

CONVERSIÓN DE UN ROBOT MÓVIL DE CADENAS EN VEHÍCULO HÍBRIDO ELÉCTRICO

Javier Valbuena, Jesús Morales, Anthony Mandow, Jorge L. Martínez, y Alfonso García-Cerezo
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
University of Málaga, 29071 Málaga, Spain. Email: amandow[@]uma.es

Abstract - El artículo presenta la remodelación del robot móvil Auriga- α . Del vehículo original, desarrollado en el año 2000, solo se ha conservado el sistema de locomoción. Además de la actualización de los sistemas informáticos y equipos de control, el principal objetivo ha sido la conversión del robot en un vehículo híbrido eléctrico. Para ello, se han incorporado baterías LiFePO₄ con su correspondiente cargador y un generador monofásico. En el diseño, se han tenido en cuenta el posicionado del centro de gravedad y la ventilación de los equipos. En conjunto, la remodelación consigue reducir la masa del vehículo y mejorar su eficiencia y autonomía energética. En la actualidad, el diseño está siendo implantado en el robot real.

Keywords: robótica móvil, vehículos híbridos eléctricos, baterías eléctricas.

This document is a self-archiving copy of the preprint version of a copyrighted publication.

Citation Information

Valbuena, J.; Morales, J.; Mandow, A.; Martínez, J.L.; García-Cerezo, A.,
"Conversión de un Robot Móvil de Cadenas en Vehículo Híbrido Eléctrico,"
XXXV Jornadas de Automática, Valencia, España, pp. 1-6. Septiembre, 2014.
ISBN-13: 978-84-697-0589-6

```
@INPROCEEDINGS{Valbuena:2014,  
author={J. Valbuena and J. Morales and A. Mandow and J. L. Mart\{i}nez and A. Garc\{i}a-Cerezo},  
title={Conversi\{o}n de un robot m\{o}vil de cadenas en veh\{i}culo h\{i}brido el\{e}ctrico},  
booktitle={ XXXIV Jornadas de Automática },  
year={2014},  
pages={1 - 6},  
address={Valencia, España},  
}
```

CONVERSIÓN DE UN ROBOT MÓVIL DE CADENAS EN VEHÍCULO HÍBRIDO ELÉCTRICO

Javier Valbuena, Jesús Morales, Anthony Mandow, Jorge L. Martínez, y Alfonso García-Cerezo
Universidad de Málaga, Andalucía Tech, Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
amandow@uma.es

Resumen

El artículo presenta la remodelación del robot móvil Auriga- α . Del vehículo original, desarrollado en el año 2000, solo se ha conservado el sistema de locomoción. Además de la actualización de los sistemas informáticos y equipos de control, el principal objetivo ha sido la conversión del robot en un vehículo híbrido eléctrico. Para ello, se han incorporado baterías LiFePO₄ con su correspondiente cargador y un generador monofásico. En el diseño, se han tenido en cuenta el posicionado del centro de gravedad y la ventilación de los equipos. En conjunto, la remodelación consigue reducir la masa del vehículo y mejorar su eficiencia y autonomía energética. En la actualidad, el diseño está siendo implantado en el robot real.

Palabras clave: robótica móvil, vehículos híbridos eléctricos, baterías eléctricas.

1. INTRODUCCIÓN

La robótica móvil puede beneficiarse de características de los vehículos híbridos eléctricos en cuanto a la combinación de fuentes de energía eléctrica y de combustión interna [3]. La combinación de sistemas eficientes de baterías con combustible de fácil repostaje permiten un incremento en autonomía y alcance que resulta crucial para las aplicaciones de campo de la robótica móvil, como la exploración y la respuesta a emergencias.

El reciente desarrollo de la tecnología de las baterías eléctricas hace posible, hoy día, la inclusión de celdas con una gran densidad de energía en el campo de la robótica móvil [11]. Así, se pueden introducir sistemas de alimentación basados en baterías eléctricas en aplicaciones de dimensiones considerables, donde hace tan solo unos años se hacía imprescindible el empleo de grandes generadores eléctricos [3]. A partir de este tipo de baterías, son ya varias las aplicaciones de robótica móvil donde se están implantando diversos sistemas de alimentación híbridos [9][5][10].

