

Desarrollo de un vehículo experimental con sistema híbrido de energía

Patricia Mónica Ciancio

Correo electrónico:pciancio@fio.unicen.edu.ar

Artículo original

María Haydée Peralta

Correo electrónico:mperalta@fio.unicen.edu.ar

Leonel Osvaldo Pico

Correo electrónico:lpico@fio.unicen.edu.ar

Marcelo Alberto Spina

Correo electrónico:mspina@fio.unicen.edu.ar

Silvano Renato Rossi

Correo electrónico:srossi@fio.unicen.edu.ar

Roberto Juan de la Vega

Correo electrónico:rjdlv@fio.unicen.edu.ar

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina

Resumen

La primera competencia latinoamericana de vehículos solares, en la categoría la *Ruta Solar*, a través del desierto de Atacama, Chile (2011) dio origen a un proyecto interdisciplinario para fomentar el uso de energías sustentables aplicadas al transporte urbano, sin empleo de combustibles fósiles nocivos al medio ambiente. Se apuntó al desarrollo de un vehículo con mínimo consumo de energía para su transporte, liviano, estable, de bajo costo y emisión cero basado en la combinación de energía solar fotovoltaica y energía eléctrica obtenida mediante un generador accionado por tracción humana, ambas almacenadas en una batería. En este trabajo se presentan los aspectos inherentes a las etapas del proyecto y ejecución de un vehículo híbrido experimental, denominado *Pampa Solar*. Ello comprende la concepción y dimensionado de la estructura resistente, adopción de la configuración de celdas solares, dimensionado y selección de la batería, generador trifásico y desarrollo de la instrumentación electrónica; respetando las bases de la competencia y las cargas pertinentes. El análisis de los resultados obtenidos de los sistemas eléctrico, electrónico, mecánico y energético del vehículo, durante la competencia, demostraron un desempeño confiable, obteniendo el premio al uso más eficiente de la energía solar.

Palabras claves: energías sustentables, vehículo experimental, energía solar fotovoltaica, celdas solares, competencia *La ruta Solar*.

Recibido: 7 de diciembre del 2012

Aprobado: 3 abril del 2013

INTRODUCCIÓN

La utilización de energías alternativas, renovables, limpias y de aplicación sustentable se ha convertido actualmente en una necesidad. En particular, el sector de transportes constituye una de las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero y polución ambiental [1]. Se buscan, mundialmente, alternativas basadas en el uso de energías limpias y emisión cero para remplazar los vehículos propulsados por motores de combustión interna que operan con combustibles fósiles, en los cuales el dióxido de carbono

generado, entre otros, posee una contribución directa a la emisión de gases de efecto invernadero [2, 3].

Actualmente se nota un crecimiento más acentuado de propuestas científico-tecnológicas que aportan al desarrollo de *vehículos eléctricos* (VE), *vehículos eléctricos híbridos* (VEH) y *vehículos de emisión cero* (VEC). En el caso de un VE ocurre tracción por uno o varios motores eléctricos, alimentados por una fuente externa o un medio acumulador de energía eléctrica. Por otro lado, un VEH combina un motor de combustión interna y una máquina eléctrica, a fin de alcanzar mejor desempeño y economía de combustible

[4, 5]. Diferentes desarrollos pueden verse en los sucesivos salones del automóvil en distintas partes del mundo y, aunque existen casos relevantes [6], la presencia en el mercado aún es incipiente y se da fundamentalmente con tecnología híbrida que combina dos o más sistemas energéticos.

En referencia a la emisión cero y de acuerdo con el trabajo publicado por E. J. Cairns [7], la industria automovilística interpretó al VEC como un vehículo eléctrico alimentado por batería, lo que trajo aparejado el desarrollo de baterías de alta eficiencia como, por ejemplo, las baterías de *litio-ion* y las de flujo redox de vanadio (VRB) [8]. Este importante avance en tecnologías de baterías junto a la relevancia de la energía solar como fuente de energía renovable y el desarrollo de los módulos solares fotovoltaicos, dan un nuevo impulso al desarrollo de vehículos eléctricos híbridos [9, 10]. En términos básicos, un vehículo solar de emisión cero es alimentado por energía solar mediante paneles compuestos por módulos fotovoltaicos, con almacenamiento de energía en baterías y la tracción se obtiene mediante un motor eléctrico [11].

De acuerdo con un reciente estudio publicado por Shin *et al.* [12] y luego de un exhaustivo análisis de cómo los vehículos eléctricos pueden influir sobre el uso de los vehículos existentes, concluye que el potencial de mercado futuro de los VE es mayor que el de los híbridos y los clásicos con motores de combustión interna.

Por este motivo y el desafío de vincular el conocimiento científico-tecnológico a los intereses globales de un planeta sustentable, promoviendo el uso de energías renovables y limpias, se decidió diseñar y construir un vehículo eléctrico híbrido experimental, con el empleo de energía solar fotovoltaica como fuente principal de electricidad. La iniciativa parte de un grupo interdisciplinario de docentes, investigadores, estudiantes de ingeniería avanzados y no docentes. Así, se logró un vehículo solar experimental que combina energía solar fotovoltaica como fuente principal de electricidad y energía eléctrica provista por un generador accionado mediante el pedaleo de un conductor. El vehículo construido consta de una batería para almacenar la energía provista por ambos sistemas.

