



Aplicaciones

Sesión 5

REVA ELECTRIC VEHICLE CONVERSION TO A HYDROGEN FUEL CELL POWERED VEHICLE

L. Nasarre Cortés, J. Mora Larramona, M. Ruperez Cerqueda and L. Correas Usón

Fundación para el desarrollo de las nuevas Tecnologías del Hidrogeno en Aragón, , Pt.Walqa, Cuarte, 22197 Huesca, España

RESUMEN: *En este proyecto se desarrolla con el objetivo de eliminar los problemas que existen en los vehículos eléctricos de batería mediante la inclusión de una pila de combustible en el tren de potencia del vehículo.*

Los principales problemas en el vehículo eléctrico de baterías son la autonomía y el tiempo de recarga. Usando una pila de combustible de hidrógeno, se aumenta la autonomía y se reduce el tiempo de recarga de los vehículos eléctricos de batería. La pila de combustible se encargaría de recargar la batería (REEV: "vehículo eléctrico de autonomía extendida") o directamente alimenta el motor eléctrico (FCEV: "Vehículo Eléctrico de Pilas de Combustible").

Se realizaron un ensayos en el entorno del Parque Tecnológico Walqa (Huesca), para después comprobar dichos ensayos con un modelo del tren de potencia del vehículo desarrollado en el entorno de Simulink, y de esta manera obtener el tren de potencia óptimo para nuestro vehículo.

La construcción de ambos modelos (REEV y FCEV) se ha realizado cumpliendo todos los requisitos para la homologación de los vehículos impulsados por hidrógeno (anexo IV del Reglamento 79/2009).

ABSTRACT: *With the famous "climate change" appear the figure of "electric vehicle", the mobility of this vehicle does not produce any emissions.*

The main problems in the electric vehicle are the autonomy and the recharge time. Using a hydrogen fuel cell, able to increase autonomy and reduce the time to recharge electric vehicles. The fuel cell would be responsible for recharging the battery (REEV: "Range extended electric vehicle") or directly from the electric motor power (FCEV: "Fuel Cell Electric Vehicle").

We performed a model of the vehicle powertrain, in Simulink, to simulate different powertrain configurations for later with the optimal configuration of power train perform different tests on the test bench hybrid drive, available at the Aragon Hydrogen Foundation.

The construction of both models (REEV and FCEV) was performed meeting all requirements for approval of hydrogen powered vehicles (Annex IV of Regulation 79/2009) and so the use of these vehicles is a reality.

Palabras clave: BEV, REEV, FCEV

Keywords: BEV, REEV, FCEV

1. INTRODUCCIÓN

Los coches eléctricos (vehículos eléctricos de baterías o de pilas de combustible de hidrógeno) son una oportunidad para el desarrollo de una nueva cultura de movilidad, lo que hoy en día conocemos como movilidad sostenible. Y con este proyecto se intenta descubrir algunos de los beneficios atribuidos a los vehículos eléctricos, su funcionamiento y los diferentes tipos de tecnologías existentes.

Este proyecto forma parte del proyecto europeo LIFE (LIFE-ZeroHytechPark) y con este proyecto se intentó poner en práctica la sostenibilidad en parques tecnológicos a través del manejo óptimo de la energía a través de sistemas basados en tecnologías del hidrógeno y las energías renovables.

Para este proyecto se ha previsto, la transformación de un vehículo de batería eléctrica a un vehículo eléctrico de pila de combustible, por lo

que se han estudiado las dos tecnologías de este tipo de vehículo (FCEV y REEV).

Para elegir la mejor configuración del tren de potencia del vehículo, es decir, con la que se obtiene una mayor autonomía. Se han realizado dos simulaciones diferentes una que simula una conducción urbana y otra que simula conducción en carretera.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Inicialmente, se procederá a la recopilación de información sobre las diferentes alternativas existentes.

Las alternativas que se estudiarán son:

- Vehículo eléctrico de baterías (BEV)
- Vehículo eléctrico de autonomía extendida (REEV)
- Vehículo eléctrico de pila de combustible de hidrógeno (FCEV)

Una vez recogida y analizada toda esta información, se va a proceder a la comparación entre las diferentes alternativas que teóricamente se pueden obtener y las obtenidas con el software Matlab / Simulink y de esta manera la solución óptima, será con la que se obtiene mayor autonomía.

La principal ventaja que tiene la introducción del hidrógeno en los vehículos eléctricos es que la autonomía se incrementa considerablemente y el tiempo de recarga se reduce considerablemente comparado con el tiempo de recarga de los vehículos eléctricos de baterías, el repostaje de hidrogeno es similar en tiempo y en forma al repostaje con gasolina.



Fig. 1. Hidrogenera situada en las instalaciones de la Fundación Hidrogeno Aragón.

A continuación se muestran los ciclos de conducción que se utilizaron para la simulación de la conducción urbana y para la conducción en carretera. En las siguientes figuras se muestra la potencia consumida por el vehículo eléctrico REVA en función del tiempo.

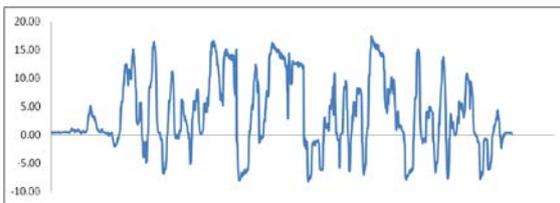


Fig. 2. Ciclo de conducción urbana.

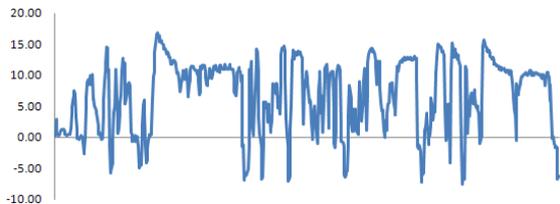


Fig. 3. Ciclo de conducción interurbana.

Para calcular la autonomía vehículo ha utilizado las siguientes ecuaciones. Estas también se utilizará en el modelo desarrollado en Matlab / Simulink. [4]

Para el cálculo de la energía suministrada por las baterías utilizamos la ecuación (1).

$$kWh (baterias) = Tension(V) * Capacidad(Ah) \quad (1)$$

Para calcular la cantidad de hidrogeno disponible, se utilizara la ecuación (2).

$$g H_2 = \frac{\rho_{H_2} \left(0,0899 \frac{kg}{Nm^3}\right) * Volumen (l) * presión(bar)}{Factor de compresibilidad} \quad (2)$$

El factor de compresibilidad depende de la presión de almacenamiento del hidrogeno. Por ejemplo, para una presión de almacenamiento de 250 bar. el factor de compresibilidad es 1.166.

Para calcular la energía que produce la pila de combustible de hidrógeno utilizaremos la ecuación (3).

$$kWh (FC) = \frac{Potencia FC (kW) * g H_2}{Consumo FC \left(\frac{g}{min}\right) * 60} \quad (3)$$

Para calcular la energía total almacenada en el tren de potencia utilizaremos la ecuación (4).

$$kWh = kWh (baterias) + kWh(FC) \quad (4)$$

Para calcular la autonomía del vehículo utilizaremos las ecuaciones (5) y (6).

$$Autonomia (min) = \frac{kWh}{Consumo medio (kW)} * 60 \quad (5)$$

$$Autonomia (km) = \frac{Autonomia (min) * Veloc media \left(\frac{km}{h}\right)}{60} \quad (6)$$

2.1 Vehículo electrico de baterías

Es un vehículo que utiliza la energía química almacenada en las baterías para el movimiento de su eje. Como su propio nombre indica los vehículos eléctricos utilizan motores eléctricos en lugar de motores de combustión interna, para la recarga de las baterías existen puntos de recarga diseñados para tal función.

Uno de los principales problemas de este tipo de vehículos es la inexistencia de infraestructura suficiente para la recarga de estos vehículos. [3]



Fig. 4. Vehículo eléctrico de baterías REVA.

2.2 Vehículo eléctrico de pila de combustible de hidrógeno.

El modo de operación del FCEV se basa en el funcionamiento básico de una pila de combustible.

Una pila de combustible es un dispositivo que convierte la energía química de un combustible en electricidad a través de una reacción química con oxígeno u otro agente oxidante. El hidrógeno es el combustible más común, pero los hidrocarburos como el gas natural y alcoholes como el metanol se utiliza a veces. Las pilas de combustible son diferentes de las baterías en que requieren una fuente constante de combustible y oxígeno para funcionar, pero pueden producir electricidad continuamente durante el tiempo que estas entradas se suministran. [1].

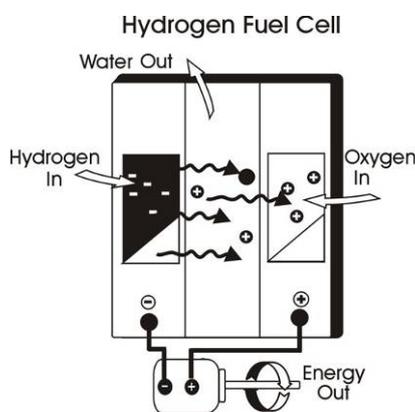


Fig. 5. Esquema de funcionamiento de una pila de combustible de hidrógeno.

