

SIMULACIÓN DE LA RECONVERSIÓN ENERGÉTICA DE UN VEHÍCULO DE COMBUSTIÓN A ELÉCTRICO CON ENERGÍA SOLAR

Robinson Jiménez Moreno

Ingeniero Electrónico, Magíster en Automatización Industrial,
Universidad Autónoma de Colombia. jimenez.robinson@fuac.edu.co

John A. Villaizán

Ingeniero Mecatrónico, Universidad Militar Granada, u1801350@unimilitar.edu.co

Cristhian A. Pineda Cely

Ingeniero Mecatrónico, Universidad Militar Granada, u1801317@unimilitar.edu.co

Recibido: 03-06-2015, aceptado: 27-06-2015, versión final: 27-06-2015¹

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados obtenidos en la reconversión energética y el diseño aerodinámico de un prototipo de vehículo unipersonal eléctrico. Se estudia el comportamiento del vehículo, a través de la simulación computacional dinámica de fluidos (CFD), mostrando el impacto del arrastre que generan una serie de paneles solares utilizados para abastecimiento energético e implementados sobre la carrocería. En paralelo, se analizan los elementos eléctricos independientemente, para lograr seleccionar los mejores componentes, con las características óptimas, que dan lugar a la reconversión energética. Como resultados, se presenta los dispositivos eléctricos a utilizar, el diseño aerodinámico implementando paneles solares, disminuyendo lo máximo posible la fuerza de resistencia de arrastre, y la potencia necesaria para poner en marcha el vehículo eléctrico obtenido.

Palabras clave: *vehículo eléctrico, panel solar, reconversión energética.*

ABSTRACT

The results of the energy conversion and the aerodynamic design of a prototype electric vehicle sole are presented in this article. Vehicle behavior is studied through computer simulation fluid dynamics (CFD), showing the impact of drag generated by an array of solar panels used for energy supply and deployed on the body. In parallel, the electrical elements are analyzed independently to achieve select the best components, the optimal characteristics, leading to energy conversion. As a result, the electrical devices is presented using the aerodynamic design implementing solar panels, reducing as much as possible the resistance force of drag and the power required to launch electric vehicles obtained.

Keywords: *electric vehicle, solar panel, energy conversion.*

¹ Esta investigación es apoyada financieramente por la Vicerrectoría de investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, mediante el ING 1535, desarrollado al interior del grupo de investigación GAV del programa de Ingeniería Mecatrónica.

1. INTRODUCCIÓN

Las actividades cotidianas del hombre, las cuales se expanden en diversos campos, como la educación, la ciencia, la religión y otras, tienen un punto en común en el uso de la energía. Dentro de estas actividades el transportarse es un factor hoy día inherente a su ejercicio. Los medios actuales de transporte requieren para su operación, el uso recurrente y diversificado de combustibles fósiles, cuyo consumo crece exponencialmente y se estima que en un futuro las reservas de petróleo se extinguirán (Foundation, 2014). Frente a este hecho, nuevas alternativas de energía como los carros eléctricos y de hidrogeno, presentan una solución aún en desarrollo, cuyas investigaciones apuntan a resolver problemas de eficiencia y potencia, entre otros (Damaiano, 2012).

Un aspecto importante que contribuye a mitigar los latentes problemas de los combustibles fósiles en vehículos de combustión, es la reconversión energética del mismo. Esto puede tener impacto en el diseño aerodinámico debido a que afecta variables como rendimiento y estabilidad. Para incluir modificaciones en la carrocería, tipo de motor y finalmente fuente de alimentación energética se requiere asegurar un bajo coeficiente de arrastre aerodinámico, que conlleva una disminución en el consumo de combustible. Una reducción del 20% del coeficiente de arrastre podría disminuir el consumo entre un 7% a un 9% (Zhu, 2011) (Jing, 2010) y (Rodríguez, 2004).

En la actualidad, se observa un aumento en el uso de paneles solares, en diferentes aplicaciones de suministro energético, por ejemplo en (Ali, 2012) y en (Nunoo, 2010) se presenta un desarrollo para la iluminación de calles mediante la combinación PV y bombillas LED. De forma que estos se presentan como una alternativa clara para el abastecimiento energético en vehículos eléctricos (Bendir, 2010) (Sousa, 2012). El propósito de este artículo es simular la reconversión energética de un

vehículo de combustión a uno eléctrico que utilice paneles solares. Se tienen en cuenta los elementos eléctricos necesarios para la autonomía móvil del vehículo, acompañado por un análisis aerodinámico del modelo final de carrocería modificada al usar paneles solares flexibles, esto último como aporte a los trabajos que se vienen adelantando en el área.

