

# Modelado de un Vehículo Eléctrico de Pilas de Combustible. Dimensionamiento, Análisis Económico y de Factibilidad

Gabriel Correa Perelmuter<sup>1</sup>, Emanuel Moschen<sup>2</sup>, Pedro Muñoz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CONICET -UNCa, Maipú 662, (4700) San Fernando del Valle de Catamarca, Argentina.  
gabrielcorrea.cba@gmail.com

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – U.N.C., Av. Vélez Sarsfield 1611, (5000) Córdoba, Argentina  
moschenmanuel@hotmail.com, p\_mu\_oz@hotmail.com

**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 este 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

## Sizing and Modeling of an Electric Vehicle Powered by Fuel Cells. Economic and Feasibility Analysis

**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 running the Simulink model using the different driving cycles as inputs were obtained. Finally, the simulations results were analyzed, the internal combustion vehicle with the proposed system analyzing benefits and drawbacks was compared, 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 que este recurso es limitado y favorece la contaminación ambiental es necesario buscar alternativas sustentables y limpias.

El presente trabajo se enmarca en la búsqueda

de una solución a la problemática mencionada desde la óptica del dimensionamiento de un vehículo acorde a las necesidades de la ciudad de Córdoba impulsado por pilas de combustible y baterías. Para ello se desarrollaron modelos de simulación que representan los diferentes fenómenos dentro del auto y con ellos obtener datos relativos a consumos y comportamiento. Para las simulaciones y dimensionamiento se emplearían recorridos típicos dentro de la ciudad con los perfiles de alturas correspondientes.

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 que se lleven a cabo las pruebas de campo. En particular, después de una debida validación a través de sistemas reales, éstos 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 el 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 Clio Mio 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 ión-litio para los momentos en que ésta no llega a generar la potencia requerida lo que 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 el tren de potencia adoptado.

Si bien el requerimiento de potencia del motor eléctrico supera en picos los 20 kW la pila de combustible funciona a potencias menores la mayoría del tiempo (ver sección SIMULACIÓN). Por ende dimensionar la Pila de combustible para potencias de pico sería sobredimensionar el sistema. Por lo tanto 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

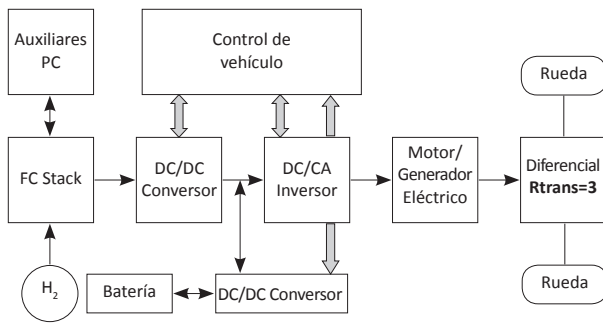


Figura 1 - Tren de potencia adoptado

cuando la pila no alcance la potencia requerida además de poder almacenar energía residual de las pilas o proveniente del freno regenerativo. Por eso se decidió utilizar una pila de combustible de 15 kW con un tanque de H<sub>2</sub> 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).  $f_r$  es el factor de resistencia a la rodadura y se muestra en 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.

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

$$\rightarrow T_r / r_d = M \cdot \frac{dV}{dt} + F_r + F_a + F_g$$

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 convertidor 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,  $\eta_{elec} = 0,95 \cdot 0,95$  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 ( $\eta_{mot}$ ) 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 ( $R_s$  y  $R_{ts}$ ) y una característica de respuesta transitoria (representada por  $C_{ts}$ ) (Huria et al., 2012).

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

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,  $CAP_{bat}$  la capacidad máxima de la batería,  $SOD_{inicial}$  el estado de descarga en el que quedó la batería del estado anterior y  $f_1$  y  $f_2$  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 determinamos la tensión a bornes de la batería para cada caso.

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  $f_1(SOD(I_{(t)}, t), I_{(t)})$  que es una superficie en el espacio que determina un valor de tensión para cada par  $[SOD, I]$  (ver Fig 2 a-); esta función tiene implícita la curva de polarización de la batería  $E=f(I_{(t)})$ .