El hidrógeno es almacenado en forma de gas en un depósito. Este hidrogeno almacenado a alta presión alimenta a la pila de combustible de hidrogeno y la energía que produce la pila de combustible se utiliza para el movimiento del vehículo.

2.3 Vehículo eléctrico de autonomía extendida.

Mediante la instalación de nuestro sistema de hidrógeno (pila de combustible y depósitos), se puede conseguir una manera auxiliar de recargar las

baterías, por lo tanto, con esta recarga se aumentará la autonomía que presenta el vehículo eléctrico. En un vehículo eléctrico de autonomía extendida, su operación puede ser comparada a un cargador de baterías que se instala dentro de vehículo eléctrico, La electricidad producida se almacena en las baterías y estas proporcionan energía para el movimiento del motor eléctrico, responsable del movimiento del vehículo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, aparecen dos tablas en las que se exponen los resultados de las diferentes simulaciones. En la primera tabla se representa los resultados de las simulaciones teóricas y en la segunda se representan los resultados obtenidos con modelo desarrollada en Matlab/Simulink.

Tabla 1. Resultados de las simulaciones teóricas

| POWER TRAIN | AUTONOMIA URBANA | AUTONOMA EN CARRETERA |
|-------------|------------------|-----------------------|
| REVA | 80 km | 75,43 km |
| REEV | 142 km | 134,3 km |
| FCEV | 122 km | 120 km |

Tabla 2. Resultados de las simulaciones con Matlab/Simulink

| POWER TRAIN | AUTONOMIA URBANA | AUTONOMIA EN CARRETERA |
|-------------|------------------|------------------------|
| REVA | 80 km | 75 km |
| REEV | 100 km | 98 km |
| FCEV | 104 km | 100 km |

4. CONCLUSIONES

Este proyecto fue desarrollado con el objetivo de estudiar las diferentes tecnologías de vehículos eléctricos existentes en el mercado, para a continuación realizar una conversión de un vehículo eléctrico de baterías a un vehículo eléctrico con pila de combustible de hidrogeno.

- BEV (Vehículo eléctrico de baterías).
- REEV (Vehículo eléctrico de autonomía extendida).
- FCEV (Vehículo eléctrico de pila de combustible)

Se han simulado diferentes configuraciones para conocer la autonomía a través de dos circuitos:

- Circuito Urbano.
- Circuito de carretera

Para la verificación de estas simulaciones se utilizó un modelado desarrollado en el entorno de Matlab / Simulink, que simulaba el tren de potencia de potencia de las diferentes tecnologías estudiadas

Un problema con el BEV, es el largo período de tiempo para recargar el vehículo, este problema se

resuelve mediante la adición de una pila de combustible de hidrógeno (REEV y FCEV), donde el período de tiempo de recarga se asemeja a repostar vehículo convencional.

Las principales ventajas ofrecidas por los vehículos eléctricos en comparación con el combustible para vehículos (gasolina o diesel), es el menor coste de combustible (c € / km) y las emisiones producidas por los vehículos eléctricos son nulas, si la electricidad para recargar las baterías de hidrógeno es producida por energías renovables.

Entre las diferentes tecnologías, se concluye que las mejores configuraciones, es decir que, con mayor autonomía, son aquellos trenes de potencia en los que se añaden pilas de combustible de hidrogeno.

Las mejores opciones son las siguientes:

- REEV (Extended Range Electric Vehicle)

-FCEV (Vehículo Eléctrico de Celdas de Combustible).

Destacar que en este proyecto no se ha llegado al porcentaje optimo de hibridación existente, ya que lo que se pretendía con este proyecto era conocer las diferentes opciones existentes y demostrar como con la adición de una pila de combustible de hidrogeno en el tren de potencia de un vehículo electrico la autonomía se ve incrementada considerablemente.

A la hora de hacer la transformación del tren de potencia del vehículo, todas las modificaciones que haya que realizar se harán cumpliendo el Anexo IV del Reglamento 79/2009

Agradecimientos

A Joaquín Mora y a todos mis compañeros de la Fundación para el Desarrollo de Tecnologías del Hidrógeno en Aragón por la ayuda que me han ofrecido para la realización de este proyecto.

Bibliografía

- [1] IQBAL HUSAIN. Electric and Hybrid Vehicles. Design Fundamentals. USA: CRC Press, 2003.
- [2] REVA [<http://www.petrolfreeworld.com>]
- [3] Mehrad Ehsani, Yimi Gao, Al Enadi. Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles. USA. CRC Press, 2010.
- [4] Bei Guu, Woon Kin, Bill Bion. Fuel Cells (Modelling, Control and Applications). USA. CRC Press, 2010.

MODELO Y DIMENSIONAMIENTO DE UNA UNIDAD AUXILIAR DE POTENCIA PARA AVIACIÓN BASADA EN TECNOLOGÍA SOFC

L. Aldea¹, G. Cabaco¹, A. Lafuente¹, D. Sopena¹, A. Casado², M.T. Escudero², C. García²

¹CIDAUT, Parque tecnológico de Boecillo, parcela 209, 47151 Boecillo, Valladolid, España

²Abengoa Hidrógeno, Campus Palmas Altas, 41014 Sevilla, España

RESUMEN: Se ha desarrollado un modelo energético para un sistema auxiliar de potencia para aviación basado en tecnología SOFC con el fin de disponer de una herramienta adecuada para el dimensionado de los distintos elementos de la instalación. El sistema modelado incluye una parte de generación eléctrica, formada por la SOFC y un grupo motor/generador-turbina-compresor, y otra parte de acumulación, formada por baterías o ultracondensadores. El modelo tiene como entradas las especificaciones características de cada uno de los elementos de la APU-SOFC y proporciona parámetros de funcionamiento de los mismos (potencias, voltajes e intensidades, estados de carga, etc.) así como presión, caudal, composición y temperatura para cada una de las corrientes de fluidos entre los distintos elementos. En el artículo se muestran resultados de dimensionamiento para la APU-SOFC de un MEA (more electric aircraft) de 200 pasajeros a partir de una curva de demanda de potencia eléctrica durante una misión típica. También se presentan resultados de un estudio sobre la influencia de distintas variables en el rendimiento de la APU-SOFC.

ABSTRACT: An energy model for an auxiliary power unit (APU) for an aircraft based on SOFC technology has been developed with the aim of having an adequate tool for sizing the different elements of the APU. The model includes a system for electric generation, containing the SOFC and a group motor/generator-turbine-compressor, and another system for accumulation, which includes batteries or supercaps. The inputs of the model are characteristic specifications of each element of the APU-SOFC and it provides operating parameters (power, voltage and current, state of charge, etc.), as well as pressure, mass flow, composition and temperature for every fluid flow of the APU-SOFC. Sizing results for a 200 passengers MEA (More Electric Aircraft) APU-SOFC are presented, based on electric power demand during a typical mission. Last, results comprising the influence of different variables in the efficiency of the APU-SOFC are also presented.

Palabras clave: Unidad auxiliar de potencia, SOFC, avión, batería, MEA

Keywords: Auxiliary power unit, SOFC, aircraft, battery, MEA

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de un modelo que permita el dimensionamiento de una unidad auxiliar de potencia (en adelante, APU) para aviación basado en tecnología SOFC (pilas de combustible de óxido sólido) está englobado dentro del Proyecto de investigación en Sistemas Avanzados para un avión más eco-eficiente (PROSAVE2) en el marco del programa CENIT.

Las ventajas que se podrían derivar del empleo en aviones de unidades auxiliares de potencia basadas en pilas de combustible de óxido sólido, APU-SOFC, respecto a las convencionales basadas en una turbina, APU-T, son una mejora del rendimiento de la generación eléctrica a partir del combustible en el avión, que lleva asociado un menor peso de combustible embarcado, y una reducción muy considerable de NO_x, que sería de especial interés en el aeropuerto o en sus proximidades. En la actualidad, todavía existen numerosos retos para poder implantar la tecnología SOFC en aviación, como son: su inmadurez en

aplicaciones de transporte, disminución del rendimiento con los ciclos de encendido y apagado, necesidad de someter al combustible típico de aviación a procesos de reformado (que se realizaría a bordo) y desulfurado (obligatoriamente en tierra por el tamaño actual de los equipos) y menores potencia específica y densidad de potencia que las APU-T convencionales, si bien, en algunos estudios se considera que este mayor peso de la APU-SOFC puede ser contrarrestado por su mejor rendimiento.