Desde el punto de vista de la aplicación de energías alternativas, el objetivo del proyecto es alcanzar el menor consumo posible de energía para el movimiento del vehículo, empleando una estructura liviana y estable, de bajo costo y emisión cero. Desde el punto de vista del trabajo institucional e interdisciplinario el objetivo es viabilizar la participación del vehículo en la competencia la *Ruta Solar*, a realizarse en Chile, en sus sucesivas ediciones, la que constituye un espacio para que los países latinoamericanos puedan mostrar los avances en vehículos que funcionen con energía fotovoltaica. El vehículo denominado *Pampa Solar* participó de la primera edición (2011) de la *Ruta Solar*, en el desierto de Atacama, donde luego de la carrera, fue galardonado con el premio al uso más eficiente de la energía solar.

CONDICIONES GENERALES Y DE DISEÑO PARA LA COMPETENCIA

Entre las reglas generales de la competencia, establecidas para la edición 2011, se destacan las siguientes [13]: a) El recorrido que deben realizar los equipos durante los 3 días de competencia comprende un itinerario establecido entre las ciudades de Iquique, Calama y Antofagasta por el desierto más árido del mundo, con una extensión aproximada de 1 060 km; b) En la categoría la *Ruta Solar*, el vehículo debe ser impulsado por energía solar y aporte humano, cumpliendo una serie de pruebas de seguridad para poder competir; c) En funcionamiento, el vehículo no debe exceder los 2,5 m de largo, 1,2 m de ancho y 1,8 m de alto; con al menos tres puntos de apoyo funcionales y al menos un ocupante; d) Al menos el 50 % de la energía utilizada durante la competencia debe ser energía solar; e) Los vehículos deben tener un asiento con una base y un respaldo, que permita apoyar toda la espalda, con inclinación no mayor a 27° con respecto a la vertical, pues la conducción del vehículo en un ángulo mayor puede inducir fatiga, dificultar la visión y evitar el correcto funcionamiento del cinturón de seguridad en caso de colisión; f) Los vehículos deben poder realizar una curva en "U" en ambas direcciones en una pista de 9 m de ancho; g) La velocidad promedio mínima desde una parada de control a otra debe ser de 30 km/h.

Además de esto, se respetaron otros requisitos en relación con los componentes eléctricos y demás accesorios establecidos en las bases de la competencia.

MÉTODOS Y MATERIALES

Aspectos estructurales

El vehículo solar consta de una estructura apoyada sobre tres ruedas, con forma de una tricicleta invertida, para un solo conductor en posición decumbente. El desarrollo incluye, por un lado, la etapa del proyecto y diseño del chasis del vehículo, teniendo como premisa un trabajo estructural optimizado para lograr el menor consumo energético posible para la circulación del móvil y, por otro, el proyecto, diseño y cálculo de la estructura resistente o pantalla plana sobre la que se distribuyen los paneles solares.

La primera fase de proyecto condujo a la consideración de diferentes materiales, tipologías, formas de sustentación y uniones, empleando modelos de análisis hasta arribar a la solución del problema. En la figura 1 se muestra el modelo primario utilizado para analizar el comportamiento estructural del chasis, siendo: 1. el tramo resistente principal; 2. el tramo inclinado, apoyo de la butaca del conductor; 3. el sistema de amortiguación; 4. dos brazos en ángulo para la instalación de las ruedas; 5. barra de extensión soporte de un sistema telescópico para la regulación de la posición de la caja pedalera; 6. horquilla trasera, para colocación del motor eléctrico y 7. vínculo entre tramo principal y horquilla.

Para la simulación de las cargas de servicio del vehículo, se tomaron superposiciones de acciones a través de distintas hipótesis. Se consideró sobre el tubo principal (1), una carga distribuida lineal que simula el peso del conductor; se dispuso una carga horizontal en el extremo del tubo 5 para

simular el empuje producido por el conductor al pedalear y por último las cargas provenientes del panel solar. Las cargas de viento consideradas [14] fueron obtenidas a partir de las velocidades máximas correspondientes al mes de septiembre de la zona de la competencia, siendo su magnitud de 11 m/s. A efectos de determinar las presiones más desfavorables se utilizó la normativa de Argentina. La carga normal a la superficie inclinada en el caso del análisis del chasis fue considerada según dos componentes ortogonales en el tubo alrededor del cual gira el panel. Asimismo, se contempló la estabilidad del conjunto considerando una carga horizontal correspondiente al 10 % del total de las cargas verticales, dispuesta longitudinalmente en el tubo sostén del techo solar. Por otro lado, se consideró una hipótesis que combina las cargas detalladas con un estado que representa una colisión frontal, mediante una carga distribuida en el pórtico delantero equivalente a cuatro veces el peso total del vehículo, incluido el conductor.