Esta función  $f_1$  se cumple solamente 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  $f_2$  es también una superficie en el espacio que para cada par de valores  $[SOD, T]$  (ver Fig 2 b-) da un valor de  $\Delta E$  (Golzález & Acevedo, 2010).

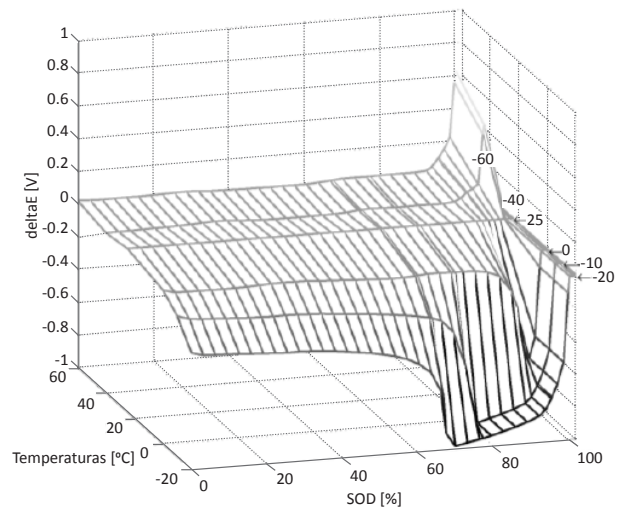
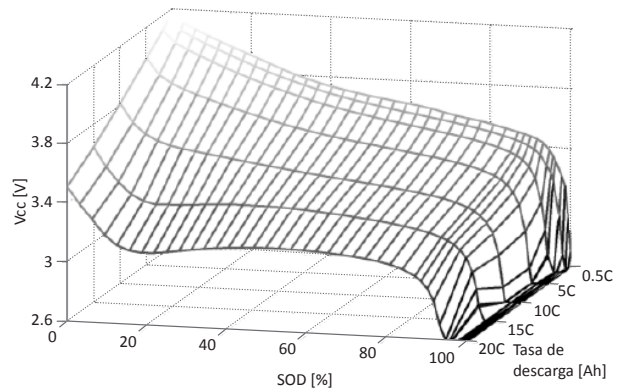


Figura 2 - a - Característica de descarga a 25°C  
b- delta E en función de la Temperatura y el SOD a 1°C

### Modelo térmico

Como la tensión de vacío depende de la temperatura interna de la batería ésta 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:

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

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

### Validación del modelo

La validación del modelo se realizó con los valores 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 valores de potencia, corriente, voltaje, temperatura y SOD que 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. Éste 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  $R_{IS}$  y el capacitor del circuito interno de la batería  $C_{IS}$ .

Como primera aproximación se tomaron valores de literatura:

$$\begin{aligned} C_p &= 1062, \\ h_c &= 10, \\ R_s &= 0,0425, \\ R_{IS} &= 0,0155, \\ C_{IS} &= 100. \end{aligned}$$

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 utilizando las funciones existentes en las librerías de Matlab obteniéndose los siguientes valores:

$$\begin{aligned} R_s &= 0,0104, \\ R_{IS} &= 0,0231, \\ C_{IS} &= 10000, \\ C_p &= 177,2418, \\ h_c &= 2,3395. \end{aligned}$$

Los resultados se pueden ver en las Fig. 3 y 4:

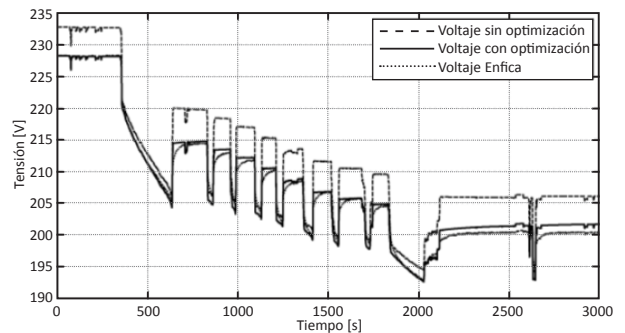


Figura 3 - Comparación Tensiones Modelo - ENFICA

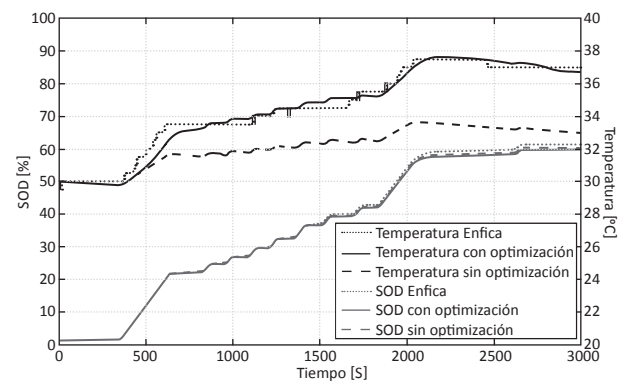


Figura 4 - Comparación SODs y Temperaturas Modelo - ENFICA. Resultado optimización