En los aviones actuales, la APU-T puede proporcionar energía en forma eléctrica, hidráulica y neumática, y se utiliza principalmente en tierra. En vuelo la energía se obtiene a partir de los motores principales y la APU-T se reserva para casos de emergencia. El uso de una APU-SOFC cobra sentido en el escenario de un MEA (more electric aircraft), donde elementos neumáticos e hidráulicos son sustituidos por actuadores eléctricos [1], y donde la APU-SOFC se emplearía durante todas las etapas de la misión, asumiendo cargas que actualmente se alimentan con energía proveniente de los motores principales de la aeronave.

2. ARQUITECTURA DE LA APU-SOFC

El esquema de partida considerado para el modelo de la APU-SOFC se muestra en la Fig. 1. Entre los elementos principales del sistema se tiene un compresor que suministra el caudal de aire requerido por el sistema. Un reformador transforma el combustible de aviación desulfurado a un combustible admisible por la SOFC. Se ha pensado en un reformador auto térmico (ATR) o de oxidación parcial catalítica (CPOX) frente a un proceso de reformado con vapor (SR, de sus siglas en inglés) por su menor tamaño y porque no requieren aporte externo de agua. Esto supone menor peso y volumen, que son factores claves en el transporte aéreo. Como la SOFC trabaja con exceso de aire y de combustible, la energía química de los gases que salen del ánodo se aprovechan en un quemador. Los gases quemados alimentan una turbina acoplada al compresor y al motor/generador. Esta configuración permite generar potencia eléctrica adicional cuando la potencia entregada por la turbina es mayor que la consumida por el compresor. En caso contrario, el motor debe apoyar a la turbina para mover el compresor. También se incluye un sistema de recuperación de agua de los gases de salida del ánodo para alimentar el proceso de reformado, así como una serie de intercambiadores de calor para precalentar la corriente de aire tras el compresor, aprovechando la energía de las corrientes de salida del cátodo de la SOFC y de la turbina.

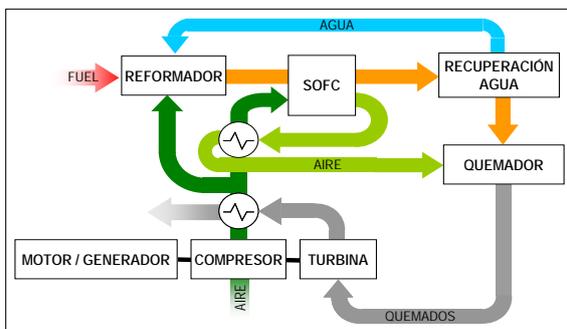


Fig. 1. Esquema general de la arquitectura de la APU-SOFC.

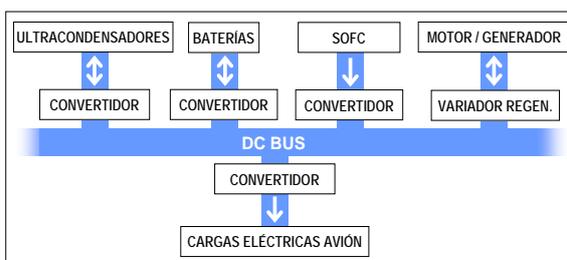


Fig. 2. Esquema de integración de los elementos de generación, acumulación y consumo eléctrico de la APU-SOFC.

En la Fig. 2 se muestra la integración de los elementos eléctricos de la APU-SOFC, que están

todos conectados a un bus de continua mediante sus correspondientes convertidores.

3. CONSIDERACIONES DEL MODELO

El modelo, programado en Excel-VBA, tiene como entradas las especificaciones características de cada uno de los elementos de la APU-SOFC que permiten simular el comportamiento de los mismos. Entre otras entradas se tienen: potencias nominales, curvas de rendimientos, eficiencias, parámetros de funcionamiento, temperaturas de trabajo de los equipos, coeficientes de pérdidas de carga, comportamiento a transitorios, curvas características de comportamiento, etc.

También son entradas del modelo las condiciones de presión y temperatura del aire que entra al compresor así como la presión de descarga de la turbina. Se pueden considerar dos modos de funcionamiento aire-ambiente y aire-cabina en función de si el compresor se alimenta de aire ambiente o de aire de la cabina. Este último modo aumentaría el consumo del compresor del aire de cabina, lo que no está recogido en el modelo.

El modelo también tiene como entrada la evolución temporal de la demanda potencia eléctrica por parte de las cargas de la aeronave a lo largo de las distintas etapas de una misión. En cada uno de los instantes de tiempo que forman esta curva, las estrategias de control implementadas buscan el punto de funcionamiento del sistema que cumple la condición de que el balance de potencia en el bus de continua es nula, es decir, que la potencia proporcionada por la APU-SOFC es exactamente la requerida para cubrir la potencia demandada.

Para cada uno de estos instantes de tiempo el modelo proporciona: caudal, composición, presión y temperatura de todas las corrientes de fluidos entre los elementos del sistema; potencia de los distintos elementos; voltajes e intensidades de los elementos eléctricos, estado de carga de elementos de acumulación, etc.

La presión y el caudal de aire que requiere el sistema se ha impuesto como una función de la potencia que proporciona la SOFC, y se ha considerado que el compresor es capaz de suministrar el caudal de aire requerido a la presión requerida independientemente de las condiciones de admisión del compresor, que varían con la altura.

4. DIMENSIONAMIENTO EN BASE A LA DEMANDA DE POTENCIA ELÉCTRICA

El dimensionado de la APU-SOFC se debería afrontar en base al cumplimiento una serie de especificaciones fijadas en el diseño del MEA, tras la evaluación de las cargas eléctricas a las que debe

alimentar la APU en cada una de las etapas del vuelo y el análisis de la capacidad que deben tener las fuentes de generación eléctrica de la aeronave para distintas condiciones de funcionamiento (normales, en situaciones de emergencia), respuesta a transitorios, etc. Ante la escasez de este tipo de información, se plantea el dimensionado de la APU-SOFC como el menor tamaño de sistema capaz de proporcionar los requerimientos definidos por una curva de demanda de potencia de las cargas eléctricas del avión durante una misión típica.

4.1. Curva de demanda de potencia eléctrica

La demanda de potencia eléctrica para la APU de un MEA depende de distintas variables como el tamaño y tipo de avión, su grado de electrificación, tipo de misión, otros sistemas de generación presentes en el avión y reparto de cargas entre ellos, etc. Todo esto hace que en la bibliografía se encuentren distintos tipos de curvas de demanda de potencia eléctrica para un MEA [2, 3]. Tomando como base valores encontrados en estas referencias, se ha derivado una posible curva de demanda de potencia eléctrica para la APU-SOFC de un avión de 200 pasajeros de media distancia en una misión típica. En la Fig. 3 se muestra esta curva de demanda de potencia, P_CAR, que comprendería la suma de todas las cargas eléctricas del avión excepto la del sistema antihielo. También se representa la altura de vuelo y las presiones y temperaturas ambiente y en cabina.

La etapa de crucero, de mayor duración y donde P_CAR es prácticamente constante, determina el tamaño de la SOFC que requiere el sistema.

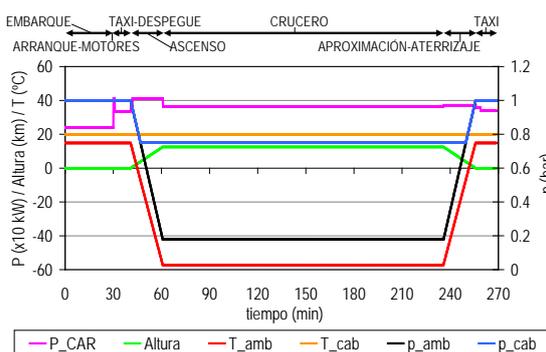


Fig. 3. Curva típica de demanda de potencia eléctrica para la APU-SOFC de un MEA de media distancia de 200 pasajeros.

4.2. Resultados de funcionamiento del sistema dimensionado

Se han considerado dos modos de funcionamiento de la APU-SOFC: aire-cabina y aire-ambiente. En la Tabla 1 se muestran la potencia nominal de la SOFC, P_n, y el tamaño del sistema de acumulación requerido (batería o ultracondensador)

para cada modo. El tamaño del sistema de acumulación depende, en gran medida, de la velocidad de respuesta del sistema de generación ante transitorios, que se ha supuesto limitado por el transitorio de la SOFC y para el que se ha tomado un valor de 1% de P_n por segundo.

Tabla 1. Potencia de la SOFC y tamaño del sistema de acumulación requerido para los dos modos de funcionamiento.

| Aire | P _n (kW) | batería | ultracondens. |
|----------|---------------------|----------------|---------------|
| cabina | 400 | 100 # x 200 Ah | 360 # x 63 F |
| ambiente | 615 | 100 # x 90 Ah | 12 # x 63 F |

En la Fig 4 se muestran resultados del sistema dimensionado para modo aire de cabina con baterías (BAT) y en la Fig 5 para el sistema dimensionado en modo aire ambiente con ultracondensadores (CAP).