Este artículo propone la remodelación del robot móvil Auriga- α , desarrollado en el año 2000 con

finde de investigación [4][6]. Manteniendo únicamente el sistema de locomoción, además de la actualización de los sistemas informáticos y equipos de control, el principal objetivo ha sido la conversión del robot en un vehículo híbrido eléctrico. Con este fin, se proponen baterías recargables LiFePO₄ y un generador monofásico. En el diseño, se tienen en cuenta el posicionado del centro de gravedad y la ventilación de los equipos. En conjunto, la remodelación consigue reducir la masa del vehículo y mejorar su eficiencia y autonomía energética. Este diseño se está implantando en el robot real.

El resto de este artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se resumen los aspectos principales de la remodelación del vehículo. El diseño del sistema híbrido de alimentación se propone en el apartado 3. A continuación, la sección 4 describe la integración de sistemas en el robot. Finalmente, la sección 5 expone los resultados obtenidos y ofrece ideas para desarrollos futuros.

2. REMODELACIÓN DE AURIGA- α

Este trabajo ha formado parte de la actualización de los sistemas del robot móvil Auriga- α . Este robot se desarrolló en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga [8]. Sus dimensiones eran 1.35 m \times 0.75 m \times 0.92 m y su peso 258 kg. Del



Figura 1: El vehículo original.

vehículo original (ver Fig. 1) solo se ha conservado el sistema de locomoción, que se basa en dos motores CC con escobillas de 720 W y 60 V nominales para una tracción diferencial por cadenas [4]. Además de la conversión del robot en un vehículo híbrido eléctrico, descrita en el apartado 3, en esta remodelación se han renovado:

- *Sistema de potencia.* Se ha incorporado una controladora dual Roboteq MDC2250 que permite el control de la velocidad de giro de cada uno de los motores en ambos sentidos y de modo independiente. Esta controladora integra las etapas de potencia, que aportan una salida regulada de tensión para los motores sin necesidad de dispositivos adicionales. Además, el dispositivo incluye sensores de tensión, intensidad y temperatura, así como entradas para los codificadores angulares de los motores. Asimismo, esta controladora incorpora regulación PID para referencias de velocidad, que permite programar valores máximos de aceleración en cada uno de los motores.
- *Sistema informático.* El objetivo del sistema informático a bordo del robot es ofrecer tanto una estructura de bajo nivel para gestionar las comunicaciones entre los dispositivos (e.g., sensores, telémetro láser, sistema de arranque del generador, *joysticks*, la controladora) como funciones de alto nivel para navegación y teleoperación. Este sistema se basa en un PC industrial con el sistema operativo Ubuntu (Linux) y ROS (*Robot Operating System*). Para la teleoperación del vehículo, se han diseñado tres modos: conducción como un automóvil con cambio de marchas automático, como un automóvil eléctrico y mediante señales de referencia todo-nada. Por otro lado, se han programado dos funciones de seguridad: una condición de “hombre muerto” y la detección de obstáculos mediante el telémetro láser. Esta última función se ha empleado para disminuir la velocidad máxima de navegación en caso de obstáculos próximos o para detener el vehículo si la distancia al obstáculo es inferior a un determinado umbral de seguridad.

3. SISTEMA HÍBRIDO DE ALIMENTACIÓN

En la remodelación del robot, se propone un sistema de alimentación híbrido mediante la acción conjunta de baterías y un generador monofásico de gasolina como apoyo auxiliar. El objetivo de esta configuración es aprovechar la elevada densidad de