Como podemos ver la optimización de los parámetros mejoró sustancialmente el comportamiento eléctrico y térmico del modelo y podemos decir que es capaz de predecir el comportamiento del sistema con un error relativamente bajo.

### 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 capa-

citivo 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 tanto 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.

**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 5.

Como la inercia del vehículo está acoplada al eje del motor debido a problemas en el acople de los modelos, es el motor el que debe realizar el frenado de la misma, por esto, el motor tiene tres tipos de funcionamiento: corrientes y voltajes positivos para cuando el motor entrega energía, voltaje positivo y corriente negativa cuando el motor funciona como freno regenerativo, y voltajes y corrientes negativas cuando el motor funciona como freno dinámico.

**CICLOS DE MANEJO**

Se han utilizado en las simulaciones ciclos de manejo internacionales (EPAH, FTP 75, ECU) y al-

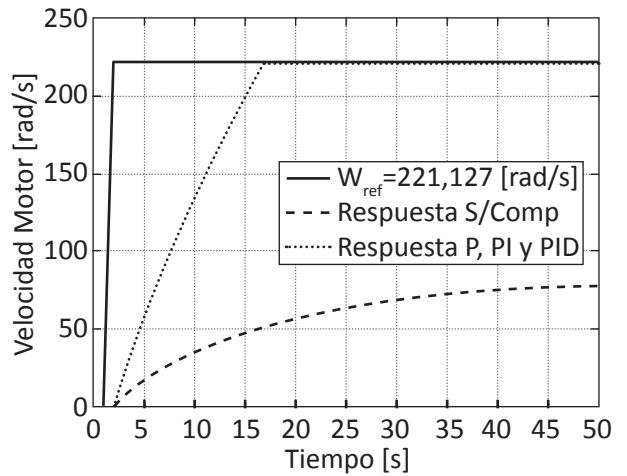


Figura 5 - Respuesta frente a una entrada escalón de 70 km/h

gunos 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 a fin de recolectar los datos de alturas, distancias y velocidades por medio de un GPS.

**SIMULACIÓN**

Por simplicidad sólo se presentan los gráficos del resultado de la simulación de un solo ciclo.

CBA 5: 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.

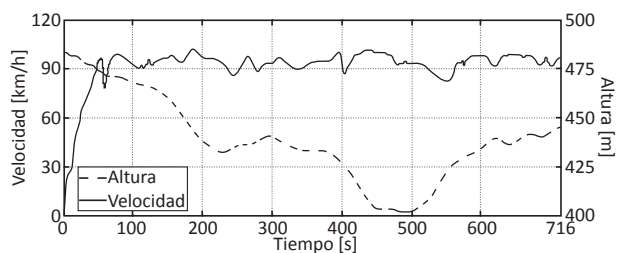


Figura 6 - CBA 5 Altura y velocidad en función del tiempo

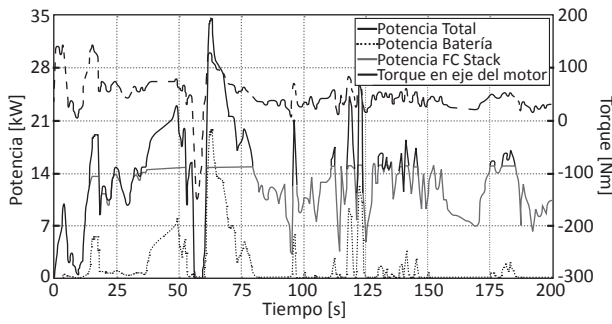


Figura 7 - Potencias y torques requeridos-Ciclo CBA 5 (Zoom 200s)

