 4 y CBA 5. Los primeros cuatro son desde o hacia el microcentro de la ciudad y el último de ellos por Avenida Circunvalación.

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Se realizaron las correspondientes simulaciones sobre el modelo completo del auto, previamente ensamblado con cada uno de los modelos descritos. Por simplicidad se presentan los resultados de un solo ciclo, CBA 5, el cual es el más exigente de los utilizados. Este ciclo recorre la Av. Circunvalación desde la zona sur (Av. Valparaíso) hasta la norte (Av. Rancagua); el objetivo fue relevar el consumo manteniendo la velocidad lo más constante posible a 100 km/h. El mismo fue realizado un día entre semana a las 19:50 Hs.

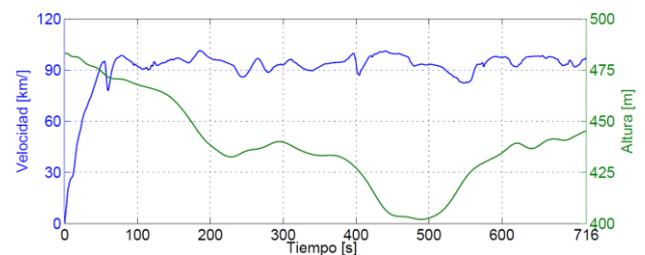


Fig. 8: CBA 5 – Altura y velocidad en función del tiempo.

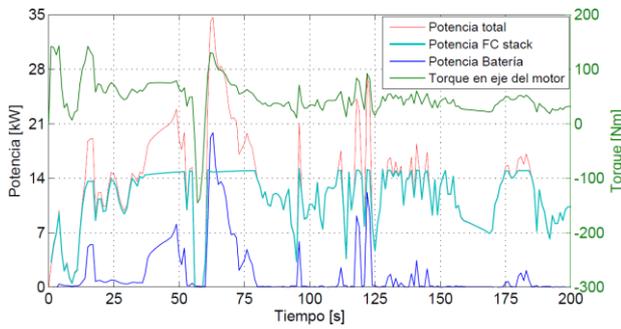


Fig. 9: Potencias y torques requeridos – Ciclo CBA 5 (Zoom 200s).

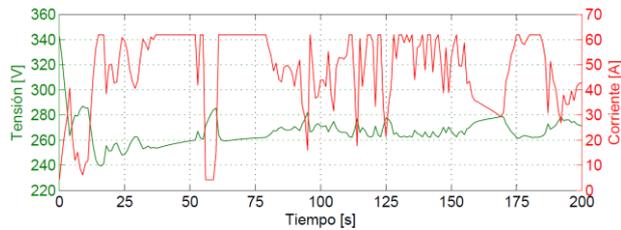


Fig. 10: Tensión y corriente en el FC stack – Ciclo CBA 5 (Zoom 200s).

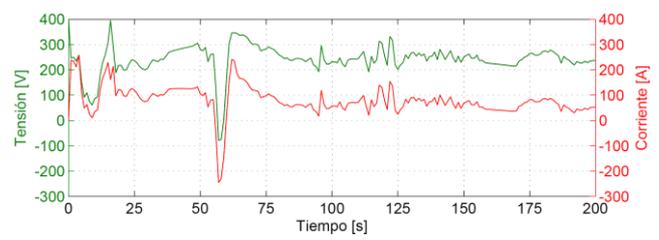


Fig. 11: Tensión y corriente en el Motor – Ciclo CBA 5 (Zoom 200s).

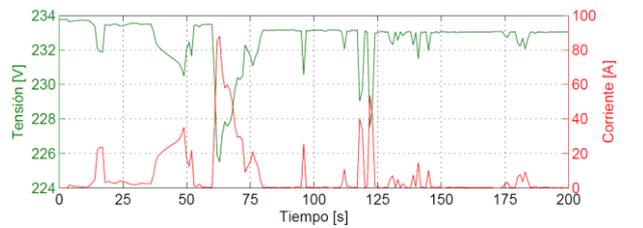


Fig. 12: Tensión y corriente en la batería – Ciclo CBA 5 (Zoom 200s).

En la siguiente tabla se reproducen todos los resultados de las simulaciones de los 8 ciclos utilizados.

