

Pampa Solar: un proyecto multidisciplinario para la construcción de un vehículo solar

*Rossi, Silvano**; Spina, Marcelo*; Bengler, Fernando*; de la Vega, Roberto*;
Leegstra, Roberto*; Santillán, Guillermo**

Resumen

Los sistemas basados en energías limpias y de emisión cero como alternativas de movilidad sustentable aplicadas al transporte urbano son hoy una necesidad y justifican el objetivo de disponer de un vehículo solar como prototipo experimental. Así, la iniciativa de un grupo de trabajo constituido por docentes, estudiantes y personal no docente se focalizó en la construcción de un vehículo híbrido experimental motivado por una competencia latinoamericana de autos solares, en la que se validó su desempeño luego de su participación. El prototipo construido fue galardonado con el premio al uso más eficiente de energía solar. En el trabajo se presentan los aspectos constructivos del vehículo y resultados experimentales obtenidos durante la competición.

Palabras clave: energía solar, vehículo híbrido experimental, emisión cero, panel solar

El presente trabajo cubre aspectos de investigación y desarrollo tecnológico realizado por los autores en los últimos años, en el contexto de un proyecto de extensión institucional denominado "Pampa Solar-Automóvil Híbrido Experimental", Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires -UNCPBA- ; recibido el 11/03/2013, versión corregida el 25/04/2014, admitido el 08/05/2014.

Autores: *Grupo INTELYMEC, Dpto. de Ing. Electromecánica, Facultad de Ingeniería, UNCPBA (Olavarría, Buenos Aires, Argentina). **Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires CIFICEN, Consejo Nacional de Investigaciones en Ciencia y Técnica -CONICET-, (Tandil-Olavarría, Buenos Aires, Argentina). Contacto: fbengler@fio.unicen.edu.ar

Pampa Solar: a multidisciplinary project for the construction of a solar vehicle

Abstract

Clean energy and zero emission-based systems as sustainable mobility alternative applied to urban transport are today a necessity and justify the aim to have a solar vehicle as an experimental prototype. Thus, the initiative of a working group constituted by professors, students and supporting personal, was focused in the construction of an experimental hybrid vehicle motivated by a Latin-American solar car race in which its performance was validated during its participation. The prototype was awarded with the prize of most efficient use of solar energy. In this work constructive aspects of the vehicle and experimental results obtained during the competition are presented.

Keywords: solar energy, experimental hybrid vehicle, zero-emission, solar panel

Pampa Solar: um projeto multidisciplinar para a construção de um veículo solar

Resumo

Os sistemas baseados em energias limpas e de emissão zero como alternativas de mobilidade sustentável aplicadas ao transporte urbano são hoje uma necessidade e justificam o objetivo de dispor de um veículo solar como protótipo experimental. Assim, a iniciativa de um grupo de trabalho constituído por professores, estudantes e pessoal não docente focalizou na construção de um veículo híbrido experimental motivado por uma competição latino-americana de carros solares, em que o seu desempenho foi validado através de sua participação. O protótipo construído foi galardoado com o prêmio pelo uso mais eficiente de energia solar. Neste trabalho são apresentados os aspectos construtivos do veículo e os resultados experimentais obtidos durante a competição.

Palavras chave: energia solar, veículo híbrido experimental, emissão zero, painel solar

I. Introducción

La energía solar es ecológicamente ventajosa en relación con cualquier otra fuente de energía, pues es renovable, no produce emisión de gases de efecto invernadero y no genera residuos líquidos o sólidos, lo que la transforma en una variable relevante en cualquier programa energético de desarrollo sustentable. A pesar de ello, cubre, en la actualidad, una pequeña parte de las demandas globales de energía, aportando un valor menor al 1 % del suministro de electricidad total (Solangib *et al.*, 2011).

Otro dato a considerar indica que la potencia solar incidente en el planeta es de 166.000 TW, de la cual 30% retorna al espacio en forma de reflexión y 19% es absorbido por las nubes (Abbot, 2010). Esto lleva a un valor aproximado de 85.000 TW disponibles para colectores solares terrestres, lo que constituye un valor inmensamente superior al que se podría obtener mediante otras fuentes de energía renovable como eólica, mareomotriz y biomasa, entre otras.

Bajo estas perspectivas, es indudable el potencial de la energía solar si se piensa en su aplicación, por ejemplo, en el área del transporte urbano. En este sentido y en consonancia con la utilización de energías limpias, existe una tendencia mundial creciente de sustitución de los clásicos motores de combustión interna en vehículos, por tracción a través de motores eléctricos, lo que constituye un importante aporte a la solución de emisión de gases de efecto invernadero (Situ, 2009; Weiss *et al.*, 2010). Es decir, vehículos que emplean energías limpias poseen menor impacto ambiental frente a los tradicionales. Actualmente, las principales industrias automotrices han focalizado su desarrollo en vehículos eléctricos híbridos que combinan generalmente un motor de combustión interna y una máquina eléctrica, a fin de alcanzar mejor desempeño y economía de combustible (Maggetto y Van Mierlo, 2000; Momoh y Omoigui, 2000). De acuerdo con un estudio publicado recientemente (Shinn *et al.*, 2012), el potencial de mercado futuro de los vehículos eléctricos es mayor que el de los híbridos y los clásicos con motores de combustión interna.

En el contexto nacional existen trabajos en torno al desarrollo de vehículos eléctricos urbanos, por ejemplo, con motores de inducción

trifásicos y con diferencial electrónico en un vehículo eléctrico puro (Magallán *et al.*, 2008) y en el desarrollo del control supervisor de la tracción eléctrica (Bossa *et al.*, 2010).

Estos hechos han motivado el desarrollo de vehículos eléctricos experimentales en diferentes partes del mundo, para analizar la viabilidad de su empleo en el transporte urbano (Lu Ren *et al.*, 2010; Wamborikar y Sinha, 2010) motivados fundamentalmente por la sustitución de combustibles fósiles y la reducción de la polución ambiental (Cairns, 1992; Brady y O'Mahony, 2011). Este tipo de aplicaciones puede extenderse, inclusive, a regiones rurales con contribuciones relevantes, por ejemplo, para la agricultura (Redpath *et al.*, 2011). La idea elemental de un vehículo solar de emisión cero radica en el empleo de la energía provista por una batería, durante y después de su carga mediante paneles solares fotovoltaicos, para alimentar un motor eléctrico y así mover al vehículo.