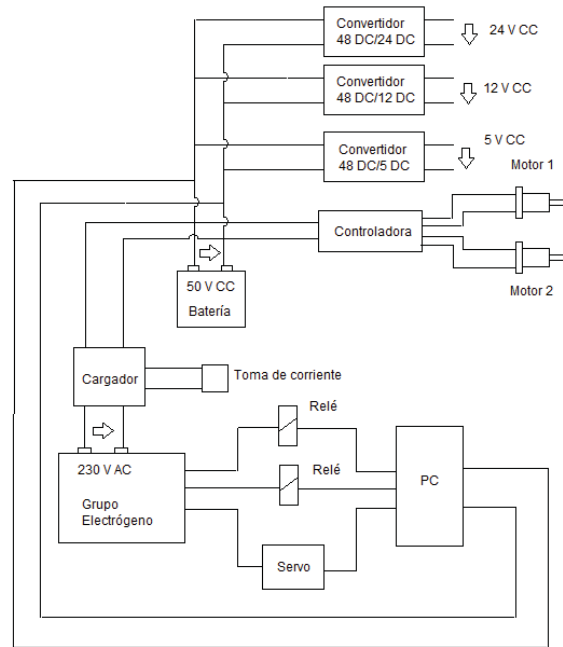


Figura 2: Diagrama del sistema híbrido de alimentación.

energía másica y volúmica que ofrecen las nuevas tecnologías de almacenamiento de energía, lo cual permite reducir el peso total del vehículo a la vez que aumentar su autonomía energética. Asimismo, la combinación con un generador permite aumentar considerablemente la autonomía para misiones robóticas de larga duración [3]. La Fig. 2 muestra un esquema general del sistema híbrido de alimentación.

3.1. Sistema de baterías

Para el sistema de baterías se ha seleccionado la tecnología de Ion-Litio porque su eficiencia de recarga, densidad energética, ciclo de vida y potencia específica son muy superiores a otras alternativas como NiMH y Pb. Además, dentro de las baterías de Litio se han seleccionado las de Fosfato de Hierro (LiFePO_4) debido a características como su bajo mantenimiento, alta velocidad de carga, seguridad (no explotan o se incendian por sobrecarga), buen comportamiento ante vibraciones y mantenimiento de su capacidad de descarga hasta momentos antes de su agotamiento [1].

El sistema de baterías se ha configurado utilizando celdas de tensión nominal de 3.2 V, capacidad nominal de 40 A h y rango de operación entre 2.5 V y 4 V. En particular se han conectado 14 celdas en serie, de manera que la tensión a la salida total sea próxima a 50 V. Esta tensión alimenta a la controladora dual de los motores. Además, se han incluido tres convertidores DC/DC, de 48/5 V, 48/12 V

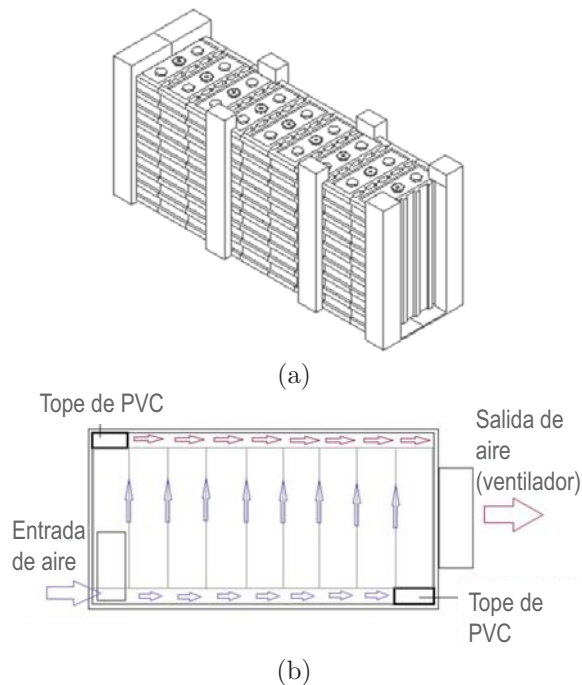


Figura 3: Caja para baterías y sistema de ventilación interna: a) disposición en el interior de la caja; b) circuito de ventilación (sección longitudinal).

y 48/24 V, para alimentar otros dispositivos a bordo del vehículo.

En la integración del sistema de baterías dentro de Auriga- α se ha considerado la protección ante elevadas temperaturas y ante sobrecargas, sobretensiones y desniveles de tensión entre distintas celdas. Estos aspectos se desarrollan a continuación.