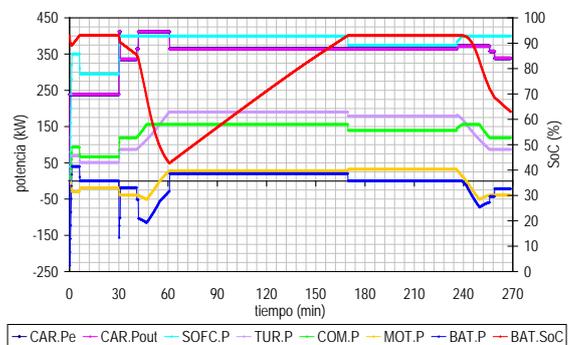


Fig. 4. Resultados del sistema dimensionado para aire de cabina y baterías. Variables en la leyenda: potencia eléctrica demandada y entregada; potencias de SOFC, turbina, compresor, motor/generador y batería; y estado de carga de la batería.

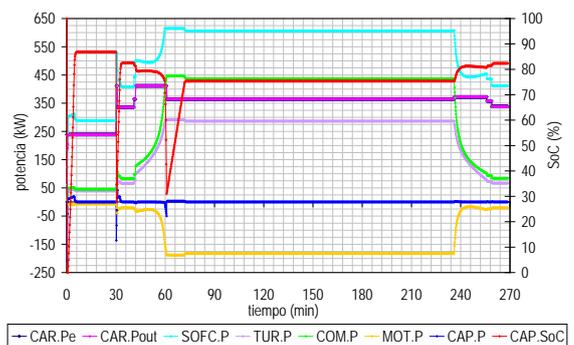


Fig. 5. Resultados del sistema dimensionado para aire ambiente y ultracondensadores (leyenda similar a Fig.4)

El modo aire-cabina requiere de un sistema de acumulación de mayor energía, como delata la forma más ancha de los picos de BAT.P que de CAP.P en las Fig. 4 y Fig. 5 respectivamente. La potencia de acumulación es bastante similar en ambos casos. Esta relación entre potencia y energía del sistema de acumulación hace inviable, por tamaño, el empleo de ultracondensadores en el modo aire ambiente pero factible en el modo aire cabina.

La ventaja de emplear aire de cabina sobre el rendimiento de la APU-SOFC se muestra también en la Fig. 6, donde se compara el rendimiento del sistema de generación en ambos modos a lo largo de la misión. Si bien es cierto que el modo aire-cabina aumenta el consumo del compresor de cabina del avión, este modo supone unas condiciones de admisión más constantes para el compresor de la APU-SOFC. Además, cabría la posibilidad de emplear las renovaciones del aire de cabina como admisión a la APU-SOFC.

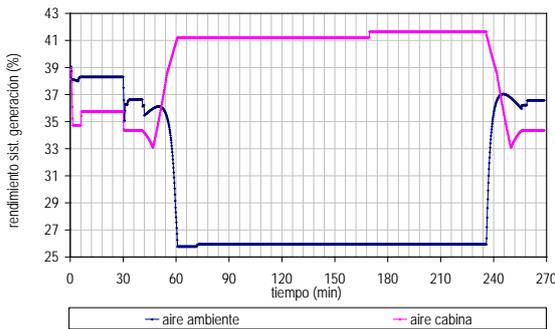


Fig. 6. Rendimiento del sistema de generación en ambos modos de funcionamiento.

5. ESTUDIO PARAMÉTRICO

La Fig. 7 muestra la influencia de pequeñas variaciones de una serie de parámetros de funcionamiento de la APU-SOFC (con SOFC de 400kW) sobre el rendimiento de su sistema de generación, η_{gen} . La influencia se ha evaluado mediante la expresión (1)

$$\frac{\Delta\eta_{gen}}{\Delta X} \frac{X_{ref}}{\eta_{gen_ref}} \quad (1)$$

donde ΔX representa el incremento del valor del parámetro X en estudio y $\Delta\eta_{gen}$ el correspondiente incremento de valor en η_{gen} . El estudio se ha realizado con unos valores de referencia, subíndice ref, para las variables de entrada al modelo.

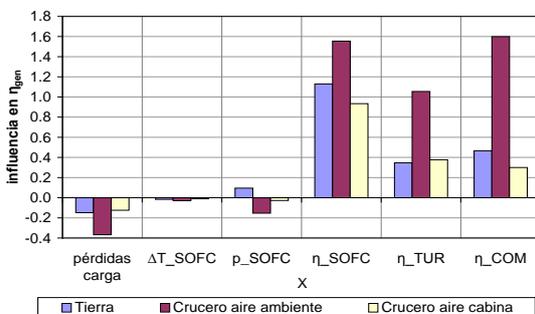


Fig. 7. Influencia de las pérdidas de carga en la APU-SOFC, salto térmico en la SOFC, presión de trabajo de la SOFC, y rendimientos de la SOFC, turbina y compresor en el rendimiento del sistema de generación de la APU-SOFC

El estudio considera la SOFC funcionando a potencia nominal en tres condiciones: tierra, crucero con aire ambiente y crucero con aire cabina.

6. CONCLUSIONES

El modelo energético desarrollado permite el estudio del funcionamiento de la APU-SOFC a partir de las especificaciones características de cada elemento, así como su dimensionamiento a partir de una curva de demanda.

Se ha estudiado y comparado dos modos distintos de funcionamiento: aire-ambiente y aire-cabina. El modo aire-cabina requiere una APU-SOFC de menor tamaño que, además, trabaja en condiciones más constantes debido a un rango más estrecho de la presión de admisión del compresor.

El estudio paramétrico indica que los parámetros de mayor influencia en el rendimiento del sistema de generación de la APU-SOFC son los rendimientos de la SOFC, turbina y compresor. Las pérdidas de carga y, en menor medida, la presión de trabajo de la SOFC, también presentan una influencia considerable, mientras que el salto térmico en la SOFC parece no tener una influencia significativa.

Agradecimientos

Se desea hacer mención a la buena colaboración del consorcio y a los organismos de financiación por la ayuda recibida.

Este proyecto ha sido subvencionado por el CDTI y ha sido cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional, FEDER, dentro del Programa Operativo Fondo Tecnológico 2007-2013.

Bibliografía

- [1] A. A. Abdelhafez, A. J. Forsyth 13th International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology, 2009.
- [2] H. Srinivasan, J Yamanis, R. Welch, S. Tulyani, L. Hardin, NASA/CR-2006-214458/VOL1
- [3] M. Gummalla, A. Pandey, R. Braun, T. Carriere, J. Yamanis, T. Vanderspurt, L. Hardin, NASA/CR—2006-214457/VOL1

ANÁLISIS DE FACTORES PREDOMINANTES EN LA OPTIMIZACIÓN DE VEHÍCULOS LIGEROS HÍBRIDOS PROPULSADOS POR PILA DE COMBUSTIBLE EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN URBANA DE MERCANCÍAS

S. Sánchez Monclús, J. Gallego Navarro, E. Larrodé Pellicer

Universidad de Zaragoza. C/ María de Luna s/n. Zaragoza. España.

RESUMEN: El objetivo de este estudio se basa en el análisis de factores presentes en el diseño de vehículos ligeros híbridos propulsados por pila de combustible destinados a un sistema de distribución urbana de mercancías con la finalidad de obtener un ahorro en el consumo energético. Para ello se han diseñado dos configuraciones óptimas de vehículo, un vehículo grande capaz de realizar la distribución de la mercancía demandada, 2000 kilogramos él sólo, y cuatro vehículos de menor tamaño que realizan la distribución de la mercancía demandada pero repartida entre los cuatro vehículos, 500 kilogramos cada vehículo, y de este modo poder realizar una comparativa y poder determinar que tipo de ruta de distribución es más eficiente. El análisis se ha realizado mediante ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator) un software de simulación y modelado de vehículos. Ambos vehículos han sido simulados en diferentes tipos de ciclos de funcionamiento para poder analizar la influencia del tipo del ciclo de funcionamiento que realizan los vehículos y las resistencias a la rodadura a la que tienen que vencer los vehículos ya que algunas de ellas dependen del peso del vehículo.

ABSTRACT: The object of this study is the analysis of factors on the design of light hybrid vehicles whose propulsion is based on a fuel cell and electric motor which function is a urban freight system with the finality of obtain a energetic consumption saving. There are two optimal configurations, a big vehicle that transports all the freight, 2000 kg, and four small vehicles which transport only 500kg. In this way it has been possible do a comparative between the results. The analysis has been realized with ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator) a simulator software and modelling of vehicles. All the vehicles have been simulated in differences drive cycles for analyze the influence of drive cycle and the road resistances.

Palabras clave: Pila de combustible, ADVISOR, consumo energético, ciclos de funcionamiento.

Keywords: Fuel Cell, ADVISOR, energy consumption, drive cycle.