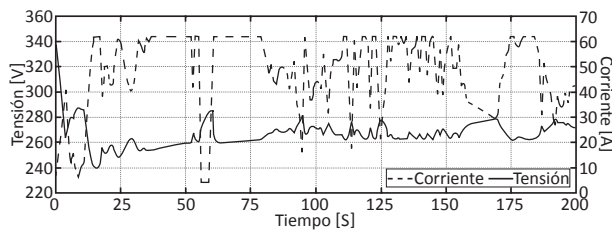


Figura 8 - Tensión y corriente en el FC stack - Ciclo CBA 5 (Zoom 200s)

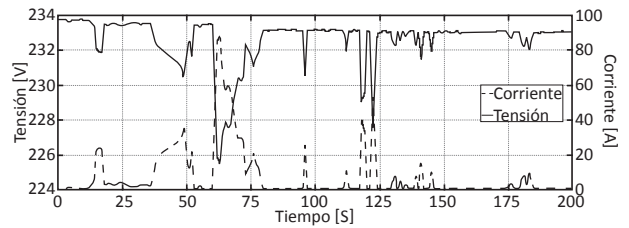


Figura 9 - Tensión y corriente en la batería - Ciclo CBA 5 (Zoom 200s)

En la Tabla 1 se reproducen todos los resultados de las simulaciones de los 8 ciclos considerados.

## DISCUSIÓN

### Comparación de consumos entre un auto eléctrico y de CI 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 efect

<b>Distancia recorrida [km]</b>		14,157	14,580	11,409	7,690	18,172	0,994	17,769	16,507	
<b>Energía total req. [kWh]</b>		20,249	21,205	15,743	10,812	29,003	0,1119	23,916	23,246	
<b>km/kWh</b>		6,991	6,876	7,247	7,113	6,266	8,887	7,430	7,101	
<b>Stack FC</b>	<b>Energía</b>	<b>kWh</b>	17,942	16,604	11,853	0,9999	25,590	0,1061	21,629	21,882
		<b>% total</b>	88,60	78,30	75,29	92,48	88,23	94,81	90,44	94,13
	<b>Masa H<sub>2</sub> [kg]</b>	0,1255	0,1095	0,0743	0,0664	0,1345	0,0079	0,1324	0,1168	
	<b>% tanque<sup>(a)</sup></b>	7,54	6,58	4,46	3,99	8,08	0,47	7,96	7,02	
<b>Rend. [%]<sup>(b)</sup></b>	42,89	45,49	47,88	45,19	57,06	40,32	49,00	56,21		
<b>Batería</b>	<b>Energía</b>	<b>kWh</b>	0,2308	0,4601	0,3890	0,0813	0,3413	0,0058	0,2287	0,1365
		<b>% total</b>	11,40	21,70	24,71	7,52	11,77	5,19	9,56	5,87
	<b>SOD [%]<sup>(c)</sup></b>	4,13	8,47	7,19	1,44	6,20	0,10	4,13	2,46	
<b>Autonomía [km]<sup>(d)</sup></b>		187,79	172,20	158,58	192,88	224,85	209,71	223,36	235,30	
<b>Energía disponible en el freno</b>	<b>kWh</b>	0,6541	0,5476	0,4736	0,3565	0,0343	0,0277	0,4876	0,0855	
	<b>%</b>	32,33	25,84	30,11	33,00	1,18	24,81	20,41	3,68	

Tabla 1 - Resultados de las simulaciones

a) Considerando que la máxima descarga del tanque de H<sub>2</sub> es de 93% de la masa y la capacidad máxima del mismo es de 1,79 kg.

b) Calculado como la energía obtenida a bornes dividido la energía disponible en el H<sub>2</sub> consumido considerando un poder calorífico del H<sub>2</sub> de 120000 kJ/kg.

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

d) Cuando está limitada por el H<sub>2</sub> disponible (■) y cuando está limitada por la energía de la batería (■).

tuó 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> de 120.000 kJ/kg y un rendimiento de la recarga de la batería del 100 % (ver Tabla 2).

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 62.555,3 toneladas de hidrógeno (un equivalente de 171,38 toneladas por día) y 160.386,06 MWh de energía eléctrica (439,41 MWh por día) para recargar las baterías.