La estructura del artículo es la siguiente: en la sección II, se describe el dimensionamiento eléctrico y la simulación aerodinámica del vehículo. En la sección III se desarrollan los cálculos de la potencia necesaria para poner en marcha el vehículo. En la sección IV se presenta un análisis de resultados y finalmente en la sección V las conclusiones.

2. DIMENSIONAMIENTO ELÉCTRICO

La reconversión está basada un vehículo tipo buggy de honda cuyas características generales se presenta en la tabla 1. La reestructuración del vehículo se compone de dos partes características, los componentes de suministro energético que permitirán el desplazamiento autónomo y la modificación de la carrocería asociada a la aerodinámica del mismo. Las cuales se presentan a continuación.

Tabla 1
Datos del Vehículo

Modelo	Honda Odyssey FL250
Peso inicial	192,05 Kg (423,4 Lb)
Medidas generales	Largo: 2.095 mm Ancho: 1.230 mm Alto: 1525 mm
Distancia entre ejes	1435 mm

2.1. Componentes eléctricos

De forma puntual, la reconversión energética de un vehículo de combustión a uno eléctrico se centra en el tipo de motor. El cambio a un motor eléctrico asocia una fuente de energía eléctrica

que se pueda desplazar con el vehículo, para el caso claro un grupo de baterías. Se dispondrá de un conjunto de paneles solares que provean suministro energético y un medio de carga parcial durante el desplazamiento y en sitios de estacionamiento. A continuación se describen las características generales de cada uno, motor, batería y panel.

1) **Motor eléctrico**

Uno de los motores recomendados para un vehículo eléctrico es el de inducción, ya que se caracterizan por ser eficientes, presentan pocos problemas de funcionamiento y se consiguen en el mercado a precios moderados (Terras, 2010). Cuando los motores entregan su máxima potencia, aumentan su temperatura considerablemente, por lo cual a la carrocería del vehículo se le debe acondicionar un sistema de refrigeración, para evitar daños internos y pérdidas de eficiencia (Shumei, 2008).

2) **Baterías**

El suministro energético para el motor está basado en alimentación mediante baterías, estas juegan un rol importante en la reconversión del vehículo, debido a que se requiere de un grupo de ellas y el correspondiente espacio de instalación, no previsto en el diseño inicial de la carrocería. Según las dimensiones de la batería y el número de baterías empleadas, se tendrá una capacidad energética almacenada que determinará el desplazamiento o distancia de recorrido del móvil.

Por otro lado, la vida útil de las baterías se reduce con el incremento de la temperatura del móvil por sobre la temperatura ambiente (Kolbel, 2002), por tanto, se debe extender el sistema de refrigeración, no solo al motor, sino también al compartimiento de las baterías (Committee, 2008). Para el caso particular del Honda FL250, dado que no se tiene una carrocería cerrada, no se requiere esta consideración para el caso de las baterías.

Las baterías se diferencian en el tipo de material que emplean, clasificándolas en baterías de AGM, GEL y de Ion-Litio, principalmente (Wertz, 1999) (Pridie, 2011). Las características de las baterías AGM se concluye que son las más óptimas para el carro eléctrico, logrando un equilibrio entre precio y prestaciones, entre estas están su tamaño, capacidad de carga y vida útil.

3) **Paneles solares**

Una de las fuentes de energía alternativa para generación de carga en baterías para automóviles eléctricos, se encuentra en los paneles solares. Para la reconversión del vehículo de referencia, los paneles solares estarán distribuidos sobre la estructura del mismo, en la barra antivuelco colocada detrás del asiento del conductor y arriba del parachoques. La función de los paneles solares es suministrar carga, si bien es una tarea lenta, permite recuperar una parte de la energía que las baterías suministran al movimiento del vehículo durante su permanencia en espacios abiertos.

Hoy día, la tecnología para el diseño y fabricación de paneles solares, ha permitido que su costo, potencia y forma se adapten a muchos requerimientos energéticos. Para el caso particular serán de interés los paneles fotovoltaicos flexibles.

2.2. **Análisis aerodinámico**

La figura 1 ilustra las dimensiones generales del vehículo, las cuales son necesarias a fin de realizar el modelo CAD del mismo y permita realizar la simulación aerodinámica sin y con los cambios a implementar. Estos cambios conllevan la inclusión de baterías y paneles solares en la carrocería, los cuales derivan en un cambio en la resistencia del vehículo, que inciden en su consumo energético y en la autonomía de desplazamiento que tendrá.