TABLA 3: RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Ciclo	CBA1	CBA2	CBA3	CBA4	CBA5	EUC	FTP	EPAH	
Distancia recorrida [km]	14,157	14,580	11,409	7,690	18,172	0,994	17,769	16,507	
Energía total req. [kWh]	2,4929	2,605	1,9338	1,3321	3,5347	0,1375	2,9348	2,8378	
Km/kWh	5,679	5,597	5,900	4,773	5,141	7,230	6,055	5,817	
Stack FC	Energía kWh	2,0806	1,8799	1,3228	1,1945	2,7264	0,1302	2,4948	2,4542
	% total	83,46	72,17	68,40	89,67	77,13	94,69	85,01	86,48
	Masa H2 [kg]	0,1401	0,1206	0,0812	0,0764	0,1431	0,0091	0,1494	0,1303
	% tanque ^(a)	8,42	7,24	4,88	4,59	8,60	0,55	8,97	7,83
Rend. [%] ^(b)	44,55	46,76	48,87	46,90	57,16	42,92	50,10	56,50	
Batería	Energía kWh	0,4123	0,7251	0,6110	0,1376	0,8083	0,0073	0,4400	0,3836
	% total	16,54	27,83	31,60	10,33	22,87	5,31	14,99	13,52
	SOD [%] ^(c)	7,53	13,68	11,50	2,47	14,97	0,13	8,06	6,98
Autonomía [km] ^(d)	168,21	106,59	99,19	167,57	121,35	181,86	198	210,89	
Energía disponible en el freno	kWh	0,6541	0,5476	0,4736	0,3565	0,0330	0,0277	0,4876	0,0855
	%	26,24	21,02	24,49	26,76	0,93	20,15	16,61	3,01

a) Considerando 93% de la masa como máxima descarga del tanque de H₂ y la capacidad del mismo de 1,79 kg.

b) Calculado como la energía obtenida a bornes dividido la energía disponible en el H₂ consumido, considerando un poder calorífico del H₂ de 120000 kJ/kg.

c) Teniendo en cuenta que la profundidad máxima de descarga es del 80%.

d) En color blanco cuando está limitada por el H₂ disponible y en gris por la energía de la batería.

DISCUSIÓN

Comparación de consumos entre un auto eléctrico y de combustión interna en Argentina

Aprovechando que los recorridos de CBA 4 y CBA 5 fueron realizados con un Renault Clio Mío y se midieron los consumos de combustible, se efectuó un análisis comparativo entre el costo de la nafta, un potencial costo del hidrógeno consumido y la carga de las baterías utilizando la red de EPEC (Ente Provincial de Energía de Córdoba, tarifa para la ciudad de Córdoba). Si bien los precios de los combustibles en el país están distorsionados

se decidió igualmente hacer esta comparación para tener una idea de los costos al menos en la actualidad.

El precio del hidrógeno se obtuvo de un estudio de factibilidad de producción de hidrógeno por electrólisis y energía eólica en la Patagonia Argentina (Giudici, 2008) que establece un valor de entre 4,43 y 7,01 U\$S/kg (entre 24,68 y 39,05 \$/kg al cambio de la fecha) teniendo en cuenta todo el costo de inversión, almacenamiento y transporte por medio de una tubería de alta presión hasta la ciudad de Buenos Aires. Como este trabajo se propone para Córdoba, a los fines prácticos este valor calculado sirve de todas maneras.

El consumo de nafta fue directamente relevado del auto. Se propuso un precio promedio de \$8 por litro. Realizando la simulación del modelo con los ciclos de manejos

correspondientes se extrajo el consumo de H_2 en kg, la energía suministrada por la batería en kWh y la energía total requerida por el ciclo en kJ. Para determinar la eficiencia, se supuso un poder calorífico del H_2 de 120.000 kJ/kg y un rendimiento de la recarga de la batería del 100 % (ver Tabla 4).

TABLA 4: COSTOS COMPARATIVOS ENTRE NAFTA Y ELECTRICIDAD EN CIRCUITOS CBA 4 Y CBA 5.

Combustible	CBA 4			CBA5		
	Nafta	$H_2^{(b)}$ (Eólico)	Bat. ^(a)	Nafta	$H_2^{(b)}$ (Eólico)	Bat. ^(a)
Consumo	0,7 L	0,076 kg	0,138 kWh	1 L	0,143 kg	0,808 kWh
Distancia [km]	8	7,9	17,2	18,172		
Costo	\$5,60	\$2,98	\$0,05	\$8	\$5,59	\$0,27
Energía Combustible[kJ]	20325	9168	2903 6	20081,88		
Energía Simulación[kJ]		4795,56		12724,92		
Eficiencia [%]	23,59	52,30	43,82	63,37		

^(a)A un costo promedio de \$0,34 el [kWh] para Grandes consumidores de EPEC (Sin Subsidio). (EPEC, 2013).

^(b)Adoptando un valor de 7 US\$/kg (39,05 \$/kg al cambio de la fecha) según se describió arriba.(Giudici, 2008).