En este contexto, mucho han tenido y tienen que ver las competiciones de vehículos solares que se han llevado a cabo en diferentes partes del mundo (King, 1990; King, 1991; Connors, 2007) y que han generado aportes relevantes para el desarrollo de los vehículos solares actuales en lo que respecta a: desarrollo e implementación de paneles solares de alta eficiencia, tecnología de baterías, accionamiento eléctrico y control, instrumentación electrónica y estrategias de utilización de energía (Lovatt *et al.*, 1998; Mangu *et al.*, 2010; Al Zaher *et al.*, 2010; Ustun *et al.*, 2009).

En lo que a Latinoamérica se refiere, se destaca el Desafío Solar Atacama, primera competición de vehículos solares desarrollada en Chile, en el año 2011, recorriendo aproximadamente 1000 km a través del desierto de Atacama, donde se registran los mayores niveles mundiales de radiación solar. Uno de los principales objetivos de dicho evento, que se sigue desarrollando todos los años, es el de brindar un espacio para que los países latinoamericanos puedan mostrar sus avances en vehículos que funcionan con energía solar fotovoltaica.

Con el objetivo de participar en dicha competición y desarrollar tecnología con potencial aplicación al transporte urbano, se presenta en este trabajo el desarrollo de un vehículo híbrido experimental denominado Pampa Solar. Dicho vehículo emplea energía solar como principal fuente de electricidad y el aporte adicional de un generador eléctrico acciona-

do por el pedaleo del conductor. El vehículo, construido en el seno de nuestra institución educativa por estudiantes, docentes y no docentes, cuenta con una batería de última generación para el almacenamiento de energía y un motor eléctrico incorporado en la rueda trasera del móvil.

Con este trabajo se busca promocionar el uso de energías limpias aplicadas al transporte urbano, mediante un proyecto interdisciplinario que vincula áreas de desarrollo tecnológico tales como: fuentes de energía renovables, control avanzado de máquinas eléctricas, robótica móvil, teorías y modelos para análisis estructural.

Los objetivos del proyecto son los siguientes: a) Desarrollar la creatividad e innovación en futuros profesionales de la ingeniería, b) Posibilitar la transferencia de conocimientos sobre las nuevas tendencias en transporte, tracción eléctrica y fuentes de energía renovables al sector productivo local y regional, c) Difundir el uso de las energías alternativas y e) Viabilizar su participación en competencias de vehículos solares.

II. Descripción general del vehículo

El vehículo híbrido experimental se construyó desde un punto de vista de transporte liviano, estable, de alta eficiencia, con costos reducidos y, lo más importante, de emisión cero, tanto durante su funcionamiento como en la obtención de la energía (Spina *et al.*, 2012). Consta de una estructura de tres ruedas, del tipo tricicleta invertida, para un sólo conductor en posición decumbente, como se muestra en la **Figura 1**. La tracción eléctrica de alta eficiencia está incorporada en la llanta trasera con un motor eléctrico de 48 V – 2 kW. Posee además un alojamiento para la batería detrás del asiento y soporte para alojamiento de los circuitos electrónicos, controladores, fuentes y borneras de cableado en la parte posterior. Sobre la estructura del vehículo se dispone de un techo de fibra de vidrio con nervaduras, para distribuir los módulos solares fotovoltaicos. Dicha estructura tiene un movimiento de rotación sobre un eje que posibilita un giro de $\pm 35^\circ$ respecto de la horizontal y se comanda mediante un actuador lineal, activado desde tablero, constituyendo un seguidor solar móvil. En la **Figura 2** se presenta la versión final del vehículo Pampa Solar.



FIGURA 1. Vehículo híbrido experimental Pampa Solar en su primera versión



FIGURA 2. Versión final del vehículo, con paneles y carenado

En el diagrama en bloques de la **Figura 3** se muestra el flujo de energía empleado para el funcionamiento del vehículo. La radiación solar constituye la principal fuente de energía, captada mediante paneles solares, y convertida luego en energía eléctrica. A fin de aumentar su eficiencia se instaló un módulo seguidor del Punto de Potencia Máxima (PPM) de la característica potencia-tensión. Siguiendo el flujo de energía, se alimenta la batería que está cargada completamente al inicio y que posee, además, un Sistema de Manejo de Batería (*Battery Management System-BMS*) que constituye un sistema de carga y descarga inteligente que monitorea la tensión de cada célula, protegiéndolas contra sobrecargas y desequilibrio del nivel de carga, asegurando así la capacidad del banco de acumuladores a distintas temperaturas y su vida útil. La mayor cantidad de energía para la carga de la batería proviene de los paneles y una pequeña parte cercana al 10% la proporciona un generador trifásico de imanes permanentes, previo paso por un rectificador para transformarla en tensión continua con el nivel requerido. El generador se acciona mediante el pedaleo del conductor del vehículo, constituyendo un aporte energético humano. La energía llega posteriormente al controlador, el cual alimenta directamente al motor incorporado en la llanta de la rueda trasera del vehículo. Ante desaceleraciones, el motor devuelve energía al sistema, constituyendo un frenado regenerativo.

De acuerdo a las reglas de la competición, el sistema se diseñó de manera que, al momento de la largada en zona plana, las baterías estén cargadas. Durante la aceleración, la mayor parte de la energía utilizada es provista por la batería. Cabe aclarar que, en el caso de un frenado regenerativo, dicha energía recuperada siempre será menor que la utilizada durante la aceleración. De ser necesario iniciar el movimiento con un descenso pronunciado y batería totalmente cargada, el frenado regenerativo no se producirá (motor en rueda libre), debiéndose disipar la energía mediante frenado convencional. Para ello, el vehículo posee frenos a disco, comandados desde el manubrio.