3.1.1. Protección ante altas temperaturas

Si bien las baterías LiFePO_4 ofrecen buenas características de carga y descarga a temperatura elevada [2] y minimizan el riesgo de explosión, la protección ante altas temperaturas resulta crítica para las baterías en robótica móvil. Con este fin, se ha diseñado una caja de soporte para las baterías que asegura la ventilación de las mismas (ver Fig. 3). El diseño incluye unas piezas de cloruro de polivinilo (PVC) que, además de aislar eléctricamente las celdas de la superficie de la caja, definen un circuito para la entrada-salida de aire de la caja. Además, se proporciona ventilación forzada mediante un ventilador situado en una de las caras de la caja. El orificio para entrada de aire se aprovecha también para los cables terminales de la batería, de modo que no es necesaria la apertura de la caja para acceder a ellos. La tapadera de la caja incluye en su cara interior una plancha de PVC que impide el contacto eléctrico con la misma.

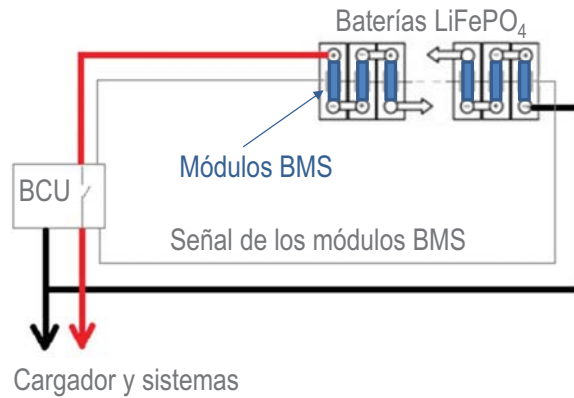


Figura 4: Esquema de conexión de baterías con BMS y BCU.

3.1.2. Sensibilidad ante sobrecargas y desniveles de tensión entre celdas

Para solucionar este problema se han incorporado equipos de gestión de carga y descarga de las baterías. Así, se ha empleado una unidad de control (BCU¹) y un lazo de dispositivos equilibradores de tensión (BMS²), como se muestra en la Fig. 4. Para cada celda se instala un BMS entre sus bornes, que monitoriza su tensión. Si, durante la carga, la tensión de una celda sobrepasa un determinado umbral, su BMS activa un puente que reduce la corriente de carga. Además, todos los módulos BMS están enlazados mediante una señal de corriente supervisada por la BCU. En caso de que un BMS detecte un problema, éste abre el lazo para avisar a la BCU. Así, la BCU protege el sistema de baterías desconectándolo de la carga y la descarga en caso de sobretensión, sobret temperatura o sobrecarga.

Para la carga de las celdas se ha incorporado en el robot el cargador suministrado por el fabricante, que cumple con las curvas de tensión e intensidad apropiadas para este tipo de baterías y que se muestran en la Fig. 5(a). Como se aprecia en la figura, la carga de las baterías sigue tres etapas distintas:

1. *Carga a intensidad constante.* La tensión va aumentando paulatinamente mientras que se está forzando una corriente máxima de entrada a las baterías. En esta etapa, el cargador suministra corriente tanto a la batería como al resto de equipos del robot, incluyendo la alimentación de los motores para la navegación.
2. *Carga a tensión constante.* La intensidad va disminuyendo de forma exponencial a medida

¹Battery Control Unit.

²Battery Management System.

