



**APPICE**  
Asociación Española  
de Pilas de Combustible

**XV aniversario**



2017

**CONGRESO  
IBEROAMERICANO  
DE HIDROGENO  
Y PILAS DE  
COMBUSTIBLE**



12

**LIBRO DE COMUNICACIONES**



**Congreso Iberoamericano de  
Hidrógeno y Pilas de Combustible**  
Huesca, 17-20 Octubre 2017

---

# **LIBRO DE COMUNICACIONES**

CONGRESO IBEROAMERICANO DE  
HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE

---



Libro de comunicaciones del  
**Congreso Iberoamericano de Hidrógeno y Pilas de Combustible IBERCONAPPICE 2017**  
Huesca, Octubre 2017

Esta publicación ha sido elaborada por la  
Asociación Española de Pilas de Combustible - APPICE

Editores: Margarita Daza Bertrand, Loreto Daza Bertrand

Está incluida en el fondo editorial de la serie  
"APPICE Formación"

Cualquier reproducción, parcial o total de la presente publicación debe contar con la aprobación escrita de APPICE.

La Asociación Española de Pilas de Combustible, APPICE, no comparte necesariamente las opiniones, teorías o juicios expuestos en este documento, cuya responsabilidad corresponde únicamente a los autores.

ISBN: 978-84-697-6342-1

**Asociación Española de Pilas de Combustible - APPICE**  
C/ Marie Curie 2, Campus Cantoblanco  
28049 Madrid  
[www.appice.es](http://www.appice.es)

Impreso en Madrid

## Funcionamiento de un robot móvil con pila de combustible PEMFC

M. Ordóñez de Arce<sup>1,2</sup>, A. Moreno Benito<sup>1</sup>, M.A. Galarza Díaz<sup>1</sup>, J.J. Conde<sup>1</sup>, M.A. Folgado<sup>1</sup>, P. Ferreira Aparicio<sup>1</sup>, A. Martínez Chaparro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Av. Complutense 40, 28040 Madrid

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Madrid, Escuela de Minas y Energía, Calle de Ríos Rosas 21, 28003 Madrid

**RESUMEN:** Se ha llevado a cabo un estudio de la aplicación de hidrógeno y pila de combustible de tipo PEMFC a un robot móvil, "mbot". Para ello se ha montado un sistema de pila de combustible consistente en una pila de 4 celdas PEMFC tipo "air breathing" (AB-PEMFC), junto con dos cartuchos de hidruros metálicos como almacenamiento portátil de hidrógeno, un controlador de presión y una placa electrónica de acondicionamiento de potencia. Se han realizado ensayos para conocer características del funcionamiento, arranque y autonomía del sistema de pila de combustible. Finalmente se ha montado sobre mbot y estudiado su funcionamiento real. Los resultados obtenidos muestran ventajas e inconvenientes del uso de hidrógeno y pila de combustible para este tipo de aplicación. Se obtiene aproximadamente doble de autonomía con la pila AB-PEMFC y 1g H<sub>2</sub> almacenado, comparando con las cuatro baterías comerciales (LR6AA) que utiliza la versión comercial del robot. Por otro lado, el sistema de pila de combustible pesa unas cuatro veces más que las baterías, y requiere de un protocolo de arranque, que dura de 1 a 4 min, necesario para la humidificación de la membrana. Ambos, disminución de las dimensiones de la pila y de su tiempo de arranque, son objeto de optimización en el trabajo futuro del grupo.

**ABSTRACT:** A study on the application of hydrogen and PEM fuel cell in a commercial mobile application, 'mbot', has been carried out. Thus, a fuel cell system has been assembled, consisting of a stack of 4 PEM air breathing fuel cells, two metal hydrides cartridges as hydrogen storage, a pressure controller, and a power conditioning electronics. Tests of operation, startup and autonomy have been carried out. The results obtained shows advantages and disadvantages of using hydrogen and fuel cell for this type of application, compared with the commercial batteries. The fuel cell system presents two times superior autonomy than the batteries (4xLR6AA). On the other hand, the fuel cell system is four times heavier than batteries, and requires a start-up procedure, lasting for 1 to 4 min, necessary for the humidification of the membrane. Both, weight decrease and start-up time, are part of future work by the group.