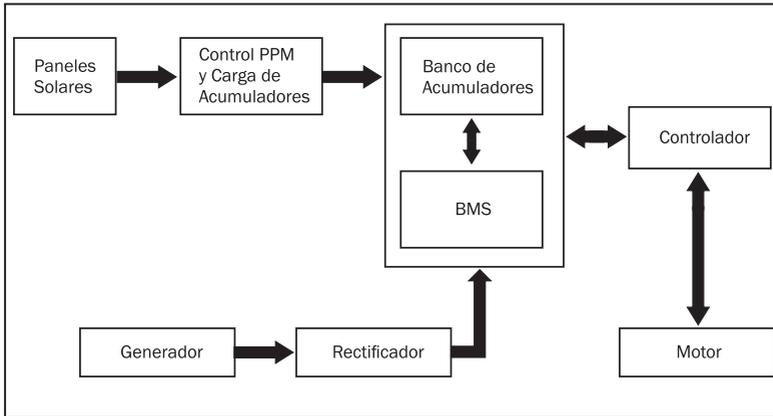


FIGURA 3. Aportes energéticos para el movimiento del vehículo

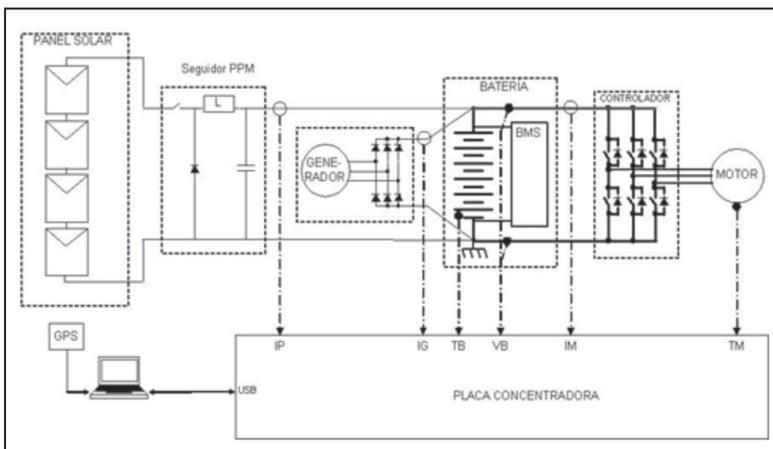


FIGURA 4. Diagrama en bloques

En la **Figura 4** se muestra el diagrama en bloques de los diferentes subsistemas que aportan energía para el movimiento del vehículo y el sistema de medición de variables físicas. Pueden apreciarse allí los paneles solares fotovoltaicos que alimentan una batería de tecnología LiFePO_4 , previo paso por un módulo seguidor del PPM de la característica potencia-tensión, operando en modo reductor de tensión (*buck*). La

tracción eléctrica de alta eficiencia está incorporada en la llanta trasera mediante un motor eléctrico trifásico sincrónico de imanes permanentes, sin escobillas, marca Kelly®, modelo KEB de 48 V - 2 kW, que alcanza una velocidad de 626 rpm en su punto de máximo rendimiento. El motor posee un controlador programable comercial marca Kelly®. Con dicho dispositivo se pueden configurar y cambiar parámetros, además de obtener información de diagnóstico.

El sistema de instrumentación consta de una placa concentradora de las variables medidas por los sensores y está basada en un microcontrolador con interfaz a puerto USB, para comunicación con la PC de a bordo. Se miden las siguientes variables: corriente de panel (IP), corriente de generador (IG), corriente de motor (IM), tensión de batería (VB), temperatura de motor (TM), temperatura de batería (TB) y datos de posición mediante un GPS, con interfaz directa a la PC.

III. Materiales y métodos

III.1. Aspectos generales del chasis

La disposición tipo tricicleta invertida permitió ubicar el motor de tracción en la única rueda trasera, evitando así el empleo de un sistema diferencial, con su correspondiente pérdida energética. Sobre la misma rueda se aplicó un disco de freno con pinza hidráulica comandado por una bomba situada en el semi-manillar izquierdo. Todo el conjunto del tren trasero está montado sobre un horquillón basculante articulado al chasis. Este a su vez cuenta con un resorte amortiguador central tipo mono-shock.

Para el tren delantero se optó por un sistema de eje rígido, de manera de minimizar la cantidad de piezas constitutivas y así optimizar el peso del vehículo. Para el control de la dirección se implementó un sistema de semi-manillares directamente conectados a cada punta de eje, quedando a ambos lados de la butaca del conductor, como se puede apreciar en la Fig.1. Se emplearon puntas de eje de karting de competición dada su robustez, vinculadas por una barra de dirección articulada en sus extremos. Por su aplicación, las puntas poseen reglajes que debieron ser corregidos y adaptados a la geometría del tren delantero de nuestro

vehículo. Uno de ellos es el referido al efecto Ackerman, relacionado con la diferencia de ángulos entre las ruedas del tren delantero en los giros, el cual se ajustó experimentalmente para lograr un correcto radio de giro sin arrastre del tren delantero.

Se emplearon ruedas de bicicleta de montaña de rodado 24" con masas especiales con rodamientos y discos de freno con pinzas mecánicas. Para su comando se realizó un balancín de manera que puedan ser animados por una única palanca situada en el semi-manillar derecho.

III.2. La energía solar fotovoltaica como fuente principal de electricidad

La energía solar fotovoltaica captada por los paneles del techo solar del vehículo constituye la principal fuente de electricidad para el movimiento del vehículo. El sistema colector solar para esta aplicación se diseñó considerando como premisas superficie, energía y peso, involucrando la selección del tipo de celda solar fotovoltaica, el nivel de tensión y, en virtud de ello, la configuración de las celdas integradas, el método de soldadura, material encapsulante y estructura sostén de los paneles. El área plana del techo solar, cubierta por los paneles solares, posee forma rectangular con dimensiones de 1,2 m x 2,5 m, de acuerdo con los límites establecidos por la organización de la competencia.

El arreglo consiste en 171 celdas solares monocristalinas, distribuidas en 5 paneles solares, 4 de ellos con 36 celdas y el restante con 27. Se implementó una configuración de 4 paneles conectados en serie para obtener los 48 V requeridos por el sistema, con la posibilidad de agregar el quinto si fuera necesario. De esta manera y con el área considerada se puede obtener un pico de potencia mayor a los 400 W.

En la **Figura 5a** se pueden observar las celdas empleadas para el proyecto, con dimensiones de 125 mm x 125 mm, las que fueron íntegramente interconectadas y encapsuladas en la Facultad de Ingeniería, empleando un proceso fruto de la investigación sobre diferentes posibilidades de resinas industriales, obteniendo un excelente resultado en transmisión, peso y flexibilidad, con polímero de base estireno. En la **Figura 5b** se muestra el proceso de armado del primer panel de 4 arreglos de 9 celdas en serie, apreciándose la soldadura entre ellas y, en la **Figura 5c**, el techo solar completo.