1. INTRODUCCIÓN

El transporte es el sector que presenta mayor consumo de energía, por encima de sectores como la industria, el comercio o el residencial. Más del 98% de la energía consumida por el transporte proviene del petróleo, lo que supone una excesiva dependencia de los combustibles fósiles. La distribución del petróleo se encuentra de forma desigual geográficamente por lo que la Unión Europea depende de terceros para poder obtener más de la mitad del petróleo que consume, por lo que la búsqueda y desarrollo de soluciones alternativas ya no es sólo una cuestión ambiental, sino que es también una necesidad estratégica de futuro.

Los sistemas de transportes realizan una función vital, pero no son considerados sostenibles debido a los numerosos efectos medioambientales: emisiones de gases de escape, suspensión de partículas contribuyentes al efecto invernadero y su consecuente deterioro de los hábitats y cambio climático, el ruido, la congestión del tráfico y los accidentes entre otros [1].

Todo sistema de distribución urbana de mercancías es fundamental para el desarrollo

económico de las ciudades, regiones y de los países. Una solución factible para disminuir la contaminación en las ciudades consiste en el diseño de una flota de vehículos ligeros híbridos propulsados por pila de combustible que realicen la distribución urbana de mercancías.

2. PARTE EXPERIMENTAL

El análisis se ha realizado a través del software de simulación ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator), herramienta de modelado flexible en la que se evalúa el funcionamiento y economía del consumo energético de vehículos térmicos, híbridos, con pila de combustible e híbridos entre otros. Los vehículos son simulados en diferentes ciclos de funcionamiento.

Los ciclos de funcionamiento consisten en secuencias de tiempo y velocidad, obtenidas a partir de información estadística representada en un área determinada. Estos ciclos reflejan la dinámica de conducción observada en operaciones reales.

El análisis se ha realizado para una demanda de mercancía 2000 kilogramos en dos puntos

equidistantes entre si y a su vez con la sede de la empresa. Se han establecido dos hipótesis de reparto. La hipótesis A consiste en un vehículo lo suficientemente grande para poder realizar él la distribución de la mercancía demanda y volver a la sede, Fig.1. La hipótesis B consiste en cuatro vehículos de menor tamaño de forma que cada uno reparta 500 kilogramos de mercancía de forma que dos vehículos se dirigen al punto uno y los otros dos vehículos abastecen al punto dos, Fig. 2.

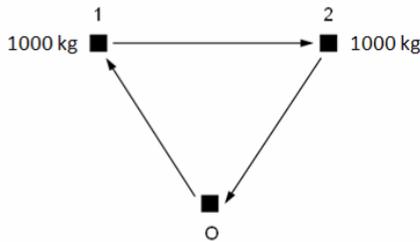


Fig. 1. Sistema de distribución de la hipótesis A.

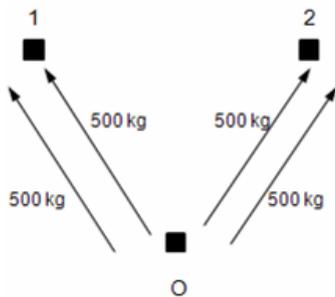


Fig.2. Sistema de distribución de la hipótesis B.

Al ser tres puntos equidistantes entre sí, hemos supuesto el mismo ciclo de funcionamiento en cada uno de los tramos. Para este caso hemos escogido el ciclo NYCC, Fig. 3, ciclo de carácter urbano con continuas paradas y arranques simulando de este modo el efecto de semáforos y rotondas entre otros, con una velocidad máxima de 45km/h y una distancia de recorrido de 1.9 kilómetros.

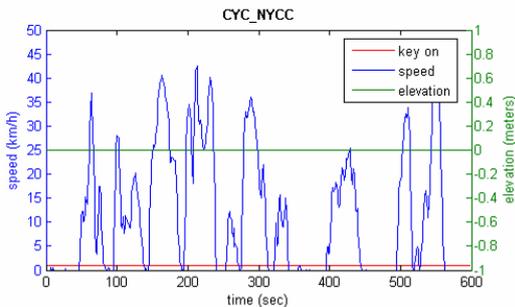


Fig. 3. Ciclo de funcionamiento simulado en cada uno de los tramos de las hipótesis A y B.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de resultados

Las configuraciones óptimas obtenidas a través de Advisor para cada uno de los vehículos, se encuentran en la tabla uno.

Tabla 1. Configuración de los vehículos.

| | Vehículo hipótesis A | Vehículos hipótesis B |
|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Fuel_Cell (kW) | 8 | 8 |
| Batería (Ah) | Pb (91) | Pb (91) |
| Nº módulos | 14 | 10 |
| Motor eléctrico (kW) | 75 | 75 |

Observando los datos en cuanto a consumo energético de los vehículos, Fig. 4, la hipótesis B, presenta menor consumo energético que la hipótesis A, a pesar de que en la hipótesis B la distancia recorrida es mayor por lo que el sistema de distribución de mercancías planteado en la hipótesis B resulta más eficiente energéticamente que el sistema de distribución de mercancías planteado en la hipótesis A.

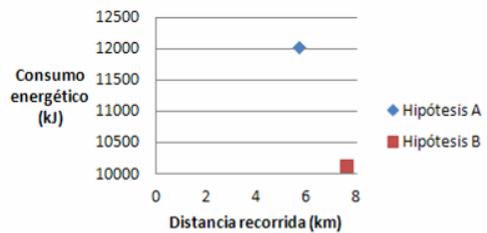


Fig. 4. Consumo energético de cada hipótesis.

En cambio, si se analiza el ratio Consumo/Carga útil transportada, Fig. 5, se observa que para la carga que transporta cada vehículo, el vehículo grande presenta menor ratio, por lo que no quiere decir que sea menos eficiente que los vehículos pequeños.

Este ratio, para la hipótesis A, se ha calculado con los datos del tramo TO1, ya que el ciclo de funcionamiento es el mismo en ambas hipótesis, por lo que la distancia recorrida es la misma y no afecta en los resultados, y además, ambos vehículos realizan el ciclo con su carga máxima.

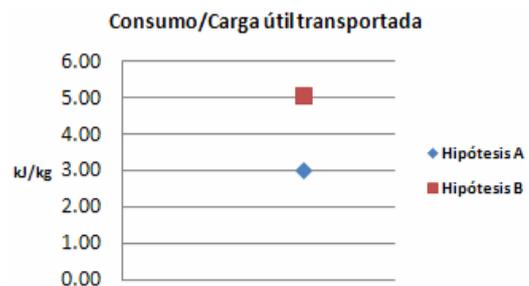


Fig. 5. Ratio Consumo/Carga útil transportada de cada hipótesis.

Analizando los resultados obtenidos, observamos que la hipótesis B, realizar la distribución de la mercancía demandada mediante cuatro vehículos de tamaño pequeño, presenta menor consumo energético que si es un vehículo grande quien realiza el reparto de la mercancía él solo, Fig. 4, a pesar de recorre menor distancia. En cambio si analizamos el ratio de consumo energético frente a la carga útil que transporta por cada vehículo, Fig. 5, es el vehículo grande, hipótesis A, el que presenta menor consumo energético por kilogramo de carga transportada.

Entre ambos vehículos, la gran diferencia que existe entre ellos es el peso total del vehículo, ya que en la hipótesis A, el vehículo con su carga máxima de transporte, 2000 kg, presenta un peso total de 4272 kg, mientras que los vehículos pequeños, con su carga máxima de transporte, 500 kg, presenta un peso total de 2169 kg, casi la mitad que el vehículo grande.

3.2. Análisis de las resistencias al avance

Al existir una diferencia de peso tan notable entre ambos vehículos, sin duda las fuerzas de oposición al avance a las que tienen que hacer frente los vehículos son muy distintas.

La resistencia a la rodadura, ecuación (1), y la resistencia de la inercia, ecuación (2), ambas depende del peso de vehículo por lo que la fuerza que tiene que vencer el vehículo de la hipótesis A para poder avanzar es mucho más elevada que la fuerza a la que tienen que vencer los vehículos pequeños. Por lo tanto, esta es una de las causas por la que la hipótesis A presenta mayor consumo energético total que la hipótesis B siendo que presenta menor ratio energético por carga transportada, Fig. 5.

$$R_r = \mu * P \tag{1}$$

$$R_a = m * a \tag{2}$$

La resistencia aerodinámica, al no depender del peso que es el principal factor diferente entre ambos vehículos, apenas influye ya que al ser el mismo ciclo de funcionamiento solo varía el coeficiente del área frontal. La resistencia a la pendiente no la consideramos ya que el valor de la pendiente en el ciclo de funcionamiento es de cero.

3.3. Influencia del ciclo de funcionamiento

El ciclo de funcionamiento es de carácter urbano, con frecuentes paradas y arranques simulando de este modo el efecto de rotondas, semáforos, etc, por lo que esas numerosas paradas y arranques influyen de manera desigual en cada vehículo debido a la gran diferencia de peso que conlleva a grandes diferencias en las fuerzas de oposición al avance de cada vehículo, y de ahí la

diferencia en el consumo energético total que presenta cada hipótesis.

Para ello, hemos analizado cada vehículo en un ciclo de funcionamiento de velocidad constante, Fig. 6, en el que no existen paradas ni arranques.