Considerando hipotéticamente que todos los autos de la ciudad de Córdoba se convierten al sistema de propulsión por pilas de combustible y baterías, teniendo en cuenta el consumo anual promedio, suponiendo unos 20.000 km recorridos y sabiendo que el parque automotor de la ciudad está compuesto por 382.150 autos al año 2012 (Municipalidad de Córdoba, 2012), sería necesario producir al año una cantidad de 67.050,51 toneladas de hidrógeno (un equivalente de 183,7 toneladas por día) y 236.544,13MWh de energía eléctrica (648,07MWh por día) para recargar las baterías.

Si el hidrógeno fuera producido a través de la electrólisis del agua serían necesarios unos 3.084.323,46MWh de energía eléctrica por año o 8.450,2MWh por día, considerando un equivalente energético del hidrógeno de 46 kWh/kg, como promedio entre 40 kWh/kg (Hydrogen Energy Systems, 2013) y 52,5 kWh (Rodríguez, et al., 2010). Esta energía representa el 35 % de la energía eléctrica total producida en la provincia de Córdoba (Secretaría de Energía, 2013). Si la energía eléctrica fuera obtenida por generadores eólicos, sería necesario instalar una potencia eólica mayor a cien veces la actual del país, es decir aproximadamente 7000 MW, si se tiene en cuenta que los 60 MW de potencia eólica instalada a lo largo del país producen anualmente unos 26.231 MWh (Secretaría de Energía, 2013). Cabe destacar que en la provincia de Córdoba hay un enorme potencial de este recurso, por ejemplo, el departamento Río Cuarto tiene una capacidad de generación eólica de 398 millones de MWh (Rodríguez, et al., 2010).

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista técnico, un auto propulsado por pilas de combustible y baterías es totalmente viable para la ciudad de Córdoba, logrando alcanzar autonomías similares

a la gasolina. Su comportamiento demostró una óptima capacidad de superar los desniveles propios de la ciudad y los requerimientos de velocidad en las principales vías de acceso al centro.

Uno de los inconvenientes encontrados, al igual que en todo proceso innovador, es que se requiere una gran inversión inicial; en este caso para producir y abastecer a los usuarios con el hidrógeno necesario. Además del elevado costo de producción de los componentes que encarecen el costo del auto y que afortunadamente van disminuyendo conforme avanzan los proyectos de investigación y desarrollo.

Si bien la eficiencia desde el pozo a la rueda de los sistemas de propulsión a gasolina y los híbridos a baterías y pilas de combustible son similares, sin embargo el impacto medioambiental producido por éstos últimos está limitado a la obtención del combustible, el cual puede reducirse casi en su totalidad si se emplean fuentes de energía limpia, cosa que no ocurre con los combustibles fósiles. En cuanto al ruido los autos eléctricos demostraron ser muy silenciosos.

Otras de las grandes ventajas de este sistema propuesto son el bajo mantenimiento que requiere, la simplicidad en la conducción, el costo del hidrógeno y la electricidad para las baterías es menor que el de la gasolina, tiene mayor eficiencia total, tiene la posibilidad de recuperar energía sin el agregado de componentes extras al sistema original y las ya mencionadas reducciones en la contaminación.

SIMBOLOGÍA Y ACRÓNIMOS

- C : Tasa de carga y descarga de la batería [1/h]
 C_{Bat} : Capacidad de la batería [Ah]
 C_D : Coeficiente de arrastre (drag) en el eje x [-]
 C_{ts} : Capacidad interna de la batería [F]
 E : Tensión electroquímica de la batería [V]
 F_a : Fuerza en la rueda para vencer el efecto de arrastre aerodinámico [N]
 F_g : Fuerza en la rueda para vencer el efecto de la pendiente [N]
 f_r : Coeficiente de resistencia a la rodadura
 F_r : Fuerza en la rueda para vencer el efecto de rodadura [N]
 i : Relación de transmisión del diferencial [-]
 i_n : Corriente de crossover de hidrógeno [A]
 I_s : Corriente drenada por la batería [A]
 M : Masa del automóvil [kg]
 P_m : Potencia eléctrica [kW]
 P_r : Potencia en la rueda [kW]
 r_d : Radio de la rueda deformada [m]
 R_s y R_{ts} : Resistencias internas de la batería [Ω]
 T : Temperatura [$^{\circ}C$]
 T_m : Torque en el eje motor [Nm]
 T_r : Torque en la rueda [Nm]
 V : Tensión a bornes de la batería [V]
 V : Velocidad del auto [m/s]
 η_{elec} : Eficiencia de los componentes electrónicos [-]
 η_{mec} : Eficiencia mecánica [-]
 η_{mot} : Eficiencia del motor [-]
 ω_m : Velocidad angular del eje motor [rad/s]
 ω_r : Velocidad angular de la rueda [rad/s]

BoP: Sistemas auxiliares (Blance of Plant)

CC: Corriente continua

FC: Celda de combustible (Fuel Cell)

FC Stack: Pila de celdas de combustible

PEM: Membrana de intercambio protónico (Protonic Exchange Membrane)

SOC: Estado de carga (State of Charge)

SOD: Estado de descarga (State of Discharge)

for hydrogen production in the province of Córdoba, Argentina, from wind resources," *International Journal of Hydrogen Energy*, no. 35, pp. 5952-5956.