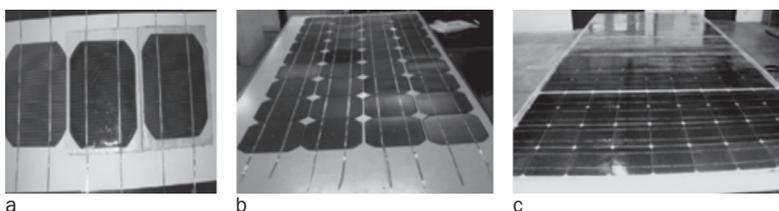


FIGURA 5. Proceso de construcción del techo solar

Los paneles armados fueron comparados con un panel comercial Solartec® KS 50 de similares características, obteniéndose resultados satisfactorios. Para dicho propósito se utilizó un sistema de adquisición de datos basado en PC para obtener los valores de tensiones y corrientes producidos por los paneles, cargados mediante resistores variables. Para la medición de irradiancia se utilizó un piranómetro calibrado de radiación solar como dispositivo patrón.

En la **Tabla 1** se presentan los valores obtenidos de las variables medidas para un panel compuesto por 36 celdas solares monocristalinas y contrastado con un panel comercial de características similares, siendo: A: el área de una celda solar utilizada [m²], I: irradiancia solar [W/m²], V_{max}, I_{max} y P_{max}: tensión, corriente y potencia máxima obtenidos del panel en el punto de potencia máxima [V], [A] y [W] respectivamente, V_{oc}: tensión de circuito abierto e I_{sc}: corriente de cortocircuito.

TABLA 1. Características de panel construido vs. panel comercial similar

Parámetro / Variable	Panel construido	Panel comercial
A [m ²]	0,014	0,013
Número de celdas	36	36
I [W/m ²]	600	600
I _{sc} [A]	3,93	3,28
V _{oc} [V]	19,8	20,2
I _{max} [A]	3,12	2,68
V _{max} [V]	16,6	15,1
P _{max} [W]	51,7	40,4

La evaluación del desempeño de las celdas solares integradas se realizó por medio del factor de forma (FF), de acuerdo con la **expresión (1)** (Dinçer y Meral, 2010):

$$F = \frac{V_{MAX} \times I_{MAX}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (1)$$

El factor de forma establece la relación entre la máxima potencia obtenible del panel solar, determinado por los valores de tensión y corriente máximos, y la potencia teórica determinada por el producto de tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito. Empleando para el cálculo los valores de Tabla 1, se obtiene $FF = 0,66$ para el panel armado y $0,61$ para el comercial, lo que indica un desempeño satisfactorio.

En la Figura 6 se representa la característica tensión-corriente del panel construido, sobrepuesto a la característica teórica determinada por el rectángulo, ilustrándose, así, el concepto de factor de forma. En la **Figura 7** se muestra la característica potencia-tensión, para el panel armado, pudiéndose observar el punto de máxima potencia.

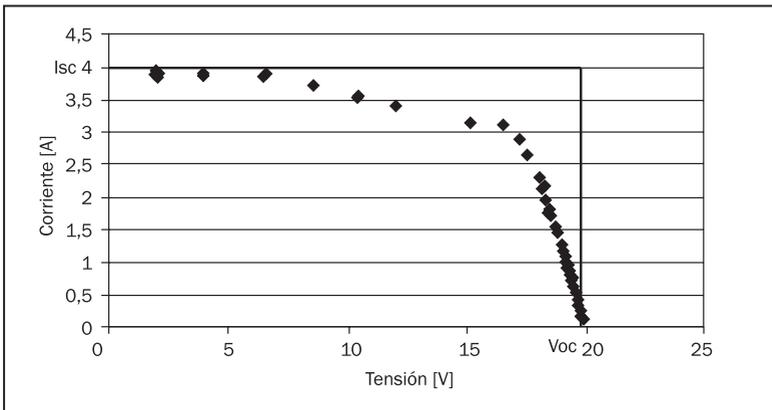


FIGURA 6. Característica Corriente-Tensión del panel solar construido

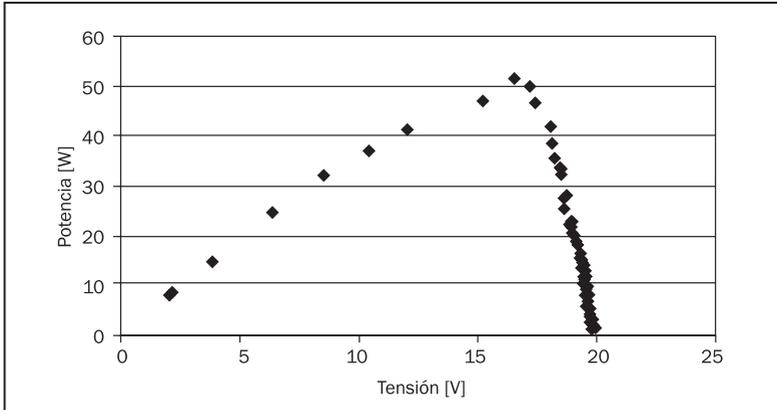


FIGURA 7. Característica Potencia-Tensión del panel solar construido

La eficiencia del panel se obtuvo mediante la **expresión (2)**, siendo N_c el número de celdas integradas en el panel solar. Se obtuvo un valor de 17% para el panel armado y 14,5% para el panel comercial.

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{I \times A \times N_c} \quad (2)$$

III.3. Aporte energético complementario mediante generador

Contextualizando el problema en la acción de pedaleo del conductor, se considera que una persona de constitución física promedio puede trabajar varias horas sin sufrir fatiga y recuperarse rápidamente si se mantiene generando alrededor de 75 W (Whitt y Wilson, 1982). La persona puede realizar un trabajo 3 a 4 veces superior para alcanzar potencias de 300 W en periodos muy cortos de tiempo. Dicha energía es la que se utiliza como aporte para proveer, en ritmo normal, una potencia de alimentación en un rango de 30 a 70 W, dependiendo del estado de carga de los acumuladores. Para este sistema, los elementos utilizados y sus características principales son: corona de 54 dientes, piñón de 12 dientes, cadena, pedales, generador trifásico de imanes permanentes, y rectificador de CA/CC.

III.4. Batería

La batería constituye el acumulador de la energía eléctrica provista por los paneles, el aporte complementario mediante generador y la energía devuelta al sistema durante frenado regenerativo, destacando que su correcto dimensionado establece el grado de autonomía del vehículo.