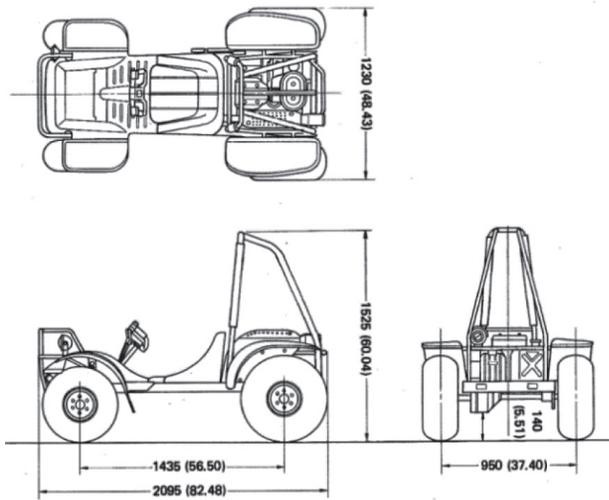


Figura 1
Dimensiones del vehículo

Dada la inclusión de los paneles solares y las baterías, se analiza el cambio aerodinámico mediante el software CAD SolidWorks®. Se inicia construyendo el modelo a escala y se aplican pruebas de flujo de aire para ver su comportamiento. Para realizar las pruebas de túnel de viento e impacto, es necesario ingresar los parámetros en el asistente de simulación de fluidos “Flow Simulation” de la herramienta CAD, como ilustra la tabla 2.

Tabla 2
Datos de simulación

Parámetros Termodinámicos	<i>Presión Estática:</i> 74661.00 Pa <i>Temperatura:</i> 293.15 K
Parámetros de Velocidad	<i>Vel. en dirección X:</i> 16.66 m/s <i>Vel. en dirección Y:</i> 0 m/s <i>Vel. en dirección Z:</i> 0 m/s
Parámetro de Turbulencia	<i>Intensidad:</i> 0.10 %
Condiciones de Frontera- Prisma Rectangular	<i>Largo (Eje X):</i> 7500 mm <i>Ancho (Eje Z):</i> 3500 mm <i>Alto (Eje Y):</i> 4000 mm

Dado que el fluido es aire, para la ciudad de Bogotá se tiene que la densidad de este corresponde a 0,879038421 Kg/m³. Datos obtenidos haciendo uso de la formulación de la densidad

del aire (1981/91), publicada en el *National Institute of Standards and Technology* (Davis, 1981). De igual forma se ingresan los valores de presión (560 mmHG), temperatura (20°C) y humedad relativa (80%) característicos de la ciudad de Bogotá (Ideam, 2000).

La velocidad de circulación será de 16,66 m/s correspondiente a 60 km/h la cual es la velocidad de circulación máxima en Bogotá. El área frontal del vehículo es obtenida por medio de la realización de una proyección frontal (sombra) del modelo, y calculada por medio del software CAD. En la Figura 2 se observa el prisma rectangular que permite establecer las condiciones de frontera que darán lugar a la simulación de túnel de viento. En esta misma se aprecia la distribución de los paneles solares, donde resalta el panel flexible en el techo del vehículo. De igual forma se aprecia la ubicación final del grupo de baterías.

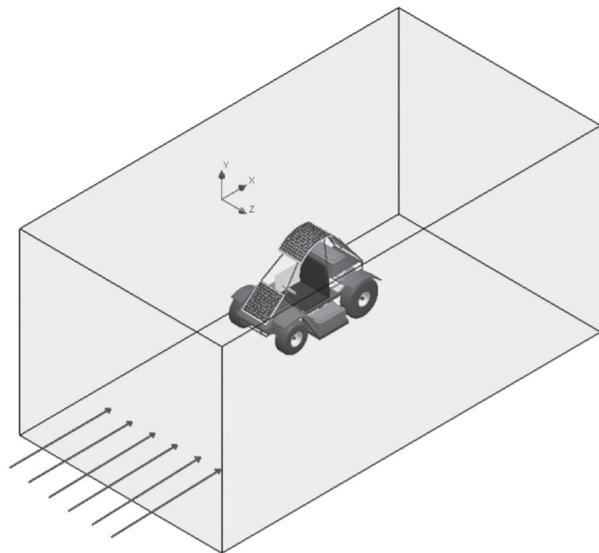


Figura 2
Condiciones de Frontera - Prisma Rectangular.