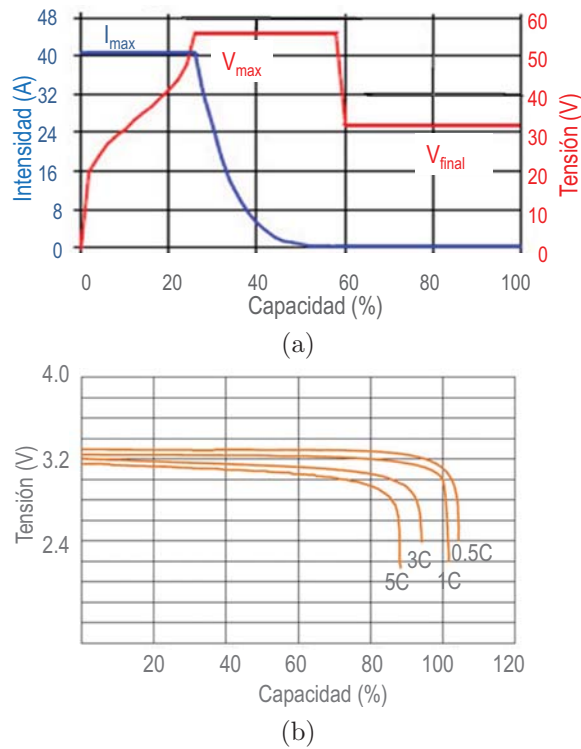


Figura 5: Curvas de carga (a) y descarga (b) de las baterías.

que el estado de carga se aproxima al máximo. En esta etapa, el conjunto cargador/baterías no es capaz de suministrar niveles de corriente suficientes para alimentar a los motores, por lo que la navegación no es posible.

3. *Etapa de recuperación.* En esta etapa no se suministra intensidad, lo que provoca una caída desde la tensión máxima V_{max} a un valor final V_{final} . En esta etapa las baterías funcionan como si no estuviesen conectadas al cargador, por lo que pueden alimentar al vehículo para la navegación.

En la Fig. 5(b) se muestran las curvas de descarga para distintas demandas de corriente, donde C se refiere a la corriente o capacidad de descarga nominal de la celda. Estas curvas se caracterizan por una pendiente muy suave durante prácticamente todo el recorrido cayendo bruscamente al llegar a un límite de descarga próximo a los 2.8 V. Para el conjunto de baterías, la tensión a la que se produce esta caída es de aproximadamente 42 V.

3.2. Generador monofásico

La función del generador monofásico es suministrar energía al cargador de las baterías en el momento en el que el nivel de carga de éstas descienda por debajo de un umbral mínimo. Asimismo, el generador debe desactivarse cuando se han comple-

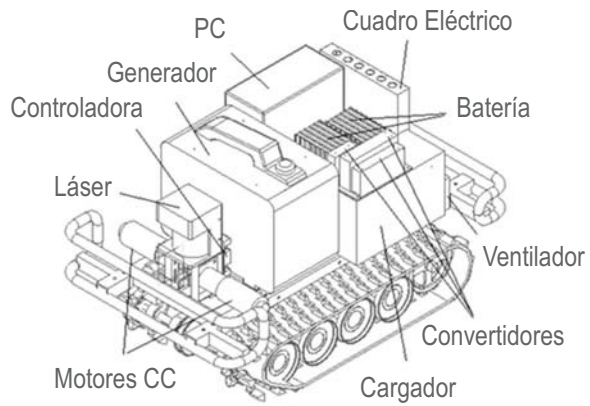


Figura 6: Distribución de los equipos en el nuevo robot.

tado las tres etapas de la carga. Por consiguiente, se requiere que el generador pueda ser activado y desactivado automáticamente desde el PC.

Se ha seleccionado un generador monofásico (230 V) compacto con potencia nominal de 2200 W y un peso de 27 kg que, como es habitual en generadores ligeros, no incluye una opción de arranque automático. Si bien el generador permite el arranque eléctrico mediante el accionamiento de una llave, la apertura de la válvula de admisión de aire es manual. Así, para automatizar esta operación se propone adaptar el equipo mediante un servo de radio control que accione la válvula mecánicamente (ver Fig. 2). De esta manera, tanto el arranque como el paro del generador se pueden controlar desde el PC mediante tres señales: una señal de modulación de ancho de pulso (PWM) que controla el desplazamiento angular del eje del servomotor y dos señales digitales para el encendido y apagado del generador, respectivamente, mediante un sistema de relés.

Por otro lado, se posibilita la conexión del cargador de la batería tanto al generador, como a la red eléctrica mediante una clavija de potencia. Gracias a esto, se puede alimentar al robot y cargar las baterías desde una toma de corriente sin necesidad de arrancar el generador.