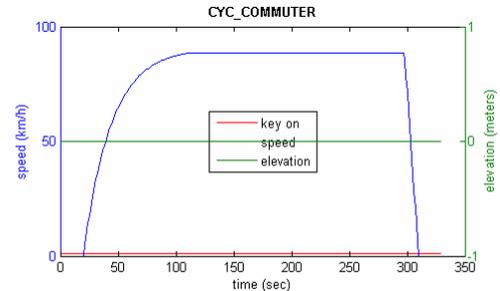


Fig. 6. Ciclo de funcionamiento de velocidad constante.

En este caso al ser un ciclo de velocidad constante las fuerzas de oposición al avance se minimizan con respecto al ciclo de la Fig. 3, y ahora se obtiene que es la hipótesis A la que presenta menor consumo energético, Fig. 7.

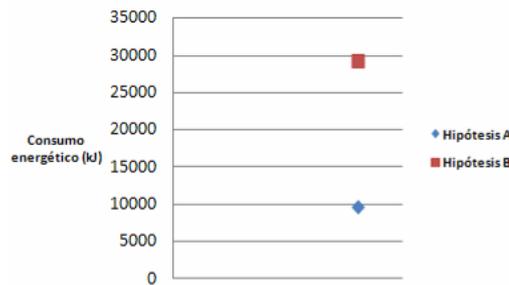


Fig. 7. Consumo energético de cada hipótesis con el ciclo de funcionamiento COMMUTER.

Para observar la influencia de las fuerzas de oposición al avance en el consumo energético de los vehículos, ensayamos ahora los vehículos en el ciclo de funcionamiento de la Fig. 8, un ciclo de velocidad constante pero en el que se ha añadido tres paradas y arranques.

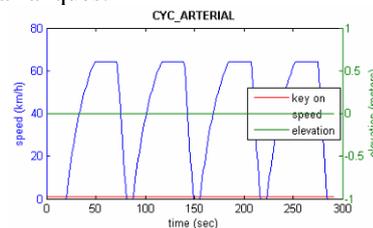


Fig. 8. Ciclo de funcionamiento de velocidad constante con tres paradas y arranques.

En este caso, la hipótesis A, sigue presentando menor consumo que la hipótesis B, Fig. 9, pero si se observan la Fig. 10, la diferencia en el consumo energético es menor, es decir a medida que en el ciclo se introducen paradas y arranques, las la diferencia entre los consumos energéticos comienza a disminuir.

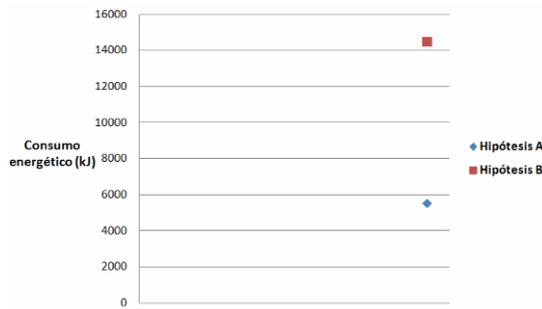


Fig. 9. Consumo energético de cada hipótesis con el ciclo de funcionamiento ARTERIAL.

En la Fig. 10, se encuentran reflejados el porcentaje de diferencia que existe entre el consumo energético de cada hipótesis en cada ciclo de funcionamiento ensayado y se puede observar como a medida que se van introduciendo paradas y arranques en el ciclo de funcionamiento, disminuyen la diferencia en el consumo energético.

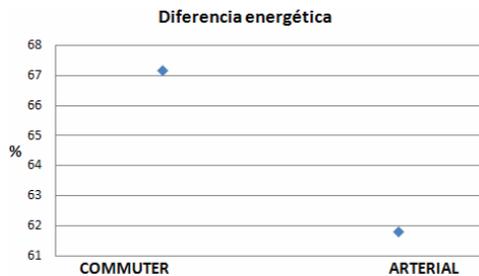


Fig.10. Porcentaje de diferencia energética entre las hipótesis en cada ciclo de funcionamiento.

4. CONCLUSIONES

Ante dos hipótesis de reparto, un vehículo grande capaz de realizar toda la distribución de la mercancía demandada, ó repartir la carga a transportar entre cuatro vehículos de menor tamaño, es la hipótesis de los cuatro vehículos de menor tamaño la que presenta menor consumo energético total. Este hecho hace pensar que los vehículos de la hipótesis B son más eficientes energéticamente que los vehículos de la hipótesis A.

Analizando los resultados obtenidos, se observa como el vehículo grande, para toda la carga que transporta presenta mejores ratios de consumo, Fig. 5, por lo que no quiere decir que el vehículo grande sea menos eficiente energéticamente que los vehículos pequeños.

La gran diferencia de peso que existe entre ambos vehículos, casi del 50%, hace que las fuerzas de oposición al avance a las que tiene que hacer frente los vehículos sean muy distintas en cada una de las hipótesis, por lo que al simular cada uno de los vehículos en ciclos de velocidad constante en los que apenas existen paradas ni arranques, es el vehículo grande quien presentan menor consumo

energético. Al ir introduciendo paradas y arranques al ciclo de funcionamiento, comienzan a observarse las diferencias en el consumo energético ya que la diferencia en el consumo entre el vehículo grande y los pequeños comienza a disminuir.

Por lo tanto, ante un sistema de distribución de mercancías los parámetros fundamentales para poder determinar la configuración óptima son la distancia recorrida, el peso de la mercancía a transportar y el tipo de ciclo de funcionamiento.

Bibliografía

- [1] G. Jeffrey, M, Nancy. The impacts of combustion emissions on air quality and climate-from coal to biofuels and beyond. *Atmospheric Environmental* 17 (2008), pp 201-213.
- [2] <http://www.avl.com/advisor>.
- [3] C. Doll, M. Wietschel. Externalities of transport sector and the role of hydrogen in a sustainable transport vision. *Energy Policy* 36. (2008) 4069-4078.
- [4] R. V. Helmut, U. Eberle. Fuel cell vehicles: Status 2007. *J. Power Sources* 165 (2007) 833-848.
- [5] E. Larrodé, J. Gallego, S. Sánchez. *Achieving efficient designs for energy and power systems for electric vehicles*. 14th International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications (2010).
- [6] S. Sánchez, J. Gallego, E. Larrodé. *Análisis de las prestaciones de los autobuses con pila de combustible. Consumo y emisiones frente a autobuses con sistema propulsor tradicional o híbrido*. III Congreso Nacional de Pilas de Combustible (2008).
- [7] S. Sánchez, J. Gallego, E. Larrodé. *Diseño y análisis de vehículos ligeros híbridos propulsados por pila de combustible en entorno urbano*. IV Congreso Nacional de Pilas de Combustible (2010).

INTEGRACIÓN DE UNA PILA HT-PEMFC CON UN REFORMADOR DE METANOL

E. Romero-Pascual, J. Soler

Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), Universidad de Zaragoza
C/ Mariano Esquillor, s/n, 50018, Zaragoza (España)

RESUMEN: Se ha modelado un sistema de producción de electricidad y calor combinado mediante el uso de una pila de combustible con membrana de intercambio de protones de alta temperatura alimentada con una corriente de hidrógeno procedente de un reactor de reformado de metanol con vapor. Para proporcionar el calor necesario a dicho reactor se contempló el uso de un combustor catalítico donde el calor generado por la combustión del metanol se aporta directamente al reactor. En el modelado, se buscó como objetivo la producción del hidrógeno suficiente para alimentar a una pila de 1 kW y cuya concentración de CO estuviese en torno a 2000 ppm. Además, se optimizó el sistema para aprovechar el calor de las diferentes corrientes mediante intercambiadores de calor para que la eficiencia energética fuese máxima. Se estudió la influencia en el resultado final de variables de operación como el aire necesario para el funcionamiento correcto del combustor, el vapor necesario para el reactor de reformado así como su temperatura óptima. Para el modelado de la pila se utilizó un modelo semiempírico publicado por otros autores para diseñar las dimensiones y número celdas del stack, así como la selección de temperatura de operación y la tolerancia a CO. Se verificó que es necesario un stack de 65 celdas para llegar a 1 kW de potencia operando a 150°C. La posibilidad de recircular el hidrógeno no convertido en el ánodo de la pila al combustor para aprovechar su calor de combustión hace que la eficiencia energética aumente considerablemente.