En la figura 3 se ilustra la distribución de presiones sobre el vehículo. La presión seleccionada hace referencia a la altura de la ciudad de Bogotá, Colombia, ajustando los límites frontera del dominio computacional alrededor del vehículo y el enmallado sobre el sólido (Ramasamy, 2010).

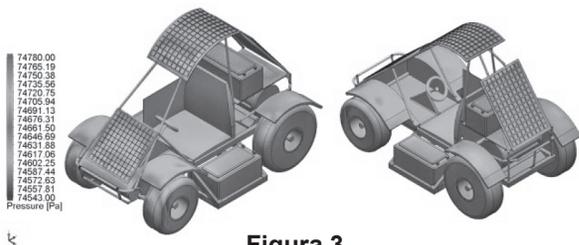


Figura 3

Distribución de Presiones sobre el vehículo

En la figura 4 se ilustra la distribución de temperatura sobre el vehículo.

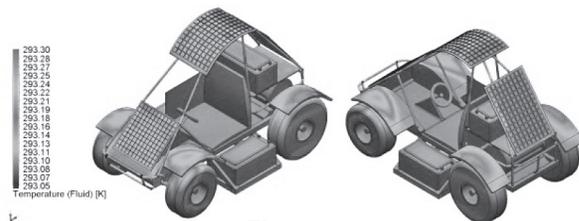


Figura 4

Distribución de Temperaturas sobre el vehículo

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Tabla 3
Coeficiente Aerodinámico

Sin Paneles Fotovoltaicos		
Área frontal	Cx	Fuerza generada en X
0,77267833 m ²	0,552672	52,1323 N
Con Paneles Fotovoltaicos		
Área frontal	Cx	Fuerza generada en X
0,95965906 m ²	0,601974	70,5237 N

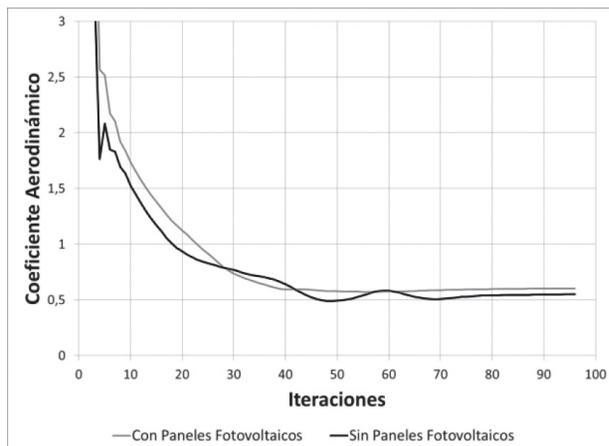


Figura 5

Comparación de los coeficientes aerodinámicos

La fuerza de resistencia aerodinámica se puede expresar de la siguiente forma (1):

$$F = \frac{1}{2} \rho C_x A_f V^2 \quad (1)$$

(Donde, ρ : Densidad del aire, C_x : Coeficiente aerodinámico del vehículo, dependiendo de su geometría, A_f : Área frontal del vehículo, V : Velocidad de Circulación (Rodríguez, 2004).

En este caso particular analizamos el fluido (Aire), donde su densidad en el ambiente especificado previamente es 0,870308605 Kg/m³, la velocidad de circulación será de 16,66 m/s (60 km/h). El área frontal del vehículo es 139797.32 cm² (13,979732 m²), y la masa del modelo es de 145,45 kg, usando como material fibra de vidrio tipo E, dato que será usando más adelante en los cálculos de potencia.

El coeficiente aerodinámico del vehículo obtenido por medio del solver de SolidWorks® fue de 0,59. Fue necesario introducir la ecuación del coeficiente de arrastre, despejando la anterior fórmula, $C_x = F / (1/2 \rho A_f V^2)$, donde el simulador utiliza la suma de las fuerza normales frontales y traseras como la fuerza aerodinámica presentada sobre el vehículo. El coeficiente es un poco más alto en comparación con vehículos convencionales de cuatro pasajeros. Esto sucede debido al largo del vehículo, ya que al ser unipersonal se requiere una longitud mucho menor, elevando coeficiente de arrastre (Hui,2012).