**Palabras clave:** PEMFC, robot, aplicación portátil, hidruros metálicos

**Keywords:** PEMFC, robot, portable application, metal hydrides

### 1. INTRODUCCIÓN

El uso de pilas de combustible de baja potencia, en dispositivos portátiles, es una opción cada vez más interesante y rentable, debido a la alta densidad de potencia y autonomía que se puede conseguir. El principal problema es el excesivo peso y volumen de los sistemas de pila de combustible. Para ello, es necesario simplificar en lo posible sus componentes, por ejemplo, mediante monoceldas PEMFC que funcionen con aire ambiental en el cátodo ("air breathing") e hidrógeno almacenado en un cartucho de hidruros metálicos en el ánodo [1]. Este tipo de pila presenta densidades de corriente por debajo de 0.2 A/cm<sup>2</sup> a 0.5V, lo que supone una potencia en torno a los 0.1 W/cm<sup>2</sup>. Dicho valor es suficiente para muchas aplicaciones portátiles.

En este trabajo se lleva a cabo el ensayo de una pila de combustible de múltiples celdas ("stack") para alimentar una aplicación móvil electrónica, ("mbot"). Se han utilizado 4 monoceldas PEMFC

"air breathing" (AB-PEMFC) y 2 cartuchos de hidruros metálicos para alimentarlas, acoplados sobre el chasis de la aplicación (Fig.1).



**Fig.1** Aplicación móvil, mbot, con pila de hidrógeno ("stack" 4 monoceldas AB-PEMFC).

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1. Sistema, aplicación móvil, *mbot* + pila de combustible

*Mbot* es un robot creado por la marca *Makeblock*, que funciona alimentado por 4 baterías AA. Cuenta con dos motores parasendas ruedas, una pantalla de 128 leds, un sensor frontal de choques, un sensor de color y un emisor de sonidos. El robot pesa unos 400g y puede controlarse remotamente por medio de *bluetooth*, mediante software basado en *Arduino Uno*, utilizando un teléfono móvil, *Tablet*, o similar. El sistema de pila de combustible diseñado para dar potencia portátil a *mbot* consta de 4 monoceldas AB-PEMFC. Cada monocelda consta de un cátodo ‘air breathing’ y de un ánodo cerrado permeable [2], y aspectos de su funcionamiento se dan en otra contribución en este congreso [3]. Además, el sistema tiene 2 cartuchos de hidruros metálicos como fuente de combustible (Horizon, 2gH<sub>2</sub>), 1 regulador de presión (Parker) para controlar el hidrógeno a la entrada de las monoceldas, y 1 convertidor DCDC(ADP1612-5-EVALZ) para regular la señal de voltaje a la salida de la pila antes de llegar a la placa base del dispositivo. Los componentes del sistema de pila de combustible fueron alojados sobre el chasis del *mbot*, junto con las necesarias conexiones de conductos de hidrógeno y eléctricas (Fig. 1).

### 2.2 Ensayos de pila de combustible

El equipamiento para estudiar la pila AB-PEMFC está basado en una estación Arbin BT-G-501 con software MITs Pro, que puede operar tanto en modo potencióstático como galvanostático.

Para el ensayo de la pila se prepararon diferentes protocolos, cuyas principales características se dan a continuación. Las *curvas de polarización* se obtuvieron en modo potencióstático, tras la estabilización de la pila en condiciones de operación a una temperatura y grado de humidificación fijados. Medidas de *tiempo de arranque* se obtuvieron en pilas previamente almacenadas en seco durante al menos 24h, sometiéndolas a una demanda de potencia escalonada que comienza en un valor superior (3.6W) y va saltando a valores inferiores hasta que la pila es estable (ie. todas las monoceldas tienen potencial positivo). También se realizaron *ensayos de autonomía* para comparar la capacidad energética de un cartucho de hidruros metálicos con la de 4 baterías alcalinas AA LR6 que son las que utiliza esta aplicación en su versión comercial. Estos ensayos se describen en el siguiente apartado. Durante el transcurso de estos protocolos el sistema Arbin, registra los datos de corriente, voltajes, temperatura, y resistencia interna.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Consumo de *mbot* por componentes

Se estudiaron los consumos de los distintos componentes de *mbot* mencionados en la Parte Experimental. Para ello se conectó el robot a una fuente de alimentación (Agilent E3646A), fijando un voltaje de 3.2V a la entrada del convertidor DCDC. Se pusieron a funcionar los diferentes componentes por separado, mientras se registraban los datos de voltaje y corriente, suministrados por la fuente de alimentación, a partir de los cuales se calculó la potencia.