Durante la segunda fase de proyecto se diseñó y calculó la estructura resistente [15] sobre la que se distribuyeron los paneles solares y la estructura que le sirve de sostén y de unión al chasis del vehículo. En figura 2 se muestra el modelo de análisis utilizado en esta instancia. En la figura 3 se puede apreciar la vista frontal del sistema mostrado en la figura 2 con sus cotas correspondientes. En ambos casos la modelización estructural se realizó mediante el uso de un software comercial que emplea el método de los elementos finitos [16]. Tanto para el chasis, como para la estructura sostén de la pantalla se utilizaron elementos lineales de 2 nodos y para la pantalla se efectuó una combinación de elementos lineales y planos, estos últimos de 4 nodos.

La pantalla de 1,2 m · 2,4 m está constituida por una placa plana realizada con fibras de vidrio embebidas en una resina poliéster que apoya sobre un sistema de emparillado, conformado por tubos rectangulares constituidos por una aleación de aluminio 6063 T6 [17, 18]. Dicho entramado, que sirve de sostén a la trama-resina y le confiere rigidez en su plano, también se impregna con la resina para formar una unión solidaria entre las distintas partes del conjunto. La pantalla plana tiene un movimiento de rotación sobre la barra rigidizante que posibilita un giro de $\pm 35^\circ$ respecto de una línea horizontal. Para la placa se considera una presión estática de 270 Pa, que incluye cargas muertas y cargas vivas, adicionando un factor multiplicador de 1,5 a dicha presión para contemplar el efecto dinámico del viento.

En ellas se considera el peso propio y el viento actuando en la posición más desfavorable, esto es, con el panel dispuesto según la máxima inclinación. Asimismo, se asignan fuerzas laterales de una magnitud del 10 % de la presión estática, ubicadas sobre los nodos de uno de los lados mayores de la placa para considerar asegurar la estabilidad correspondiente. La altura total del vehículo es de 1,40 m.

Las propiedades mecánicas de los materiales utilizados se presentan en la tabla 1, y en la figura 4 se muestra una imagen del primer prototipo del vehículo *Pampa Solar*, sin la carrocería, con el que se realizaron las primeras pruebas.