Se trabajó para establecer una relación adecuada entre peso, volumen, densidad de energía, ciclo de vida, costo e impacto ambiental, lo que derivó en una batería de Fosfato de Litio-Hierro (LiFePO_4), compuesta por 16 arreglos en serie, cada uno de ellos con 7 celdas en paralelo (16S7P), a fin de obtener 48 V - 40 Ah.

Esta tecnología de batería posee características relevantes para su aplicación en vehículos eléctricos, frente, por ejemplo, a las baterías clásicas (Kularatna, 2012). Existen, en este aspecto, aportes de otros grupos de trabajo en el ámbito nacional, con la obtención de resultados promisorios, por ejemplo en Visintin *et al.*, (2011), que permitirían la sustitución de la batería actual por tecnología nacional.

Entre las características más importantes se pueden mencionar: tensión media de celda de 3,2 V - 3,3 V, densidad de energía gravimétrica aproximada de 100 Wh/kg, densidad de energía volumétrica aproximada de 200 Wh/l, rango de temperatura de operación de -20 a 70°C. Representa, además, aproximadamente la mitad del volumen y un tercio del peso de las baterías de plomo-ácido. Otro de los aspectos fundamentales de esta tecnología es que posee un bajo impacto ambiental relativo y está acreditada por la directiva de restricción de sustancias peligrosas (RoHS - Restriction of Hazardous Substances).

III.5. Motor Eléctrico

Para la impulsión del vehículo se utilizó un motor eléctrico trifásico sincrónico de imanes permanentes de 48 V, 2 kW, con eficiencia variable según la carga, aunque superior al 87%. La elección se funda en este tipo de máquina eléctrica por sus características adecuadas para el empleo en vehículos eléctricos (Puranen, 2006). Su principio de funcionamiento se basa en la combinación de campos magnéticos provistos por imanes permanentes y un campo magnético giratorio producido por la corriente alterna de excitación externa. Poseen veloci-

dad constante, sincrónica de acuerdo a la frecuencia de las corrientes de excitación. Mediante el uso de un controlador, es posible variar la frecuencia de la excitación de alterna, variando la velocidad de giro del campo giratorio y, por ende, del motor. La ventaja de este tipo de máquina eléctrica con respecto a las de inducción está directamente relacionada con la ausencia de pérdidas por deslizamiento, además de un incremento en la eficiencia de conversión de energía (Puranen, 2006; Rais y Donsión, 2008).

El motor seleccionado forma parte de la llanta, que con el neumático adecuado constituye la rueda trasera (impulsora) del vehículo y posee frenos a disco incorporados. El rotor del motor es exterior, con 56 polos y 63 ranuras. Posee además, un controlador programable mediante el cual se pueden configurar y cambiar parámetros, además de obtener información de diagnóstico, mediante una conexión RS232 con una computadora. El controlador emplea transistores de potencia de efecto de campo y modulación por ancho de pulso (PWM), con una eficiencia del 99%. La velocidad máxima de rotación del rotor es de aproximadamente 540 rpm, por lo que las frecuencias de las tensiones de alimentación de las bobinas, proporcionadas por el controlador, pueden llegar hasta los 250 Hz.

Un aspecto central de este sistema desde el punto de vista energético es que el conjunto motor-controlador tiene la posibilidad de realizar un frenado regenerativo durante las desaceleraciones, aprovechando así esta energía como un aporte adicional a la carga de la batería.

III.6. Instalación eléctrica

La instalación eléctrica del vehículo se divide en dos sistemas básicos: cableado de potencia y cableado de señales e iluminación.

Desde el punto de vista energético la potencia máxima desarrollada por el motor se utiliza en ocasiones muy específicas, por ejemplo, en tramos bien definidos de la competencia donde se requiere una mayor exigencia al vehículo. Un elevado consumo de potencia de motor agotaría rápidamente la energía entregada por la batería y, a su vez, una velocidad elevada de traslación del vehículo, ocasionaría pérdidas por rozamiento con el aire que podrían ser significativas. Así, la deter-

minación del cableado de potencia se realizó teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Minimización de la cantidad de cables y su peso;
- Ante requerimientos de la potencia máxima del motor, aún en períodos cortos de tiempo, la instalación debe ser capaz de proporcionar la corriente necesaria, con valores máximos del orden de los 60 A.
- Conexión confiable, tanto eléctrica como mecánica. Para ello se utilizaron borneras, terminales y conectores del tipo industrial, capaces de soportar además vibraciones sin riesgo de desconexión.
- Llaves interruptoras dimensionadas de acuerdo con las corrientes del sistema y que permitan una rápida desconexión, tanto desde el interior como del exterior del vehículo, ante situaciones de emergencia.
- Distribución de conductores para minimizar distancias de cableado.

Con respecto al sistema de señales e iluminación, se dimensionaron los conductores primando el criterio de resistencia mecánica, dado los valores de corriente del orden de los miliamperios. De acuerdo con el reglamento de la competencia, se colocaron las luces de posición, freno y guiñe empleando luminarias led de alta luminosidad, alimentadas con 24 V de tensión continua.

III.7. Modelo para el cálculo de potencia consumida

La expresión empleada para el cálculo de la potencia y, por ende, de la energía consumida por el vehículo, se basa en la potencia generada por el conductor de una bicicleta en función de sus parámetros característicos y del medio (Whitt y Wilson, 1982; Navarro, 1985), también utilizada para el caso de una tricicleta (Soto Sepúlveda, 2007).

El modelo se adaptó para tener en cuenta las pendientes de los tramos siguientes, la velocidad actual, las masas en juego y la fricción del viento, entre otros parámetros, de acuerdo con la **expresión (3)**:

$$P_m = \frac{V_m}{\eta} \times \left[M \times g \times \left(R + P + \frac{a}{g} \times \left(1 + \frac{L}{M} \right) \right) + \frac{D \times d_a \times A_f}{2} \times (V_m + V_v)^2 \right] \quad (3)$$

Siendo:

V_m : velocidad del móvil (m/s);

η : rendimiento del sistema ;

M : masa del sistema, considerando el piloto (kg);

g : aceleración de la gravedad (9,8 m/s²);

R : coeficiente de resistencia al giro de la rueda;

P : pendiente del camino;

a : aceleración del sistema (m/s);

L : masa efectiva de la llanta (kg);

D : coeficiente de arrastre aerodinámico;

d_a : densidad del aire (kg/m³);

A_f : área frontal del vehículo (m²);

V_v : velocidad del viento (m/s).