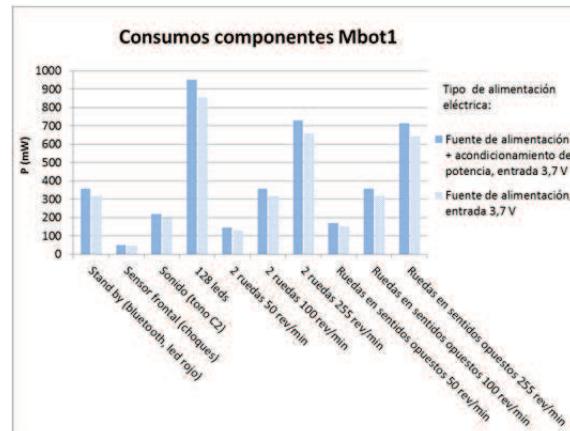


Fig.2. Consumo de los diferentes componentes del robot móvil, *mbot*. En azul, los resultados experimentales. En celeste, los mismos descontando la eficiencia del convertidor DCDC.

Las diferentes potencias, consumidas por cada uno de los componentes que forman el dispositivo se muestran en la Fig. 2. En ella se incluyen los datos de consumo total y los mismos descontando la eficiencia del conversor DCDC.

Según los datos de Fig. 2, la potencia máxima que puede demandar el dispositivo *mbot* es de 2,1W, cuando los sensores están conectados, el sonido funcionando, el display mostrando una imagen de máximo consumo, y las ruedas girando a máxima velocidad (en vacío).

Teniendo en cuenta estos resultados, se decidió montar una pila de combustible “stack” de cuatro monoceldas AB-PEMFC, cuya potencia máxima ronda los 3W.

### 3.2. “Stack” de 4 monoceldas AB-PEMFC

#### 3.2.1 Curvas de polarización

Las curvas de polarización y potencia, obtenidas para la pila de combustible de 4 monoceldas “air breathing” se muestran en la Fig. 3.

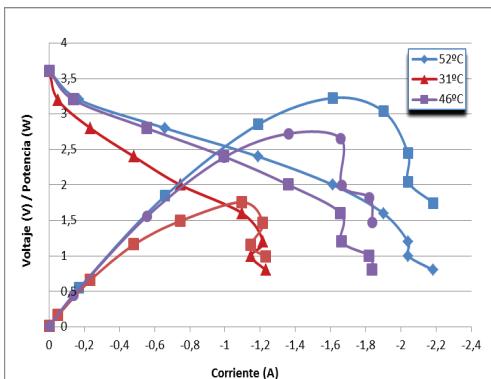


Fig.3 Curvas de polarización estacionarias de AB-PEMFC a 52°C, 46°C, y 31°C. Dichas temperaturas son resultado de operar el “stack” durante 2h a potencial constante de 1,2V, 2V y 3,2V, respectivamente

En circuito abierto ( $I = 0A$ ) se obtiene un voltaje de 3,6V; la potencia máxima es de 3,3W a los 52°C y, las corrientes límite van desde 1,2A a los 31 °C, hasta los 2,2A a los 52°C.

Se observa cómo las curvas de polarización presentan un salto anómalo con disminución de la corriente entre 1,5V y 1,3V. Midiendo los potenciales individuales de las monoceldas se pudo comprobar que esta situación tiene lugar cuando al menos una de las monoceldas toma voltajes negativos y, consume potencia del resto del “stack”. Para evitar estas inversiones de voltaje que degradan las monoceldas, se decidió operar en un rango por encima de 1,5V.

### 3.2.2 Estudio del arranque

La evolución de la potencia, de la temperatura y, de los voltajes individuales de cada monocelda, durante el protocolo de arranque se muestra en la Fig. 4. Partiendo de un estado inicial de membranas secas (pila parada durante al menos 24h a temperatura y humedad ambientales, 23°C y 35% RH) se observa que a partir de unos 6 minutos la pila ya es capaz de dar una potencia de 2,3W. Teniendo en cuenta que durante el primer minuto el “stack” se encuentra en reposo (circuito abierto), podríamos afirmar que a los 5 minutos de funcionamiento, la pila está en condiciones de hacer funcionar todos los componentes de nuestra aplicación móvil, *mbot*.