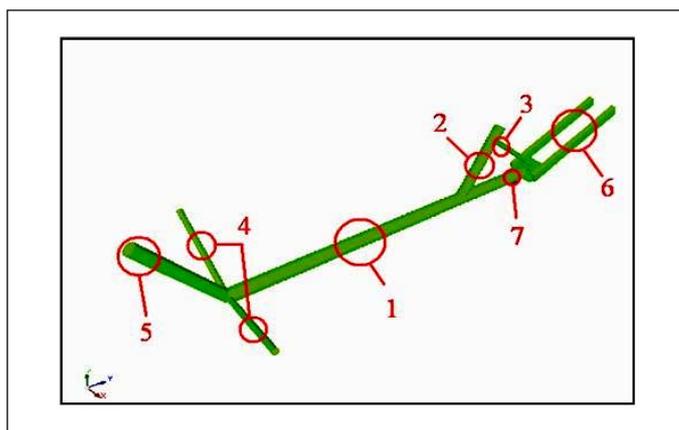


Fig. 1. Modelo primario para análisis estructural del chasis

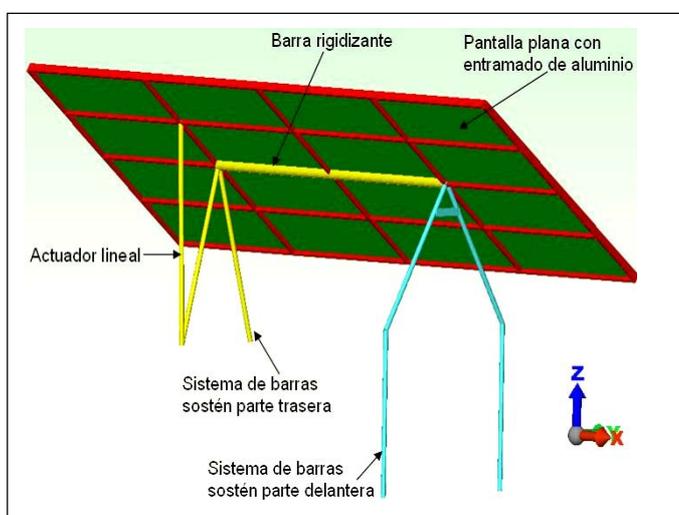


Fig. 2. Esquema estructural del panel solar y su estructura de sostén

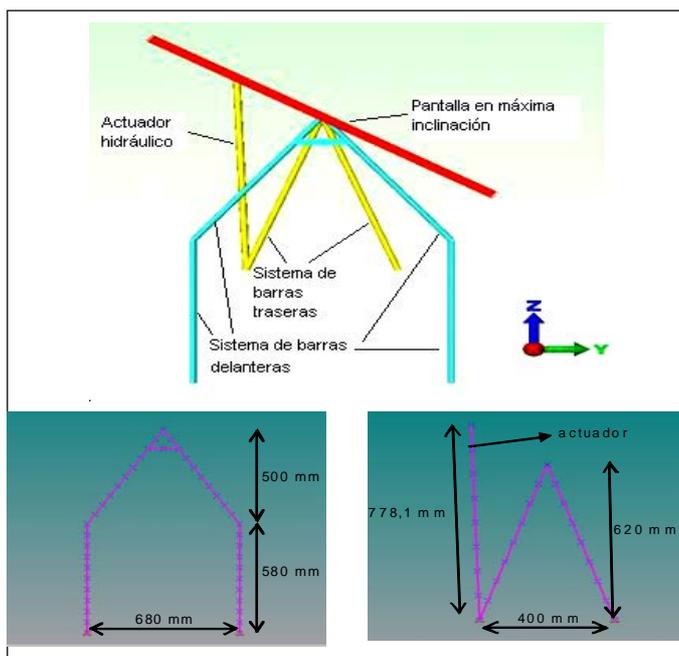


Fig. 3. Vista frontal del panel solar y cotas de su estructura sostén

Tabla 1 Propiedades de los materiales empleados en la estructura				
Parte estructural	Material	Densidad [N/m ³]	Módulo elástico [N/m ²]	Módulo de Poisson
Chasis - Sist. barras traseras, delanteras y rigidizante	Acero	78 550	2 · 10 ¹¹	0,29
Entramado de pantalla	Aluminio	27 000	6,98 · 10 ¹⁰	0,33
Placas de pantalla	Matriz poliéster reforzada con fibra de vidrio	23 200	3,60 · 10 ¹⁰	0,23



Fig. 4. Imagen del vehículo *Pampa Solar* sin carrocería

Aspectos eléctricos

La tracción eléctrica de alta eficiencia está incorporada en la llanta trasera con un motor eléctrico trifásico sincrónico de imanes permanentes de 48 V - 2 kW (figura 4), que alcanza una velocidad de 626 rpm en su punto de máximo rendimiento. El motor posee un controlador programable para configurar y cambiar parámetros y obtener información de diagnóstico

El vehículo diseñado compatibiliza la utilización de energía eléctrica a partir de tres fuentes diferentes: paneles solares fotovoltaicos, generador accionado por el pedaleo de un conductor y baterías. En la figura 5 se representan, esquemáticamente, los sistemas energéticos que componen el vehículo.

La energía solar fotovoltaica se obtiene de 5 paneles solares que alimentan la batería a través de un módulo seguidor del punto de máxima potencia de la característica potencia-tensión, operando en modo reductor de tensión. De esta manera se puede obtener la mayor energía posible de la

radiación, en función del ángulo de incidencia. En el diagrama en bloques también se puede apreciar el convertidor, el módulo de control de velocidad y frenado regenerativo, para recuperación de energía durante frenado y desaceleraciones y el motor eléctrico.

Asimismo, el conductor del vehículo, en función del análisis de las variables medidas y visualizadas en pantalla, opera un mecanismo de pedales dispuesto en el frente del vehículo para activar un generador trifásico sin escobillas. Esto constituye un aporte complementario de energía y depende de las capacidades físicas del conductor. A la salida del generador se hace necesaria una rectificación CA/CC trifásica, a fin de suplir un nivel de tensión continua conveniente a la batería.

La batería constituye el sistema de almacenamiento de la energía eléctrica provista por los paneles y la contribución cuando los requerimientos del motor tienen una solicitud de potencia superior a la que ingresa. Antes del ingreso a las baterías se dispone de un sistema de carga y descarga inteligente denominado BMS (Battery Management System) que monitorea la tensión de cada célula, protegiéndolas contra sobrecargas y desequilibrio del nivel de carga, asegurando así la capacidad del conjunto a distintas temperaturas y su vida útil.

El vehículo posee, un compartimiento trasero, para alojamiento de la electrónica y una computadora portátil. Este cuenta además, con un sistema de medición de variables físicas y un sistema de adquisición de datos con interfaz a la computadora portátil. Desde la cabina del vehículo se puede visualizar la evolución de las variables medidas en un monitor compacto. Sobre la estructura tipo tricicleta y detrás del asiento del conductor se dispone la batería. Desde un pequeño panel frontal el conductor puede accionar el actuador lineal.

Los módulos de acondicionamiento de señales para la medición de las distintas variables físicas, incluyen: tensión y corriente tanto de la producción de energía fotovoltaica y humana, como el consumo energético de la tracción, medición de temperatura de baterías y adaptadores de señales de GPS.