[21] M. Hannana, F. Azidina and A. Mohameda (2014), "Hybrid electric vehicles and their challenges: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, p. 135-150.

[22] Z. Hengbing and A. Burke (2008), "Modeling and Optimization of PEMFC Systems and its Application to Direct Hydrogen Fuel Cell Vehicles," *Institute of Transportation Studies, University of California, Davis*.

REFERENCIAS

- [1] P. Adcock, A. Kells and C. Jackson, (2008) "PEM Fuel Cells for Road Vehicles," in *International Advanced Mobility Forum, Geneva*.
- [2] J. Cunningham, M. Hoffman, R. Moore and D. Friedman (1999), "Requirements for a Flexible and Realistic Air Supply Model for Incorporation Into a Fuel Cell Vehicle (FCV) System Simulation," *SAE*, vol. 01, no. 2912.
- [3] F. Gao, B. Blunier, A. Miraoui and A. El Moudni, (2010) "A Multiphysic Dynamic 1-D Model of a Proton-Exchange-Membrane Fuel-Cell Stack for Real-Time Simulation," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 6, pp. 1853 – 1864.
- [4] G. Genta (2006), *Motor Vehicle Dynamics, Modeling and Simulation*, Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- [5] L. Guzzella (1999), "Control oriented modelling of fuel cell based vehicles," in *Presentation in NSF Workshop on the Integration of Modeling and Control for Automotive Systems*.
- [6] A. Miotti, A. Di Domenico, Y. Guezennec and S. Rajagopalan (2005), "Control-oriented model for an automotive PEM fuel cell system with imbedded 1+1D membrane water transport," in *Vehicle Power and Propulsion*, Chicago.
- [7] G. Correa, F. Borello and M. Santarelli (2011), "Sensitivity Analysis of Temperature Uncertainty in an Aircraft PEM Fuel Cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 22, pp. 14745-14758.
- [8] W. Yoona and X. Huang (2010), "A Multiphysics Model of PEM Fuel Cell Incorporating the Cell Compression Effects," *Journal Electrochemical Society*, vol. 157, no. 5, pp. B680-B690.
- [9] L. Boulon, K. Agbossou, D. Hissel, P. Sicard, A. Bouscayrol and M.-C. Péra (2012), "A macroscopic PEM fuel cell model including water phenomena," *Renewable Energy*, vol. 46, pp. 81-91.
- [10] Secretaría de Energía (2013), "Secretaría de Energía de la República Argentina," [Online]. Available: <http://energia3.mecon.gov.ar>.
- [11] T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri and R. Jackey (2012), "High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells," in *Electric Vehicle Conference (IEVC)*.
- [12] A. Golzález and J. M. Acevedo (2010), "Implantación de Vehículos Eléctricos en el Ayuntamiento de Vigo," *Vigo*.
- [13] Y. Gao, M. Ehsani and A. Emadi (2010), *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory, and Design*, Second Edition ed., Boca Raton, Florida: CRC Press.
- [14] B. Heißing and M. Ersoy, *Chassis Handbook* (2011), Primera edición ed., Berlin: Vieweg+Teubner.
- [15] G. Romeo, F. Borello, G. Correa and E. Cestino (2012), "ENFICA-FC: Design of transport aircraft powered by fuel cell & flight test of zero emission 2-seater aircraft powered by fuel cells fueled by hydrogen," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 1, p. 469-479.
- [16] F. A. Giudici, "Feasibility study of hydrogen production using electrolisis and wind power in Patagonia, Argentina," *Florida*, 2008.
- [17] EPEC, "EPEC," 2013. [Online]. Available: http://www.epec.com.ar/docs/cuadro-tarifario/tarifa_n3_Res202.pdf. [Accessed 1 10 2013].
- [18] Municipalidad de Córdoba (2012), "Córdoba una ciudad en cifras, guía estadística de la ciudad de Córdoba," *Córdoba*.
- [19] Hydrogen Energy Systems (2013), "Hydrogen Energy Systems," [Online]. Available: <http://heshydrogen.com>.
- [20] C. R. Rodríguez, M. Riso, G. Jiménez Yob, R. Santa Cruz, S. Aisa, G. Jeandrevin and E. P. M. Leiva (2010), "Analysis of the potential