ABSTRACT: A fuel cell-based combined heat and power system using a high temperature proton exchange membrane fuel cell has been modelled. The fuel cell is fed with the outlet hydrogen stream from a methanol steam reforming reactor. In order to provide the necessary heat to this reactor, it was considered the use of a catalytic combustor whose generated heat by methanol combustion is directly transferred to the reactor. The modelling aims, as main objective, to achieve the hydrogen production necessary to feed fuel cell with a power of 1 kW and with a CO concentration around 2000 ppm. Moreover, the system was optimized to use the heat from the different streams by means of heat exchangers in order to reach the maximum energy efficiency. Operational variables like the air flow necessary for a suitable performance of the combustor, the steam flow necessary for the reforming reactor and its optimal temperature were also studied. A semiempirical model from literature was used in order to design the cells dimension and number of the stack and also the fuel cell operation temperature and CO tolerance. It was verified that is necessary a stack with 65 cells to reach 1 kW power operating at 150°C. The possibility of recycle the non converted hydrogen in the fuel cell anode to the combustor to use its combustion heat makes the energy efficiency increases significantly.

Palabras clave: modelado, sistema de pilas de combustible, micro-CHP, HTPEMFC, reformado de metanol

Keywords: modeling, fuel cell system, micro-CHP, HTPEMFC, methanol steam reforming

1. INTRODUCCIÓN

La producción de energía de forma descentralizada combinada, además, con el suministro de calor, e identificada con las siglas CHP (combined heat and power) según la literatura inglesa, es una tecnología muy factible para mejorar la eficiencia energética, la seguridad en el suministro, reducir los costes y producir energía de una manera medioambientalmente sostenible. Por estas razones, la UE y los gobiernos de muchos países potencian el empleo de este tipo de sistemas para poder cumplir los compromisos de emisiones asumidos en el Protocolo de Kyoto, tanto en el

marco global europeo como el de cada país de forma individual [1].

Una de las tecnologías ideales para ser empleadas en CHP a pequeña escala (μ -CHPs) para la generación combinada de energía eléctrica y calor son, precisamente, las pilas de combustible. Los sistemas μ -CHP pueden ofrecer una reducción considerable de las emisiones de CO₂ comparada con las emisiones de las actuales calderas de condensación en el sector doméstico, especialmente si están alimentados por una pila de combustible de tipo PEM.

Elevar la temperatura de trabajo en los sistemas μ -CHP hasta valores cercanos a los 150 °C resultaría muy adecuado para alcanzar una mayor eficiencia

energética [2]. Para ello, sería necesario que la pila PEM permitiese un régimen de trabajo por encima de los 100 °C, lo cual se consigue con las llamadas pilas PEM de alta temperatura (HT-PEMFC). Existen varias razones convincentes que soportan la operación de estos dispositivos a alta temperatura [3], como por ejemplo:

- 1) la cinética de las reacciones electroquímicas en ambos electrodos son mucho mejores
- 2) la gestión del agua en el cátodo es más sencilla al realizarse en fase vapor
- 3) el sistema de refrigeración se simplifica debido al mayor gradiente térmico entre la pila, el fluido refrigerante y el medio ambiente
- 4) el calor extraído puede recuperarse como otra fuente de energía
- 5) la tolerancia al CO de los materiales empleados en los electrocatalizadores se aumenta drásticamente, permitiendo el uso de hidrógeno de menor pureza (reformado).

Los sistemas que trabajan a temperaturas por debajo de 80 °C tienen una baja capacidad de extraer el calor liberado, requiriendo de intercambiadores de calor con un área superficial muy grande. El cambio hacia las condiciones de trabajo de las HT-PEMFC (por encima de los 150 °C) facilita el intercambio térmico por la propia diferencia de temperatura.

Como resultado, el sistema de enfriamiento se simplifica y las densidades de potencia específica tanto másica como volumétrica del sistema se incrementan. Si la temperatura de operación sobrepasase los 200 °C, se podría producir directamente vapor de agua el cual podría emplearse para calefacción. En resumen, la eficiencia global del sistema aumenta de forma significativa al aumentar la temperatura de operación de la pila PEM.

Los combustibles candidatos para su uso en sistemas de potencia basados en hidrógeno son el gas natural, metanol, etanol e hidrocarburos con más átomos de carbono y dimetil éter. Entre ellos, el metanol no requiere condiciones especiales de almacenamiento, tiene una alta relación H:C (4:1) y no presenta enlaces C-C, lo que minimiza la formación de coque [4]. Además, se puede utilizar derivados de biomasa para producir metanol (bio-metanol) [5].

La producción de hidrógeno a partir de metanol se puede llevar a cabo mediante reformado con vapor de agua (Eq. 1) [6],



El reformado con vapor de metanol produce una corriente de salida rica en hidrógeno (~75%) pero la naturaleza endotérmica de la reacción ($\Delta H^\circ_{298} = 49,5$

$\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) obliga a suministrar calor desde una fuente exterior (p.e. un combustor).

El sistema que se pretende modelar en el presente trabajo puede suponer un paso importante hacia una aplicación como es la generación de calor y electricidad a nivel doméstico o en lugares aislados a partir de un combustible renovable y fácil de obtener como es el metanol. El sistema consta de tres equipos principales: combustor catalítico, reactor de reformado de metanol y stack de pila de combustible.

2. MODELO DEL SISTEMA

El sistema propuesto, que se muestra en la Fig. 1, se ha modelado mediante el software HYSYS de AspenTech. El metanol, usado como combustible del sistema, es convertido a hidrógeno mediante un reactor de reformado con vapor de agua. El calor necesario para mantener una temperatura constante del reactor se proporciona mediante un combustor de metanol con aire que intercambia su calor con el reactor de reformado.

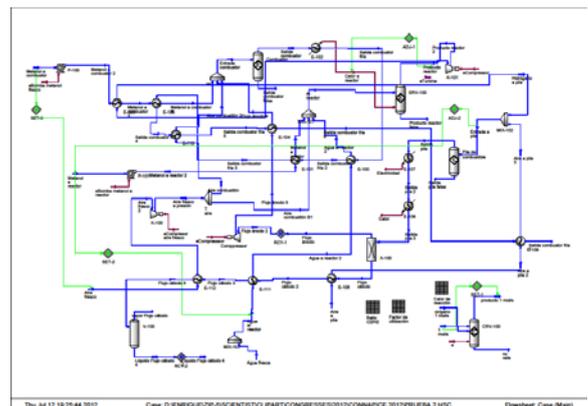


Fig. 1. Configuración del sistema micro-CHP propuesto.

La corriente de salida del combustor, una vez que calienta el reactor, es utilizada para precalentar las corrientes de aire y metanol del combustor, el aire que entra al cátodo de pila de combustible y generar el vapor para introducirlo en el reactor, aprovechando así el calor que todavía queda en la corriente y aumentando, de este modo, la eficiencia energética del sistema. Además, se plantea una separación del agua generada en la pila mediante un condensador que la separa del nitrógeno y oxígeno que no haya reaccionado con objeto de aprovechar su temperatura y reducir la capacidad del depósito de agua para aportarla al sistema.

El objetivo que persigue el sistema es conseguir la máxima eficiencia global, incluyendo el balance de energía, con el mínimo consumo de metanol para obtener, una vez alcanzado un régimen estable, 1 kW eléctrico en el stack de pila de combustible.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observó que una variable muy relevante en el rendimiento eléctrico era la cantidad de aire que se introducía al combustor. Este parámetro se calcula como el oxígeno alimentado sobre el estequiométrico para la combustión de metanol a CO₂ (λ). En la Fig. 2a se puede apreciar que el introducir más aire al combustor conlleva que el gasto de metanol para mantener el sistema en su conjunto suba aunque, sin embargo, la cantidad de agua a aportar al mismo disminuye. Esta variable tiene también otra consecuencia que es la temperatura a la que debe operar el combustor que disminuye a medida que se introduce más aire (Fig. 2b). Además, el hecho de tener que manejar caudales mayores de reactantes hace que el rendimiento eléctrico disminuya a partir de $\lambda = 6$. La posibilidad de reducir esa temperatura del combustor usando un combustor catalítico hizo que se eligiese los valores de $\lambda = 2-6$ como los más indicados para las simulaciones posteriores.

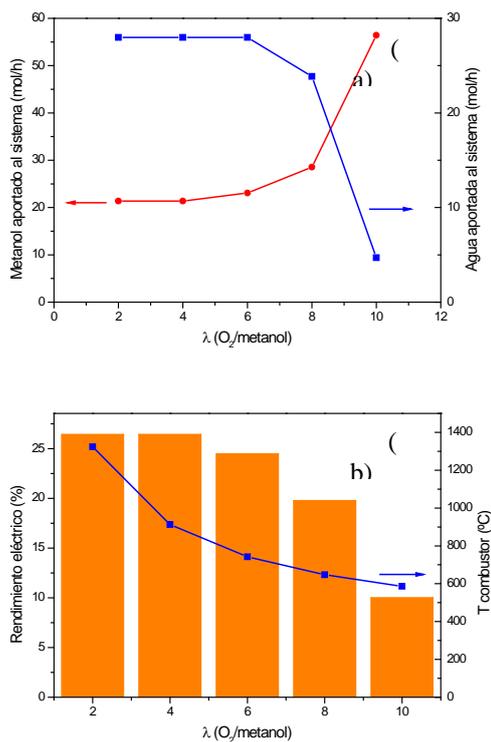


Fig. 2. Efecto de la relación estequiométrica O₂/metanol en el combustor en: a) cantidades necesarias a aportar de metanol y agua al sistema, b) temperatura del combustor y rendimiento eléctrico

De acuerdo con Zhang y cols. [3] en las pilas de combustible HTPMEMFC con membrana de PBI comercial Celtec®-P1000 se puede alimentar al ánodo una corriente de reformado con vapor hasta valores de 1% CO (10000 ppm) con una leve caída de prestaciones. Con objeto de obtener una mayor

densidad de corriente y una mayor durabilidad de la pila, en el presente trabajo nos planteamos trabajar con corrientes procedentes del reactor de reformado con una cantidad de CO en torno a 2000 ppm. En la simulación se determinó que el equilibrio en el proceso de reformado de metanol en el intervalo 280-320°C está por encima del 95% en todos los casos así que la temperatura de trabajo en el reactor influirá, especialmente, en el CO obtenido en la corriente de salida. En la Fig. 3 se muestra cómo aumenta el CO que procede del reformado con la temperatura de operación. Se eligió, por tanto, 300°C como una temperatura adecuada para el reactor.