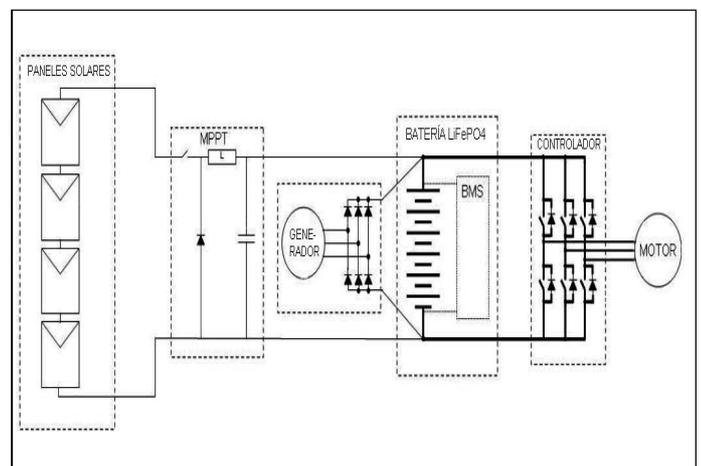


Fig. 5. Diagrama en bloques de sistemas energéticos

Módulos solares fotovoltaicos

El área plana del techo solar posee formato rectangular de 1,2 m · 2,4 m, dentro de los límites impuestos según las reglas 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 obtuvo un pico de potencia de 445 W.

Las celdas solares poseen una dimensión de 125 mm x 125 mm y una eficiencia de 18 % especificada para una radiación solar de 1 kW/m² a 25 °C. En la figura 6 se pueden observar las celdas empleadas para el proyecto, las que fueron íntegramente interconectadas y encapsuladas en la Facultad de Ingeniería, empleando un proceso obtenido de la investigación sobre diferentes posibilidades de resinas industriales, obteniendo un excelente resultado en transmisión, peso y flexibilidad, con polímero de base estireno. Los diversos ensayos de contraste, utilizando un piranómetro calibrado de radiación solar como dispositivo patrón, efectuados en meses de baja radiación, arrojaron resultados satisfactorios tanto en eficiencias alcanzadas (17 %) como en flexibilidad, peso obtenido (10 kg el conjunto de 3 m²) y costo final, representando un tercio del valor de módulos comerciales.



Fig. 6. Fotografía de las celdas solares interconectadas y encapsuladas en los paneles solares

Aporte complementario

Hay una contribución adicional de energía que se da a través del aporte del conductor del móvil quien, mediante pedaleo, acciona el generador trifásico. Desde el punto de vista de las capacidades físicas del piloto es importante considerar que, en el caso de una bicicleta convencional, se realiza un movimiento cíclico y a una velocidad variable que puede alcanzar las 80 rpm [19].

La bibliografía consultada permite analizar algunos valores que cuantifican la potencia que puede suministrar un ser humano sin sufrir fatiga ni daño físico [20, 21]. Aunque los

factores que influyen pueden ser muy variados, incluyendo temperatura, altitud, presión y humedad ambiente, se considera, en términos generales, que una persona de constitución física promedio puede trabajar varias horas sin sufrir fatiga y recuperarse rápidamente si se mantiene generando un valor cercano a los 70 W.

La energía mencionada 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 y rectificador de CA/CC.

Batería

El dimensionado correcto de la batería establece el grado de autonomía del vehículo [22]. El objetivo es encontrar una relación adecuada entre peso, volumen, densidad de energía, ciclo de vida, costo e impacto ambiental. Se estudian alternativas y tecnologías existentes en el mercado para determinar una relación conveniente entre los parámetros indicados anteriormente. Luego de pruebas y análisis comparativos entre diferentes tipos de acumuladores de energía [23 - 26] se seleccionó una batería de fosfato de litio-hierro (LiFePO₄), compuesta por 16 arreglos en serie, cada uno de ellos con 7 celdas en paralelo (16S7P), a fin de obtener 48 V - 40 Ah.

La elección recae sobre la tecnología LiFePO₄ por sus características relevantes para su aplicación en vehículos eléctricos, frente, por ejemplo, a las baterías clásicas. En este aspecto, hay aportes de otros grupos de trabajo en el ámbito nacional, con la obtención de resultados promisorios [27]. 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 y un elevado ciclo de vida cercano a los 2 000 ciclos (@ 80% DOD (Discharge Operation Deep)) [23]. Además, representa 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 RoHS (Restriction of Hazardous Substances).

VERSIÓN FINAL DEL VEHÍCULO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la figura 7 se muestra el vehículo eléctrico híbrido *Pampa Solar*, en su versión final, con el carenado realizado como medio de protección para el conductor según disposiciones de la competencia y, en la figura 8, el vehículo circulando por un tramo exigente de la competencia, con pendientes acentuadas. Las principales especificaciones técnicas del vehículo se describen en la tabla 2.

La carrera se desarrolló durante tres días, recorriendo tres tramos principales: 1. Humberstone-Antofagasta (453,8 km), 2. Antofagasta-Calama (214,5 km) y 3) Calama-Iquique (388,3 km).

El gráfico de la figura 9 muestra el balance energético total de la carrera durante los 3 días, donde se puede analizar el aporte energético total de cada fuente, en Wh y porcentual, considerando que la energía total consumida fue de 7 394 Wh.

Fueron notables las diferencias de dicho balance según la topografía de la ruta transitada. Como ejemplo de ello, en el tramo principal del tercer día de carrera (Calama-Iquique), de pendiente negativa como valor medio, el vehículo empleó el frenado regenerativo, además de las tres fuentes disponibles, consiguiendo recuperación de energía. Este hecho puede apreciarse a partir de los datos presentados en la tabla 3, que muestra tres subtramos de carrera dentro del tramo principal mencionado.