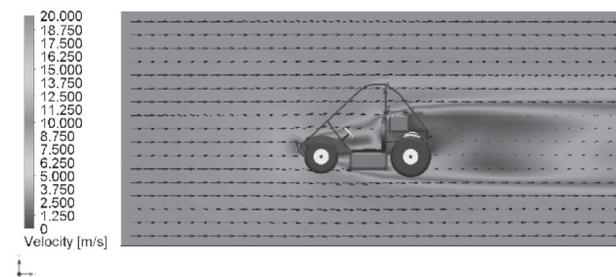


Figura 6

Velocidad del viento sobre el vehículo - Sin Paneles Fotovoltaicos

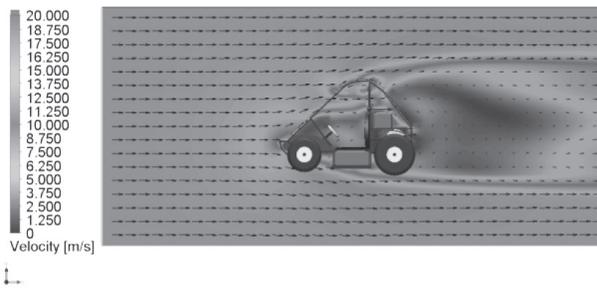


Figura 7
Velocidad del viento sobre el vehículo -
Con Paneles Fotovoltaicos

Cálculos de potencia

En el momento en el que un vehículo eléctrico se pone en marcha con una velocidad (v) y aceleración (a), también existe un efecto de resistencia al movimiento descrito por varias fuerzas tales como: 1. Resistencia a la aceleración (F_a). 2. Resistencia a la rodadura (F_r). 3. Resistencia del aire (F_k). 4. Resistencia de inclinación (F_g) (Tanaka, 2008).

La sumatoria de todas las fuerzas de resistencia da como resultado la ecuación (2).

$$F = F_a + F_r + F_k + F_g \text{ [N]} \quad (2)$$

La potencia mecánica necesaria para mover un vehículo eléctrico, está dada por la fórmula (3).

$$P = F * V \quad (3)$$

La masa del vehículo la componen los siguientes grupos de elementos: baterías (210 kg), motor (30 kg), conductor promedio (80 kg), carrocería (145,54 kg), chasis (200 kg); dando una masa total de 665,4 kg. Con una gravedad de $9,8 \text{ m/s}^2$, un coeficiente de rodadura de 0,011, una inclinación de 7 grados, una aceleración de $1,66 \text{ m/s}^2$ y un coeficiente aerodinámico de 0,59, por medio de la ecuación (2), se calcula la potencia necesaria

para poner en marcha el vehículo eléctrico. Se utiliza una variación temporal de cada 0,5 segundos, mostrando los cambios de velocidad, la fuerza resistiva del aire, la fuerza total a la marcha y potencia necesaria en la Tabla 3.

4. CONCLUSIONES

Se logró evidenciar que las variables que afectan las diferentes fuerzas resistivas sobre un vehículo y que se pueden modificar son: la masa del vehículo y el coeficiente aerodinámico, que para el caso de la reconversión, corresponden a la inclusión del banco de baterías y de los paneles solares. Su adecuado ajuste y ubicación, permite disminuir la potencia que se requiere para la puesta en marcha de un vehículo, aumentando la autonomía de las baterías y la disminución de los tiempos de recarga.

Los paneles solares sirven de apoyo a las baterías, prolongando aún más el tiempo de uso, se requiere del uso de un sistema de conmutación que permita recargar la batería que más se encuentre descargada y una vez esto proseguir de forma automática con la siguiente.

Se logró observar que la estimación de potencia para mover un vehículo eléctrico es aproximada. Esta puede variar si las fuerzas de resistencia al movimiento aumentan.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es apoyada financieramente por la Vicerectoría de investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, mediante el ING 1535, desarrollado al interior del grupo de investigación GAV del programa de Ingeniería Mecatrónica.