Si el hidrógeno fuera producido a través de la electrólisis del agua serían necesarios unos 2.877.543,8 MWh de energía eléctrica por año o 7.883,68 MWh 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

Combustible	CBA4			CBA5		
	Nafta	H <sub>2</sub> <sup>(b)</sup> (Eól)	Bat <sup>(a)</sup>	Nafta	H <sub>2</sub> <sup>(b)</sup> (Eól)	Bat <sup>(a)</sup>
Consumo	0,71	0,0708 kg	0,0755 kWh	11	0,1345 kg	0,589 kWh
Distancia [km]	8	7,9		17,2	18,172	
Costo	\$5,60	\$2,77	\$0,03	\$8,00	\$5,25	\$0,20
Energía combustible [kJ]	20325	8,773,344		29036	18260,4	
Energía simulación [kJ]	4,307,425			11,227,755		
Eficiencia [%]	21,19	49,09		38,67	61,49	

**Tabla 2 - Costos comparativos entre Nafta y Electricidad en circuitos CBA 4 y CBA 5**

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

<sup>(b)</sup> Adoptando un valor de 7 U\$S/kg (39,05 \$/kg al cambio de la fecha) según se describió arriba. (Giudici, 2008).

energía representa el 35% de la 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 equivalente a cien veces la actual del país, es decir, aproximadamente 6000 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).

Con respecto a la durabilidad de los sistemas de pilas de combustible, ésta aún no ha sido establecida explícitamente. Para aplicaciones de transporte se requerirá que los sistemas alcancen el mismo nivel de durabilidad y fiabilidad que los motores actuales, es decir, 5.000 horas de vida útil o 240.000 km y la capacidad de funcionar en todo el rango de condiciones de operación de los vehículos (-40°C a 80°C).

En cuanto al almacenamiento de hidrógeno en tanques a 350 bar la norma IRAM / ISO 15916 ofrece información útil para la selección de materiales y el uso de los componentes para este sistema (Aprea 2008).



## 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, el impacto medioambiental producido por estos 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.

## REFERENCIAS

Secretaría de Energía, "Secretaría de Energía de la República Argentina" [Online]. Available: <http://energia3.mecon.gov.ar>, (2013).

Gao, Ehsani y Emadi, "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory, and Design", Second Edition ed., Boca Raton, Florida: CRC Press, (2010).

Genta, "Motor Vehicle Dynamics, Modeling and Simulation", Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., (2006).

Heißing y Ersoy, "Chassis Handbook", Primera edición ed., Berlin: Vieweg+Teubner, (2011).

Huria, Ceraolo, Gazzarri y Jackey, "High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells", Electric Vehicle Conference (IEVC), (2012).

González y Acevedo, "Implantación de Vehículos Eléctricos en el Ayuntamiento de Vigo", Vigo, (2010).

Romeo, Borello, Correa and Cestino, "ENFI-CA-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, 38, (1), 469-479, (2012).

Correa, Borello and Santarelli, "Sensitivity Analysis of Temperature Uncertainty in an Aircraft PEM Fuel Cell", International Journal of Hydrogen Energy, 36, (22), 14745-14758, (2011).

EPEC, "EPEC" [En línea]. Available: [http://www.epec.com.ar/docs/cuadro-tarifario/tarifa\\_n3\\_Res202.pdf](http://www.epec.com.ar/docs/cuadro-tarifario/tarifa_n3_Res202.pdf). [Último acceso: 1 10 2013], (2013).

Giudici, "Feasibility study of hydrogen production using electrolysis and wind power in Patagonia, Argentina", Florida, (2008).

Córdoba, "Córdoba, una ciudad en cifras, guía estadística de la ciudad de Córdoba", (2012).

Hydrogen Energy Systems, "Hydrogen Energy Systems" [Online]. Available: <http://heshydrogen.com>, (2013).

Rodríguez, Riso, Jiménez Yob, Santa Cruz, Aisa, Jeandrevin y Leiva, "Analysis of the potential for hydrogen production in the province of Córdoba, Argentina, from wind resources" International Journal of Hydrogen Energy, 35, 5952-5956, (2010).

Apra, "New standard on safety for hydrogen systems in spanish Keys for understanding and use". International Journal of Hydrogen Energy, Volume 33, p. 3526 - 3530 (2008).