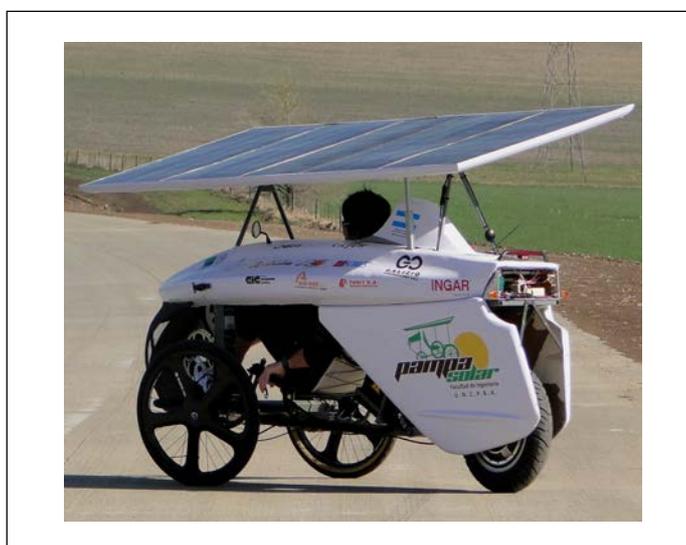


Fig. 7. Versión del modelo terminado



Fig. 8. Pampa Solar en un tramo de la competencia

Se aprecia un uso total de 70% de energía solar, 9% de energía eléctrica total aportada por el generador activado mediante el pedaleo del conductor 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 competencia, se observa que en la primera parte de la carrera el balance energético fue negativo debido a las bajadas con marcada pendiente y al control utilizado para optimizar el mismo. En el segundo subtramo, en contrapartida, hubo un aporte sustancial de la batería.

En la tabla 4 se muestran los valores máximos de potencia del motor, potencia solar, corriente del generador y velocidad, correspondientes al mismo tramo considerado en la tabla 3.

Tabla 2 Especificaciones técnicas del vehículo	
Chasis Tramos 1-2 y 5	Tubos estructurales 40x40x1,6 [mm]
Chasis tramo 4	Tubo estructural 30x50x1,6 [mm]
Chasis tramo 6	Tubo estructural 40x20x1,6 [mm]
Portaequipaje	Tubos estructurales cuadrados 20x1,6 [mm]
Emparrillado pantalla	Tubos de aluminio 12x30x1,5 [mm]
Placa	PRFV (plástico ref. con fibra de vidrio) 1200x2400x1,5 [mm]
Estructura sostén delantera	Tubos redondos de acero de 19,05 mm, espesor 2 mm
Estructura sostén trasera	Tubos redondos de acero de 19,05 mm, espesor 1,25 mm
Barra rigidizante	Tubo redondo de acero de 40,04 mm, espesor 2 mm
Actuador hidráulico	Diámetro 20 mm
Celdas solares	Monocristalinas
Paneles solar	4 paneles de 36 celdas - 1 panel de 27 celdas
Potencia máxima panel	445 W
Batería - tecnología	48 V / 40 Ah - LiFePO4
MPPT	Diseñado/comercial
Motor eléctrico	48 V - 2 kW - sin escobillas
Generador eléctrico	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

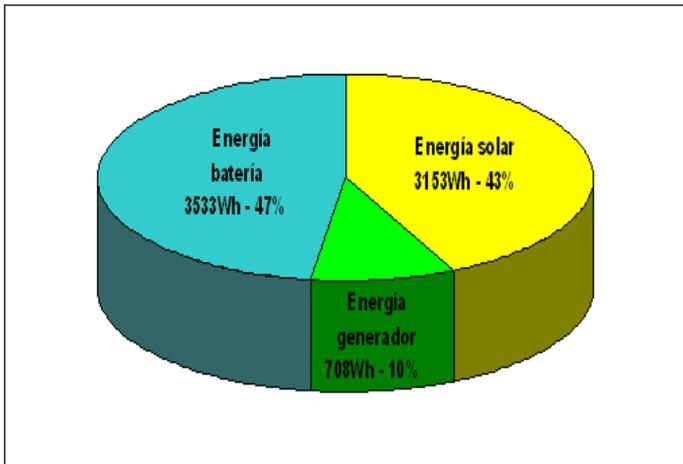


Fig. 9. Balance energético del desempeño del vehículo luego de finalizada la competencia

Tabla 3
Balance energético total considerando tres subtramos correspondientes al tercer día de carrera

Energía - Totales (Wh)	1º Subtramo	Enlace	2º Subtramo	Totales (Wh)
Consumida	388	87	2002	2 477
Solar	455	486	798	1 739 (70%)
Generador	132	0	84	216 (9%)
Batería	-199	-399	1 120	522(21%)

Tabla 4
Valores máximos de las variables medidas considerando tres subtramos correspondientes al tercer día de carrera

Variable (valor máximo)	1º Subtramo	Enlace	2º Subtramo
Potencia motor (W)	2 125	0	2 203
Potencia solar (W)	270	286	259
Velocidad (km/h)	51	0	36
Corriente generador (A)	5,05	0	5,1

DISCUSIÓN

Luego de su participación en el evento y los 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. En términos de la energía

entregada por el generador accionado por el conductor durante la competencia, se pudo extraer una potencia pico de 242 W que representa más del doble de la que puede entregar un ciclista durante un tiempo prolongado sin fatigarse. Así, considerando la postura del conductor y que no se produjeron síntomas de fatiga en el mismo, los resultados han sido altamente auspiciosos.