4. INTEGRACIÓN DE LOS EQUIPOS

El emplazamiento de los nuevos componentes a bordo del robot (ver Fig. 6) se ha diseñado de acuerdo a dos criterios fundamentales: lograr una posición adecuada del centro de masas del sistema y asegurar la ventilación de los equipos en el cuerpo del vehículo.

El generador y las baterías suponen aproximadamente el 70 % de la masa de todos los componen-



Figura 7: Posición del centro de gravedad

tes. Por ello, su posición es muy relevante para el centro de gravedad del vehículo. En particular, los vehículos con cadenas mejoran su tracción y eficiencia energética si su centro de gravedad (ver Fig. 7) se encuentra próximo al eje longitudinal del vehículo y ligeramente desplazado en el sentido de avance [7].

Con la distribución propuesta, el centro de gravedad se sitúa a una altura de 0.329 m y adelantado 0.074 m respecto del centro geométrico del polígono de apoyo de las cadenas, y con una asimetría lateral de solo 0.006 m. En esta distribución se ha aprovechado la modularidad de las celdas de batería, de manera que se han dispuesto dos cajas (ver Fig. 3) separadas, con nueve y cinco celdas cada una.

Los equipos en el cuerpo del vehículo se encuentran protegidos por una carcasa de fibra de vidrio, como se indica en la Fig. 7. Para facilitar la ventilación en el interior de la carcasa se ha diseñado un sistema de ventilación forzada a partir de un cálculo del valor de flujo volumétrico capaz de evacuar el calor producido por la suma de las pérdidas energéticas de cada uno de los componentes, suponiendo que éstas se traducen enteramente en calor.

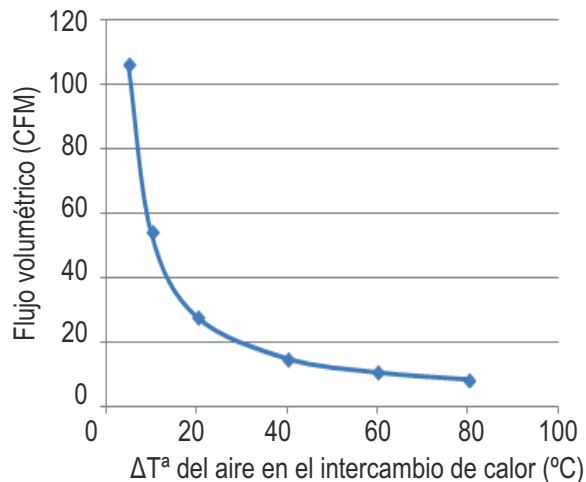


Figura 8: Flujo volumétrico en función de la diferencia de temperatura en el intercambio de calor.

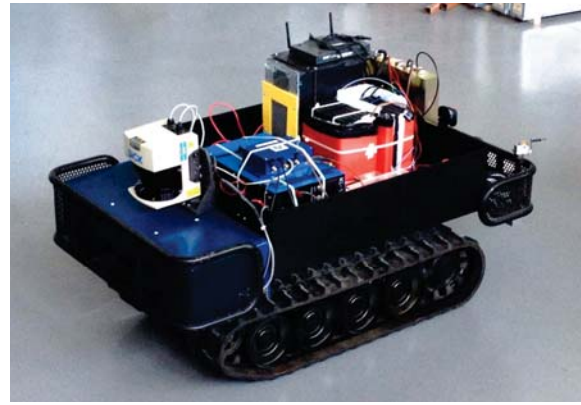


Figura 9: Imagen actual del robot Auriga-α.

Se estima que el calor a evacuar con el generador en funcionamiento es de 240 W, y para condiciones de presión ambiental constante y temperatura intermedia en el intercambio próxima a 30°, el flujo volumétrico en función de la variación de temperatura experimentada en el aire se calcula según la curva de la Fig. 8. Como resultado, se ha incluido un ventilador que fuerza un flujo de aire de 70 CFM alrededor de los equipos. Además, un aspecto que se ha tenido en cuenta para favorecer el intercambio de calor por convección forzada, ha sido disponer los equipos de manera que las caras de mayor superficie queden expuestas al contacto con dicho flujo.