REFERENCIAS

- W. W. Foundation, «Planeta Vivo Informe 2012», 2012. [En línea]. Available: http://awsassets.panda.org/downloads/informe_planeta_vivo_2012.pdf. [Último acceso: 10 Marzo 2014].
- A. Damiano, I. Marongiu, M. Porru y A. Serpi. «Electric Vehicle energy storage management for Renewable Energy Sources exploitation», Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, pp. 1, 8, 4-8, 2012.
- H. Zhu y Z. Yang. «Simulation of the aerodynamic interaction of two generic sedans moving very closely», Electric Information and Control Engineering (ICEICE), 2011 International Conference on, pp. 2595, 2600, 2011.
- C. Jing, W. Yun-zhu, W. Deng-feng, X. Wei-gang y W. Gui-jin. «Research on aerodynamic drag reduction of heavy commercial vehicle», Computer Engineering and Technology (ICCET), 2010 2nd International Conference on, vol. 5, pp. V5-191, V5-194, 2010.
- Davis R. S. «National Institute of Standards and Technology - Equation for the Determination of the Density of Moist Air (1981/91)», [En línea]. Available: www.nist.gov/pml/wmd/labmetrology/upload/air91co24-2.xls.
- IDEAM, «Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia», 2000. <http://institucional.ideam.gov.co/descargas?com=institucional&name=pubFile77&downloadname=D%3A%5Cpromedios%20met%5CPromedios%2071-00.xls>. [Último acceso: 04 05 2014].
- Ramasamy D., Kadirgama K., Amirruddin A. K. y Taib M. Y. «A Vehicle body drag analysis using computational fluid dynamics», National Conference in Mechanical Engineering Research and Postgraduate Students (1st NNCMER 2010), pp. 342-353, 2010.
- Rodríguez P. L., Mántaras D. Á. y Vera C. *Ingeniería del automóvil: sistemas y comportamiento dinámico*. Editorial Paraninfo, 2004.
- Ali, M.; Orabi, M.; Abdelkarim, E.; Qahouq, J.A.A.; Aroudi, A.E. “Design and development of energy-free solar street LED light system”, Innovative Smart Grid Technologies - Middle East (ISGT Middle East), 2011 IEEE PES Conference on, vol., no., pp. 1-7, 17-20 Dec. 2011. doi: 10.1109/ISGT-MidEast.2011.6220812.
- Nunoo, S.; Attachie, J.C.; Abraham, C.K. “Using solar power as an alternative source of electrical energy for street lighting in Ghana”, Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES), 2010 IEEE Conference on, vol., no., pp. 467-471, 27-29 Sept. 2010. doi: 10.1109/CITRES.2010.5619814

- A. Bedir, B. Ozpineci y J. E. Christian. «The impact of plug-in hybrid electric vehicle interaction with energy storage and solar panels on the grid for a zero energy house», Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES, pp. 1, 6, 2010.
- D. M. Sousa, C. Dinis, A. Roque y V. F. Pires. «Computational application to study the performance of an electric vehicle with photovoltaic panels», Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012 International Conference on, pp. 1, 5, 2012.
- D. Kolbel. «Parameters to consider for installation of VRLA-batteries versus different ambient temperatures», Telecommunications Energy Conference, 2002. INTELEC. 24th Annual International, pp. 530, 532, 2002.
- S. B. Committee. «IEEE Guide for Selection of Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Batteries for Stationary Applications», IEEE Std 1189-2007 (Revision of IEEE Std 1189-1996, pp. 1, 24, 2008.
- J. A. Wertz y T. J. Clough. «Development of advanced lead acid batteries for electric vehicles. The use of additives to increase performance and extend life. I. AGM cells.», In Battery Conference on Applications and Advances, 1999. The Fourteenth Annual, pp. 189-195, 1999.
- S. Pridie y A. Huster. «Qualification of AGM lead-acid batteries for long-term subsea deployment», 2011.
- A. Ranjbar, A. Banaei, A. Khoobroo y B. Fahimi. «Online Estimation of State of Charge in Li-Ion Batteries Using Impulse Response Concept», Smart Grid, IEEE Transactions on, vol. 3, pp. 360-367, 2012.
- V. F. Pires, A. Roque, D. M. Sousa y G. Marques. «Photovoltaic electric vehicle chargers as a support for reactive power compensation», In Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), pp. 1-6, 2012.
- J. M. Terras, A. Neves, D. M. Sousa y A. Roque. «Estimation of the induction motor parameters of an electric vehicle», In Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE, pp. 1-6, 2010.
- C. Shumei, L. Chen y S. Liwei. «Study on efficiency calculation model of induction motors for electric vehicles», In Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE, pp. 1-5, 2008.
- Z. Hui, W. Jial y Y. Zhingang. «Numerical Analysis On Effect Of Vehicle Length On Automotive Aerodynamic Drag», Information Science and Control Engineering 2012 (ICISCE 2012), IET International Conference on, pp. 1, 4, 2012.
- D. Tanaka, T. Ashida y S. Minami. «An analytical method of ev velocity profile determination from the power consumption of electric vehicles», In IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Harbin, China, pp. 1, 3, 3-5, 2008.