La obtención de los primeros resultados experimentales, probando el desempeño del vehículo en un ambiente exigente como el desierto, permiten pensar en su potencial de aplicación en el transporte urbano. 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 su participación en la segunda versión del desafío solar en el desierto de Atacama y, por otro lado, continuar la investigación sobre partes del vehículo, retirando el generador eléctrico y analizando sus posibles aplicaciones al transporte.

CONCLUSIONES

A partir de un proyecto interdisciplinario se ha conseguido diseñar y construir un vehículo solar híbrido experimental y validar los resultados de su desempeño en la primera competición de vehículos solares de Latinoamérica. 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 alto grado de confiabilidad.

Se validó el sistema empleando paneles solares fotovoltaicos, batería y una máquina eléctrica sin escobillas adosada a una cadena cinemática de corona y piñón y una postura decumbente del piloto.

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

Las celdas solares integradas y encapsuladas mediante un proceso fruto de la investigación sobre diferentes posibilidades de resinas industriales, condujo al uso de polímero de base estireno como encapsulante. Se pudo obtener un resultado muy alentador en el uso de los paneles y un costo atractivo respecto a los módulos comerciales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la CIC (Comisión de Investigaciones Científica de la Provincia de Buenos Aires), la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, la Municipalidad de la ciudad de Olavarría y diferentes empresas y compañías que han manifestado su compromiso con el proyecto.

REFERENCIAS

1. **THOMAS, S.** "Transportation Options in a Carbon-Constrained World: Hybrids, Plug-in Hybrids, Biofuels, Fuel cell Electric Vehicles, and Battery Electric Vehicles". *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009, vol. 34, pp. 9279-9296.
2. **SITU, L.** "Electric Vehicle Development: the Past, Present & Future". En actas de International Conference on Power Electronic Systems and Applications, IEEE. 2009, pp.1-3.
3. **OMAN, H.** "Electric Car Progress". *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2002, vol. 17, núm. 6, pp. 30-35.
4. **MOMOH, O.; OMOIGUI, M.O.** "An Overview of Hybrid Electric Vehicle Technology". En actas de Vehicle Power and Propulsion Conference, IEEE, 2009, pp. 1286-1292.
5. **MAGNETO, G.; VAN MIERLO, J.** "Electric and Electric Hybrid Vehicle Technology: a Survey". En actas de Seminar on Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles, IEE. 2000, pp. 1/1-11.
6. **MATSUMOTO, S.** "Advancement of Hybrid Vehicle Technology". En actas de European Conference on Power Electronics and Applications, IEEE. 2005, pp. 1-7.
7. **CAIRNS, E. J.** "A New Mandate for Energy Conversion: Zero Emission (Electric) Vehicles". En actas de 35th International Power Sources Symposium, IEEE. 1992, pp. 310-313.
8. **SINGH, B. R.; SINGH, O.** "21st Century Challenges of Clean Energy and Global Warming-Can Energy Storage Systems Meet These Issues?". En actas de Thermal Issues in Emerging Technologies, 2010, pp. 323-329.
9. **GIANNOULI, M.; YIANOULIS, P.** "Study on the Incorporation of Photovoltaic Systems as an Auxiliary Power Source for Hybrid and Electric Vehicles". *Solar Energy*. 2012, vol. 86, pp. 441-451.
10. **BECHERIF, M.; AYAD, M.; HISSEL, D.; MKAHL R.** "Design and Sizing of a Stand-Alone Recharging Point for Battery Electrical Vehicles Using Photovoltaic Energy". En actas de Power and propulsion Conference, 2011, pp. 1- 6.
11. **CONNORS, J.** "On the Subject of Solar Vehicles and the Benefits of the Technology". En actas de International Conference of Clean Electrical Power, 2007, pp. 700-705.
12. **SHIN, J.; HONG, J.; JEONG, G.; LEE, J.** "Impact of Electric Vehicles on Existing car Usage: a Mixed Multiple Discrete-Continuous Extreme Value Model Approach". *Journal of Transportation Research*. 2012, Part D 17, pp. 138-144.
13. Atacama Solar Challenge. La Ruta Solar. Bases [en línea]. Disponible en Web: <http://sites.google.com/a/larutasolar.com/www/bases> [consultado en febrero 2011].
14. Centro de Investigaciones de los Reglamentos para Seguridad de las Obras. "Acción del viento sobre las construcciones". CIRSOC 102, 115 pp., Argentina, 1994.
15. Centro de investigaciones los reglamentos para seguridad de las obras civiles. "Reglamento argentino de estructuras de acero para edificios". CIRSOC 301, 234 pp., Argentina, 2005. ISBN: 950-532-011-6.
16. **ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R.L.** *The Finite Element Method*. vol. II. McGraw Hill, 1991. ISBN: 84-291-4894-9.
17. Centro de Investigaciones de los Reglamentos para Seguridad de las Obras Civiles. "Reglamento argentino de estructuras de aluminio". CIRSOC 701, 151 pp., Argentina, 2008.
18. **KISSELL, R.; FERRY, R.** Aluminium Structures. *A Guide to their Specifications and Design*. 2^{da}. edición. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2002. 532 pp. ISBN: 0-471-01965-8.
19. **NAVARRO, R. A.** *Alternativas de transporte en América Latina: La bicicleta y los triciclos. Las bases científicas de la bicicleta*. Cap. VII. 1985, Skat, Chile, 21 pp. ISBN 3908001048.
20. **WHITT, F. R.; WILSON, D.G.** *Bicycling Science*. Massachusetts, USA: Ed. The MIT Press, 1982. 384 pp. ISBN 10: 026273060X - ISBN-13: 9780262730600.
21. **WILSON, S.S.** "Bicycle Technology". *Scientific American*. 1973, vol. 2287, núm. 3, pp. 81-91.
22. **AFFANNI, A; BELLINI, A; et al.** "Battery Choice and Management for New-Generation Electric Vehicles". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2005, vol 52, núm. 5, pp. 1343-1349.
23. **KULARATNA, N.** "Rechargeable Batteries and their Management". *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 2011, vol. 14, núm. 2, pp. 20-33.
24. **GIBSON, T. L.; KELLY, N.A.** "Solar Photovoltaic Charging of Lithium-Ion Batteries". *Journal of Power Sources*, 2010, vol. 195, pp. 3928-3932.
25. **JIAYUAN, W.; ZECHANG, S.; XUEZHE, W.** "Performance and Characteristic Research in LiFePO4 Battery for Electric Vehicle Applications". En actas de Vehicle Power and Propulsion Conference, IEEE, 2009, pp. 1657-1661.
26. **MOORE, S.W.; SCHNEIDER, P. J.** "A Review of Cell equalization Methods for Lithium-Ion and Lithium-Polymer Battery Systems". Society of Automotive Engineers, 2001-01-0959, 2001. 5 pp.
27. **VISINTIN, A.; THOMAS, J.E. et al.** "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". En actas de Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía (HYFUSEN), 2011, pp. 1-4.