### 3.2.3 Autonomía y comparación con baterías alcalinas comerciales

La energía almacenada por baterías de cualquier tipo varía en función de la velocidad a la que se consumen, es decir, de la potencia que consume la aplicación a la que están conectadas [4], mientras que la energía almacenada en forma de hidrógeno es independiente de la potencia consumida por la pila de combustible. Por ello, para el análisis comparativo de autonomía, hemos llevado a cabo el

ensayo de las baterías alcalinas a la potencia característica demandada por la aplicación en estudio, *mbot*.

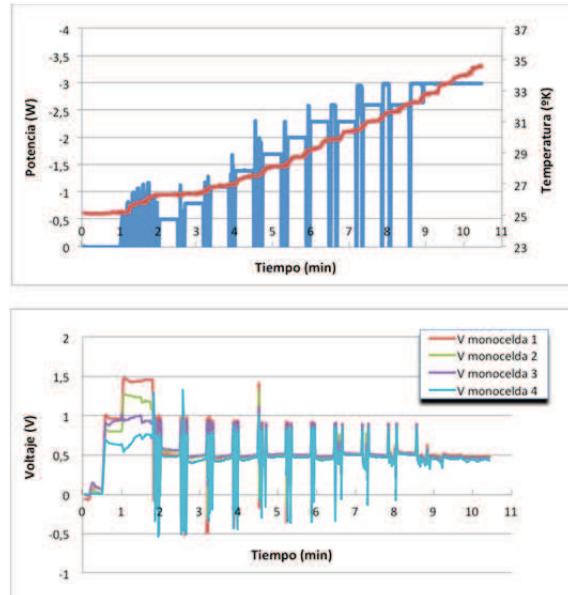


Fig.4 Arriba, evolución de la potencia (azul) y de la temperatura (rojo) durante el protocolo de arranque (inicio en minuto 1). Abajo, evolución de los voltajes de cada monocelda

Así, las baterías funcionaron a 0,5A constantes, dando una potencia media de 2,1W (Fig.5 rojo). Por su parte, la pila de combustible se tuvo funcionando a 1,1W de potencia, hasta que se consumió todo el hidrógeno contenido en el cartucho de hidruros metálicos, 0,836 g (Fig.5 azul).

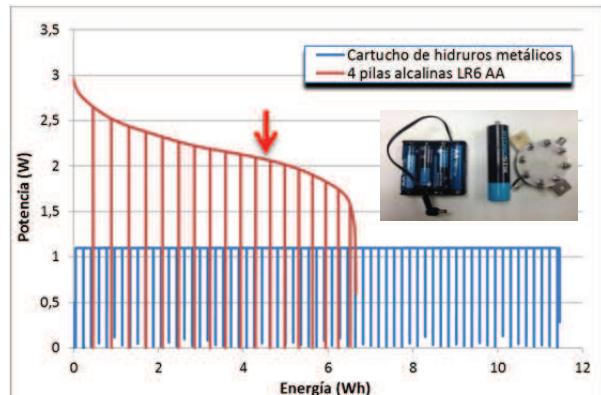


Fig.5 Potencia frente a la energía producida. Rojo, para 4 pilas alcalinas. Azul, para un cartucho de hidruros metálicos.

Los resultados obtenidos, representados en la Fig. 5 y resumidos en la Tabla.1 muestran que las baterías son capaces de producir una energía útil de 4,26 W·h (a tiempo superior la potencia de las baterías es inferior a 2,1W que requiere la aplicación), suficiente para hacer funcionar *mbot* a máxima potencia durante 2,03h. Mientras que el sistema de

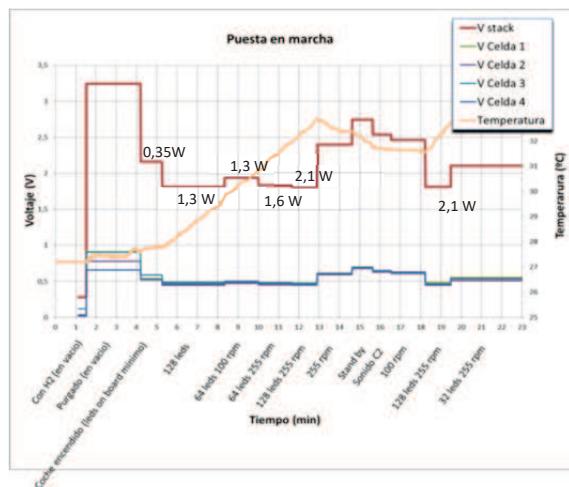
pila de combustible presenta una capacidad energética de 11,46 W·h, proporcionando al *mbot* una autonomía a máxima potencia de 5,46h.