Un aplicativo *software* utiliza los datos de entrada y calcula la potencia modelo. Los datos de posición aportados por el GPS se adquieren y emplean para calcular la pendiente. Parámetros tales como V_m , M , L , A_f , se midieron, otros se calcularon (η , a , P) y estimaron (D , R , d_a , V_v), luego ajustados mediante las pruebas experimentales.

Con los datos de las variables medidas en el vehículo se calculan las potencias de los sistemas energéticos y la potencia del modelo, para realizar el balance energético y determinar la velocidad más conveniente para realizar un uso eficiente de la energía solar. El modelo fue validado en la competencia, con un error acotado.

III.8. Instrumentación electrónica

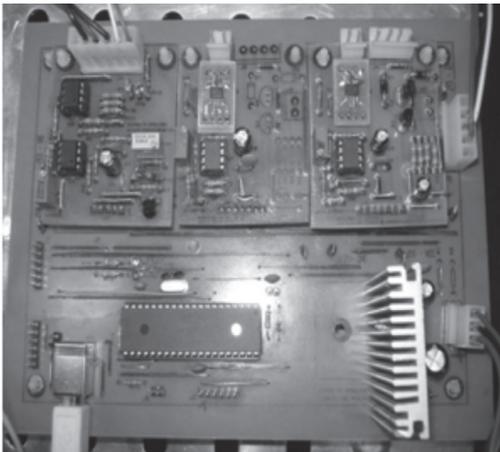
Para que lo comentado anteriormente sea posible, se deben medir un conjunto de variables que incluyen: posición, velocidad del móvil, corrientes de panel, generador y motor respectivamente, tensión de batería y temperaturas de batería y motor. En la **Tabla 2** se presentan las características principales de los sensores utilizados para la medición de las variables físicas consideradas, el rango de medición y su exactitud.

TABLA 2. Variables físicas medidas

	Dispositivo sensor	Rango definido	Exactitud
Corriente panel	Efecto Hall	0-10 [A]	$\pm 1,5$ % a 25 °C
Corriente motor	Efecto Hall	0-60 [A]	$\pm 0,1$ [A]
Corriente generador	Efecto Hall	0-6 [A]	$\pm 1,5$ % a 25 °C
Tensión batería	Divisor resistivo	40-60 [V]	± 1 %
Temperatura batería	Circuito integrado	0-50 [°C]	$\pm 0,5$ [°C]
Temperatura motor	Termistor	0-170 [°C]	$\approx \pm 1,3$ a 6,7 [K]
Posición	GPS	-	10 [m] (2DRMS)
Velocidad	GPS	0-100 [km/h]	0,1 [m/s]

Las variables tensión de batería, temperaturas y las tres corrientes llegan a una placa concentradora que las adquiere y procesa para enviarlas a la computadora utilizando el puerto USB. El GPS posee interfaz directo con la computadora, también mediante puerto USB. En la computadora se ejecuta un aplicativo que muestra la evolución de las variables en un interfaz gráfico con el conductor del vehículo.

En la fotografía de la **Figura 8** se muestra la placa concentradora, que consta de alimentación, microcontrolador e interfaz USB.

**FIGURA 8.** Placa concentradora de las diferentes variables medidas

III.9. Especificaciones generales del vehículo Pampa Solar

En la **Tabla 3** se detallan las especificaciones técnicas principales del vehículo construido, luego de validar su desempeño en la primera competencia de vehículos solares de Latinoamérica, en el desierto de Atacama. La carrera se desarrolló durante tres días, del 30 de septiembre al 2 de octubre de 2011, recorriendo tres tramos principales: 1) Humberstone-Antofagasta (453,8 km), 2) Antofagasta-Calama (214,5 km) y 3) Calama-Iquique (388,3 km).

TABLA 3. Especificaciones generales del vehículo

Parte / parámetro:	Características:
Celdas solares	Monocristalinas
Panel solar completo	4 paneles de 36 celdas - 1 panel de 27 celdas
Potencia máxima panel	445 W
Batería - tecnología	48 V / 40 Ah - LiFePO ₄
Control PPM	Prototipo diseñado
Motor eléctrico	Asincrónico de imanes permanentes de 48 V - 2 kW
Generador eléctrico	Trifásico de imanes permanentes de 48 V - 240 W
Peso	165,5 kg
Velocidad Máxima	55 km/h
Autonomía	150 km (situación solar normal a 40 km/h)
Carenado	Fibra de vidrio

IV. Resultados experimentales

En el gráfico de la **Figura 9** se puede analizar el aporte energético total de cada fuente, en Wh y porcentual, durante los 3 días de competencia, considerando que la energía total consumida fue de 7394 Wh.

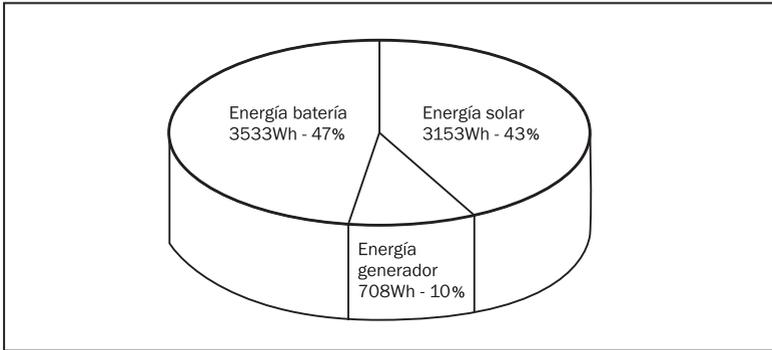


FIGURA 9. Consumo total de energía del vehículo durante la competición

El balance varió de acuerdo con la topología de la ruta transitada. Como ejemplo de ello, en el tramo principal del tercer y más exigente día de carrera (Calama-Iquique), de pendiente negativa como valor medio, el vehículo utilizó el frenado regenerativo, además de las tres fuentes disponibles, consiguiendo recuperación de energía. Este hecho puede apreciarse analizando los datos presentados en la **Tabla 4**, que muestra los tres subtramos de carrera dentro del tramo principal mencionado. Se aprecia un uso total de 70% de energía solar, 9% de energía eléctrica total aportada por el generador y 21% de energía provista por la batería. Si se divide el tramo principal correspondiente al tercer día, en dos subtramos y el enlace entre ellos, tal lo ocurrido en la competición, se observa que, en la primera parte de la carrera, el balance energético fue negativo debido a las fuertes pendientes en bajada y al control utilizado para optimizar el mismo. En el segundo subtramo, en contrapartida, hubo un aporte sustancial de la batería.