AUTORES

Patricia Mónica Ciancio

Ingeniera en Construcciones, Doctora en Ingeniería, Profesora Asociada, Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNICEN), Argentina. Miembro de la Asociación Argentina de Mecánica Computacional (AMCA)

María Haydée Peralta

Ingeniera Civil, Magíster en Tecnología y Construcciones de Hormigón, Profesora Titular, Investigadora, Facultad de Ingeniería, UNICEN, Argentina. Miembro de la Asociación de Ingenieros Estructurales (AIE)

Leonel Osvaldo Pico

Ingeniero Civil, Magíster en Métodos Numéricos y Computacionales de Ingeniería, Investigador, Jefe de Trabajos Prácticos, Facultad de Ingeniería, UNICEN, Argentina

Marcelo Alberto Spina

Ingeniero en Electromecánica, Profesor Titular, Investigador, Facultad de Ingeniería, UNICEN, Argentina

Silvano Renato Rossi

Ingeniero en Electromecánica, Doctor en Ingeniería Eléctrica, Profesor Adjunto, Investigador, Facultad de Ingeniería, UNICEN, Argentina

Roberto Juan de la Vega

Ingeniero en Electrónica, Profesor Titular, Investigador, Facultad de Ingeniería, UNICEN, Argentina

Development of an Experimental Vehicle with Hybrid Energy System

Abstract

The first solar car competition in Latin America, in «The Solar Road» category, across the Atacama Desert, Chile (2011) gave origin to an interdisciplinary project to encourage the use of sustainable energy applied to the urban transport, without the use of fossil fuels damaging to the environment. It aimed to develop a vehicle with minimum energy consumption for its transport, lightweight, stable, low-cost, and zero emission based on the combination of photovoltaic solar energy and electric power obtained from a generator driven by human traction both stored in a battery. In this paper, the inherent aspects of the project and execution stages of an experimental hybrid vehicle, called Pampa Solar, are presented. This includes the conception and sizing of the resistant structure, adoption of the solar cells configuration, battery sizing and choice, three-phase generator and electronic instrumentation development, according to the basis of the competition and related loads. The analysis of the results of electric, electronic, mechanical, and vehicle energy systems during competition demonstrated a reliable performance, getting the award for the most efficient use of solar energy.

Key words: sustainable energy, experimental vehicle, photovoltaic solar energy, solar cells, «The Solar Road» competition.