**Tabla 1.** Comparativa de, la capacidad energética del cartucho de hidruros metálicos con la capacidad de las 4 pilas alcalinas LR6.

	Cartucho con 4 Pilas alcalinas 0,836g de H <sub>2</sub>	LR6 AA
Energía total	11,47Wh	6,70 Wh
Energía útil	11,47Wh	4,26Wh
Autonomía	<b>5,46 h</b>	<b>2,03 h</b>

### 3.3 Funcionamiento de MBOT con el sistema de pila de combustible

Finalmente se instaló el sistema de pila de combustible sobre *mbot* (Fig. 1) y se pasó a la realización de las pruebas de funcionamiento, analizando la respuesta de la pila ante distintas demandas del *mbot*, mediante la activación de las ruedas, la pantalla y los sensores. Durante el proceso se monitorizó el voltaje y la temperatura de cada una de las celdas. Los resultados se muestran en la Fig.6.



**Fig.6** Rojo, evolución del voltaje total. Naranja, evolución de la temperatura. Abajo, evolución de los voltajes individuales.

A partir del minuto 4 se enciende el *mbot*, y se empiezan a consumir los 350 mW propios del estado “stand-by”. Al minuto 5 se enciende la pantalla de 128 leds y la pila da los 1,3 W necesarios. Al minuto 12 se ponen en marcha las ruedas, lo que requiere la máxima potencia de 2,1W, y la aplicación responde correctamente, sin embargo, cabe destacar que para mover las ruedas a la velocidad adecuada,

pantalla, inicialmente, disminuye su luminosidad hasta que la pila arranca completamente y llega a las condiciones óptimas de funcionamiento.

El hecho de que los voltajes individuales de las celdas sean tan similares, implica que la pila de combustible responde bien a estas demandas y por lo tanto, el “stack” se encuentra funcionando en el rango de voltaje aceptable.

### 4. CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo la instalación de un sistema de pila de combustible sobre un robot, *mbot*. Se ha demostrado que la pila de combustible con hidrógeno almacenado funciona correctamente duplicando la autonomía del robot frente a baterías alcalinas comerciales.

El sistema presenta limitaciones que requieren avances en los prototipos y sistema. El peso y volumen son mayores que las baterías; la pila requiere un arranque en sus primeros minutos (4-5) de funcionamiento, que implica que el robot no podrá iluminar los leds o mover las ruedas al 100% hasta pasado este tiempo. Otros aspectos como la durabilidad del sistema de pila de combustible deben ser analizados de cara a una posible comercialización de este tipo de montaje.

### Agradecimientos

Financiado por Proyecto E-LIG-E(ENE2015-70417-P) Min. Economía y Competitividad. Parte del trabajo corresponde a prácticas en empresa del estudiante M.O.de A de la Universidad Politécnica de Madrid.

### Bibliografía

- [1] J. Fernández-Moreno, G. Guelbenzu, A.J. Martín, M.A. Folgado, P. Ferreira-Aparicio, A.M. Chaparro, Appl. Energy 109 (2013) 60.
- [2] P. Ferreira-Aparicio y A.M. Chaparro, patente “Pila de Combustible” ES 2466590 A1, 2013.
- [3] Ver, J.J. Conde, M.A. Folgado, A. Fernández-Sotillo, P. Ferreira Aparicio, A. M. Chaparro. “Uso de capas catalíticas depositadas por electropulverización en pilas portátiles de tipo PEMFC”.
- [4] <http://data.energizer.com/pdfs/3-335i.pdf>

## Organiza:



**APPICE**  
Asociación Española  
de Pilas de Combustible  
[www.appice.es](http://www.appice.es)

C/ Utrecht 3  
28232 Las Rozas de Madrid (Madrid)  
Tel.: +34 91.029.10.78  
[www.appice.es](http://www.appice.es)  
E-mail: [gestion@appice.es](mailto:gestion@appice.es)

## Con la colaboración de:



## Patrocinadores:



Ayuntamiento  
de **Huesca**  
Turismo



**alosa**



## Colaboradores:



**LIBRO DE COMUNICACIONES  
CONGRESO IBEROAMERICANO DE  
HIDROGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE  
IBERCONAPPICE 2017  
Parque Tecnológico Walqa, Huesca  
17 al 20 de octubre de 2017**

ISBN: 978-84-697-6342-1