TABLA 4. Balance energético total correspondiente al tercer día de competición

Energía - totales (Wh)	1° Sub-tramo	Enlace	2° Sub-tramo	Totales (Wh)
Consumida	388	87	2002	2477
Solar	455	486	798	1739 (70%)
Generador	132	0	84	216 (9%)
Batería	-199	-399	1120	522 (21%)

De acuerdo con los registros del aplicativo, la corriente de motor tomó valores positivos y negativos tal como se puede apreciar en la **Figura 10**, que muestra la evolución de la corriente del motor (en línea gris) y la tensión de batería (en línea negra), en función del tiempo. Se pueden observar los valores negativos de corriente de motor debidos a la recuperación de energía durante el frenado. En esas situaciones, se incrementó la tensión de batería. Se registró un valor pico de corriente de 8,8 A correspondiente a una tensión de batería de 47,6 V. En contraste, para el máximo pico positivo de corriente de 33,9 A, se registró la mínima tensión de batería (44,9 V).

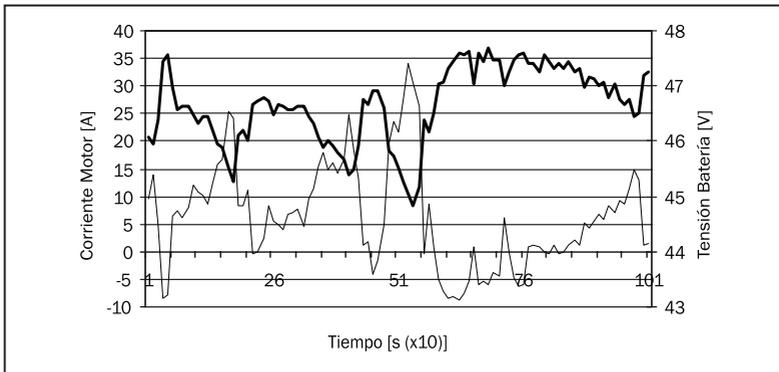


FIGURA 10. Valores de corriente del motor y tensión de batería

IV. Discusión

Al finalizar su participación en la carrera y luego de analizar el conjunto de datos obtenidos, se puede afirmar que se ha cumplido con el objetivo de utilizar la energía solar como fuente principal de electricidad, para el movimiento del vehículo. Este hecho ha sido ratificado con la obtención del premio al uso más eficiente de energía solar durante la competencia.

La participación en un ambiente tan exigente como el desierto fue muy importante para analizar el desempeño del vehículo en todos sus aspectos. La ruta correspondiente al tercer día de carrera, con pendientes pronunciadas, fue esencial para analizar el desempeño del

vehículo en términos de requerimientos de corriente de motor y niveles de tensión de batería.

La obtención de los primeros resultados experimentales permite pensar en su potencial de aplicación en el transporte urbano. No obstante, esto podría validarse en zonas con una alta radiación solar comparada con la radiación Solar Global media diaria anual. Si bien la energía solar puede no ser suficiente en su totalidad para el funcionamiento del vehículo, la utilización en conjunto con la provista por la red eléctrica se encuadra dentro del mismo concepto de vehículo de emisión cero.

Con dichos resultados y los datos almacenados por el vehículo durante su participación en la competencia, se pueden continuar estudiando y mejorando sus diferentes subsistemas. En este sentido, los próximos desafíos apuntan al desarrollo de una nueva versión del vehículo para continuar la investigación sobre partes del mismo, retirando el generador eléctrico y analizando sus posibles aplicaciones al transporte.

El resultado del desarrollo de este trabajo, con carácter multidisciplinario, puede ser utilizado como plataforma para la enseñanza de diferentes aspectos del uso de energía solar y tracción eléctrica.

V. Conclusión

A partir de un proyecto multidisciplinario, se diseñó y construyó un vehículo solar híbrido experimental y se validó su desempeño en la primera competición de autos solares de Latinoamérica, denominada Desafío Solar Atacama y desarrollada en el Desierto de Atacama, Chile hacia fines del año 2011. El comportamiento de la mecánica, electricidad y electrónica del vehículo, así como de los sistemas energéticos, especialmente el sistema de paneles solares fotovoltaicos, demostraron un grado de confiabilidad muy auspicioso.

Se presentaron los aspectos principales del vehículo, con énfasis en los sistemas energéticos y, en especial, sobre el empleo de la energía solar fotovoltaica como fuente principal de electricidad.

Se destaca, además, que la investigación durante las distintas fases del proyecto condujo al uso de baterías de Fosfato de Litio-Hierro, que poseen características relevantes para su empleo en vehículos eléctricos.

cos, considerando su eficiencia y su menor grado de impacto ambiental, comparadas con baterías tradicionales.