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El artículo ha presentado la remodelación del robot móvil Auriga-α. Del vehículo original, desarrollado en el año 2000, solo se ha conservado el sistema de locomoción. Además de la actualización de los sistemas informáticos y equipos de control, el principal objetivo ha sido la conversión del robot en un vehículo híbrido eléctrico.

Para el sistema híbrido de alimentación, se han incorporado baterías LiFePO_4 con su correspondiente cargador y un generador monofásico. En el diseño, se han tenido en cuenta el posicionado del centro de gravedad y la ventilación de los equipos. El peso total estimado es de 178 kg, lo que supone una reducción aproximada del 30 %. Además, la altura total ha pasado de 0.92 m a 0.74 m. Asimismo, sólo con el sistema de baterías se estima una autonomía de varias horas para el vehículo en movimiento.

Este diseño se encuentra en proceso de implantación. La Fig. 9 muestra el estado actual del robot (sin la carcasa de protección), donde ya se han instalado los sistemas informáticos, el sistema de po-

tencia, y el conjunto cargador-baterías LiFePO₄. Los primeros experimentos muestran una respuesta adecuada del sistema en cuanto a potencia de tracción.

Las observaciones preliminares del proceso de carga de las baterías ha evidenciado diferencias entre las especificaciones del fabricante en cuanto a la caída de tensión en la fase de recuperación. Concretamente, esta caída depende, en porcentaje, de la intensidad máxima de carga. Así, la estimación de modelos fiables de este comportamiento resulta interesante para el desarrollo de estrategias de carga en el sistema híbrido.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido cofinanciado por el proyecto CICYT DPI 2011-22443.

Referencias

- [1] Wang Jiayuan, Sun Zechang, and Wei Xuehe. Performance and characteristic research in LiFePO₄ battery for electric vehicle applications. In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Dearborn, USA, Sept 2009.
- [2] Lixia Liao, Pengjian Zuo, Yulin Ma, Xinqun Chen, Yongxin An, Yunzhi Gao, and Geping Yin. Effects of temperature on charge/discharge behaviors of LiFePO₄ cathode for Li-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 60:269 – 273, 2012.
- [3] D. G. Logan, J. Pentzer, S. N. Brennan, and K. Reichard. Comparing batteries to generators as power sources for use with mobile robotics. *Journal of Power Sources*, 212:130–138, 2012.
- [4] J. L. Martínez, A. Mandow, J. Morales, S. Pedraza, and A. García-Cerezo. Approximating kinematics for tracked mobile robots. *The International Journal of Robotics Research*, 24(10):867–878, October 2005.
- [5] T. D. J. Mateo Sanguino and J. E. González Ramos. Smart host microcontroller for optimal battery charging in a solar-powered robotic vehicle. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(3):1039–1049, 2013.
- [6] J. Morales, J. L. Martínez, A. Mandow, and A. García-Cerezo. Steering the last trailer as a virtual tractor for reversing vehicles with passive on- and off-axle hitches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(12):5729–5736, 2013.
- [7] J. Morales, J. L. Martínez, A. Mandow, A. J. García-Cerezo, and S. Pedraza. Power consumption modeling of skid-steer tracked mobile robots on rigid terrain. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(5):1098 –1108, 2009.
- [8] Salvador Pedraza. *Modelado y análisis de vehículos de cadenas para navegación autónoma*. PhD thesis, Universidad de Málaga, Málaga, 2000.
- [9] Y. Takahashi, S. Matsuo, and K. Kawakami. Hybrid robotic wheelchair with photovoltaic solar cell and fuel cell. In *International Conference on Control, Automation and Systems*, pages 1636–1640, Seoul, Korea, 2008.
- [10] Ching-Kuo Wang, Han-Pang Huang, and Wei-Fu Huang. Loading evaluation of the power scheduling system on the industrialized robot platform. In *World Congress on Intelligent Control and Automation*, pages 326–329, Taipei, Taiwan, 2011.
- [11] G. Wang, Z. Dai, Y. Guan, P. Dong, and L. Wu. Power management of hybrid power systems with Li-Fe batteries and supercapacitors for mobile robots. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 2014.