Referencias bibliográficas

- ABBOTT, D. (2010). Keeping the energy debate clean: how do we supply the world's energy needs?, en: *Proceedings of the IEEE*; 98 (1): 42-66.
- AL ZAHER, R.; DE GROOT, S.; POLINDER, H.; WIERINGA, P. (2010). Comparison of an axial flux and a radial flux permanent magnet motor for solar race cars. (pp. 1-6). En: *Proceedings of International Conference on Electrical Machines*; Rome (Italy), 6-8 sept.
- BOSSA, J. L.; MAGALLÁN, G. A.; DE ANGELO, C. H.; GARCÍA, G. O. (2010). Implementation of a Supervisory Control System for an Electric Vehicle. (pp. 1-5). En: *Proceedings of IEEE International Conference on Industry Applications*; Sao Paulo (Brasil); 8-10 nov.
- BRADY, J.; O'MAHONY, M. (2011). Travel to work in Dublin. The potential impacts of electric vehicles on climate change and urban air quality, en: *Journal of Transportation Research*; Part D 16: 188-193.
- CAIRNS, E. J. (1992). A new mandate for energy conversion: zero emission (electric) vehicles. (pp. 310-313). En: *Proceedings of IEEE 35th International Power Sources Symposium*; Cherry Hill (NJ, USA); 22-25 jun.
- CONNORS, J. (2007). On the subject of solar vehicles and the benefits of the technology. (pp. 700-705). En: *Proceedings of International Conference on Clean Electrical Power*; Capri (Italy); 21-23 mayo.
- DINÇER, F.; MERAL, M. E. (2003). Critical factors affecting efficiency of solar cells. *Smart Grid and Renewable Energy*; 1(1): 47-50. [En línea], Disponible en: <<http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?paperID=1947#.U3zSv3Ygu18>> [junio 28, 2012].
- KING, R. J. (1990). Photovoltaic applications for electric vehicles, (pp. 977-981). En: *Proceedings of Photovoltaic Specialist Conference*; Kissimmee (FL, USA); 21-25 mayo.
- KING, R. J. (1991). Recent solar car technology developments including Australian World Solar Challenge results. (pp. 629-634). En: *Proceedings of Photovoltaic Specialist Conference*; Las Vegas (NV, USA); 7-11oct.
- KULARATNA, N. (2011). Rechargeable batteries and their management, en: *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*; 14 (2): 20-33.
- LOVATT, H.; RAMSDEN, V. S.; MECROV; B. C. (1998). Design of an in-wheel motor for a solar-powered electric vehicle, en: *IEE Electric Power Applications*; 145 (5): 402-408.
- LU REN et al. (2009). EV energy storage monitoring system based on distributed data acquisition. (pp.1386-1389). En: *Proceedings of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*; Dearborn (MI, USA); 7-10 sept.
- MAGALLÁN, G. A.; DE ANGELO, C. H.; BISHEIMER, G.; GARCÍA, G. (2008). A neighborhood electric vehicle with electronic differential traction control. (pp. 2757-2763). En: *Proceedings of IEEE Industrial Electronics Annual Conference*; Orlando (FL, USA); 10-13 nov.
- MAGGETTO, G.; VAN MIERLO, J. (2000). Electric and electric hybrid vehicle technology: a survey. (pp.1/1-11). En: *Proceedings of IEE*

- Seminar on Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles*; Durham (UK); 11 abril.
- MANGU, R.; PRAYAGA, K.; NADIMPALLY, B.; NICAISE, S. (2010). Design, development and optimization of highly efficient solar cars: Gato del Sol I-IV. (pp. 1-6). En: *Proceedings of Green Technology Conference*; Grapevine (TX, USA); 15-16 abril.
- MOMOH, O. D.; OMOIGUI, M. O. (2009). An overview of hybrid electric vehicle technology. (pp. 1286-1292). En: *Proceedings of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*; Dearborn (MI, USA), 7-10 sept.
- NAVARRO, R.A. (1985). Las bases científicas de la bicicleta. (pp. 447-454). En: NAVARRO, R. A.; HEIERLI, U.; BECK, V. (Comp.). *Alternativas de transporte en América Latina: la bicicleta y los triciclos*. Suiza: Skat.
- PURANEN, J. (2006). *Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in control applications: a comparative study*. Tesis doctoral. Finland: Lappeenranta Univ. of Technology. Disponible en: < <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/31238/TMP.objres.448.pdf?sequence=1> > [fecha de consulta]
- RAIS, J.; DONSIÓN, M. P. (2008). Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM). Parameters influence on the synchronization process of a PMSM, (pp. 1-5). En: *Proceedings of IEEE International Conference on Renewable Energies and Power Quality*; Santander (Spain), 12-14 marzo.
- REDPATH, D.A.G.; McILVEEN-WRIGHT, D.; KATTAKAYAM, T.; HEWITT, N. J.; KARLOWSKI, J.; BARDI, U. (2011). Battery powered electric vehicles charged via solar photovoltaic arrays developed for light agricultural duties in remote hilly areas in the Southern Mediterranean region, en: *Journal of Clean Production*; 19 (17-18): 2034-2048.
- SHIN, J.; HONG, J.; JEONG, G.; LEE, J. (2012). Impact of electric vehicles on existing car usage: a mixed multiple discrete-continuous extreme value model approach, en: *Journal of Transportation Research*; Part D 17: 138-144.
- SITU, L. (2009). Electric vehicle development: the past, present & future, en: (pp. 1-3). En: *Proceedings of the 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications*; Hong Kong, 22-22 mayo.
- SOLANGIB, K.H.; ISLAMB, M.R.; SAIDURA, R.; RAHIMB, N.A.; FAYAZB, H. (2011). A review on global solar energy policy, en: *Renewable and sustainable energy reviews*; 15 (4): 2149-2163.
- SOTO SEPÚLVEDA, E. A; FUENTES FUENTEALBA, R.; STOLZ KESTEN, G.; LEIVA BLANCO, N. (2007). *Diseño y construcción de una tricicleta solar impulsada por motor DC con freno regenerativo*. Memoria. Chile: Universidad Técnica Federico Santa María; 1-94.
- SPINA, M.; ROSSI, S.; DE LA VEGA, R.; SANTILLÁN, G.; PERALTA, M.; CIANCIO, P.; PICO, L. (2012). Vehículo Híbrido Experimental Pampa Solar, (pp. 1-7). En: *Actas del 23° Congreso Argentino del Control Automático*; Buenos Aires; 3-5 oct.
- USTUN, O.; YILMAZ, M.; GOKCE, C.; KARAKAYA, U.; TUNCAY, R. N. (2009). Energy management method for solar race car design and application. (pp. 804-811). En: *Proceedings of IEEE International Conference on Electrical Machines and Drives Conference*; Miami, (USA), 3-6 may.
- VISINTIN, A.; THOMAS, J. E; CASTRO, B; MILOCCO, R; REAL, S; SACCO, J; GARAVENTTA, G; TRIACCA, W. (2011). Presente y futuro de la tecnología de baterías de Ion-Litio: el proyecto de investigación y desarrollo de prototipos de baterías para automóviles eléctricos en la UNLP. (pp. 1-4). En: *Actas de Hidrógeno*

- y *Fuentes Sustentables de Energía (HYFUSEN)*; Mar del Plata; 6-9 junio.
- WAMBORIKAR Y.S.; SINHA, A.(2010). Solar powered vehicle. (pp.1-4). En: *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*; San Francisco (USA), 20-22 oct.
- WEISS, H.J.; WEISS, H.; LOPATKIN, A.N.; LOPATKIN, N.N. (2010). True zero-emission vehicle energy generation and measurement in student's educational project. (pp. 86-92). En: *Proceedings of the 10th International Scientific-Technical Conf. on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering*; Russia, 22-24 sept.
- WHITT, F.R.; WILSON, D.G. (1982). *Bicycling Science*. U.S.A: The MIT Press.