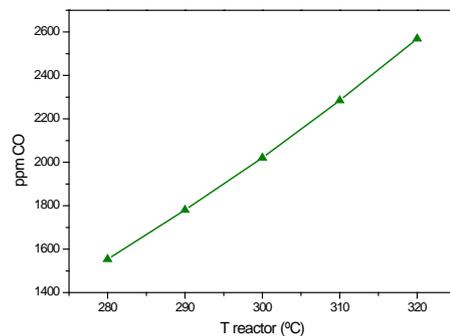


Fig. 3. Efecto del contenido de CO en función de la temperatura del reactor de reformado con vapor del metanol.

Otra variable a tener en cuenta en el funcionamiento del reactor es la cantidad de vapor a introducir. Este parámetro se calcula como el agua alimentada sobre el valor estequiométrico para la reacción de reformado con agua de metanol para dar H₂ y CO₂ (λ'). En la Tabla 1 se presenta la influencia que esta variable tiene en la producción de CO. Un aumento de λ' hace disminuir la cantidad pero, por el contrario, obliga a incorporar más agua al sistema con la consiguiente disminución del rendimiento global. Por ello se eligió $\lambda' = 2$ como el valor óptimo de funcionamiento del sistema. En todas las simulaciones se fijó una cantidad de hidrógeno constante que coincide con los cálculos realizados para el funcionamiento de una pila de 1 kW.

Tabla 1. Influencia de la cantidad de agua sobre el valor estequiométrico (λ') para obtener el H₂ necesario para el funcionamiento de la pila de 1 kW

| λ' | Metanol entra (mol/h) | Agua entra (mol/h) | H ₂ sale (mol/h) | CO sale (ppm) |
|------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------|---------------|
| 1 | 14,85 | 14,85 | 41,07 | 7777 |
| 1,5 | 14,20 | 21,30 | 41,07 | 3426 |
| 2 | 13,99 | 27,98 | 41,07 | 2021 |
| 2,5 | 13,91 | 34,77 | 41,07 | 1402 |
| 3 | 13,86 | 41,58 | 41,07 | 1063 |

Finalmente se simuló el comportamiento de un stack de 1 kW de potencia tomando como referencia el modelo semiempírico planteado por Korsgaard y cols. [7] para una pila HTPMFC con membrana de PBI en un intervalo entre 120 y 200 °C. Dichos autores comprobaron que un aumento de temperatura hacía que el CO alimentado en el ánodo influyese cada vez menos en el funcionamiento de la pila. El área activa de celda planteada por estos autores fue de 45.16 cm², cuyo valor se ha mantenido en este trabajo, para lo que se hace necesario disponer de un stack de 65 celdas para alcanzar la potencia de 1 kW. Se alimentó en el cátodo un caudal de aire que suponía que el oxígeno alimentado es dos veces el valor estequiométrico. Se usó una temperatura de pila de 150°C para la simulación. La curva I-V y el cálculo de la potencia se presentan en la Fig. 4.

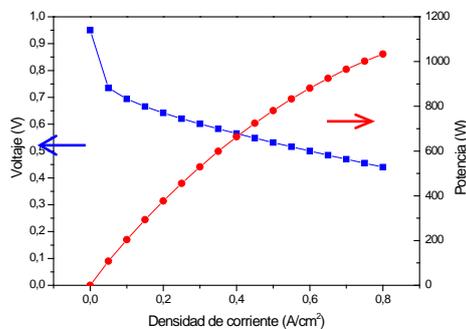


Fig. 4. Curva I-V y potencia para el stack simulado. T operación = 150°C, P= 1 atm, caudal de hidrógeno= 41,07 mol/h, caudal de aire 2 veces el valor estequiométrico

Como puede observarse el stack es capaz de alcanzar la potencia de 1000 W a una densidad de corriente de 0,75 A/ cm². En esta simulación también se calculó el calor generado a cada valor de potencia de tal modo que la corriente de salida del ánodo se recircule al combustor para terminar de aprovechar el hidrógeno no convertido en el stack.

También se contempló la posibilidad de condensar el agua generada en la corriente de salida del cátodo, si bien el calor necesario para este proceso no compensaba en el balance energético aunque podría contemplarse en casos específicos donde esta recirculación se haga necesaria.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presenta el modelo de un sistema de producción de electricidad y calor combinado mediante el uso de una pila de combustible con membrana de intercambio de protones de alta temperatura alimentada con una corriente de hidrógeno procedente de un reactor de reformado de metanol con vapor. El modelado se ha realizado mediante el software HYSYS. El sistema consta de tres equipos principales: combustor catalítico, reactor de reformado de metanol y stack

de pila de combustible y se busca la máxima eficiencia global, incluyendo el balance de energía, con el mínimo consumo de metanol para obtener, una vez alcanzado un régimen estable, 1 kW eléctrico en el stack de pila de combustible. Se optimizó el sistema para aprovechar el calor de las diferentes corrientes mediante intercambiadores de calor para que la eficiencia energética fuese máxima.

Tras la optimización de las variables de operación más relevantes del sistema, se consiguió para valores de aire respecto al valor estequiométrico en el combustor entre 2 y 6, un caudal de vapor sobre el metanol 2 veces la estequiometría de operación y una temperatura del reactor de 300 °C los mejores resultados.

Se verificó la necesidad de trabajar en la corriente del ánodo de la pila con concentraciones de CO inferiores a 2000 ppm.

Se simuló el comportamiento del stack de pila de combustible tomando como referencia un modelo semiempírico descrito en literatura. Para conseguir la potencia de 1 kW, el modelado del stack de la pila dio como resultado la necesidad de 65 celdas con un área activa de 45,16 cm² trabajando a 150 °C y presión atmosférica.

El El El catalizador 2,5%Ni/Al₂O₃ se ha comportado de forma estable en RLFDZ y, en el intervalo de las condiciones de estudio no presenta desactivación ni sinterización; obteniendo, en la mayoría de los casos, valores de conversión de metano no muy alejados de la conversión de

Agradecimientos

Al Fondo Social Europeo y la FECYT el apoyo recibido en el proyecto CTQ 2007- 63420-PPQ.

Bibliografía

- [1] DIRECTIVE 2004/8/EC of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC. Published in OJ L52 of 21.02.2004
- [2] V. Kuhn, J.Klemes, I. Bulatov, “, Appl. Therm. Eng. 28 (2008) 2039-2048.
- [3] J. Zhang, Z. Xie, J. Zhang, Y. Tang, Ch. Song, T. Navessin, Z. Shi, D. Song, H.Wang, D.P. Wilkinson, Z.-S. Liu, S. Holdcroft, J. Power Sources 160 (2006) 872-891.
- [4] B. Lindström, L.J.Petterson, Int. Journal of Hydrogen Energy 26 (2001) 923-933.
- [5] M.J. Prins, K.J. Ptasinski, J.J.G. Janssen, Energy 32 (2007) 1248-1259.
- [6] D.D. Boettner, M.J. Moran, Energy 29 (2004) 2317-2330.
- [7] A.R. Korsgaard, R. Refshauge, M.P. Nielsen, M. Bang, S.K. Kaer, J. Power Sources 162 (2006) 239-245.

CONVERSION OF A GASOLINE ENGINE-GENERATOR SET TO A BI-FUEL (HYDROGEN/GASOLINE) ELECTRONIC FUEL-INJECTED POWER UNIT

P.M. Diéguez, J.C. Urroz, D. Sáinz, L.M. Gandía, C. Sopena

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Universidad Pública de Navarra, Campus de Arrosadía, E-31006 Pamplona, Spain

RESUMEN: En este documento se describen las modificaciones realizadas para convertir un grupo electrógeno de gasolina a bi-fuel (hidrógeno/gasolina) con inyección electrónica. Los principales cambios afectan a los inyectores de gasolina y de gas, los asientos de los inyectores en el colector de admisión existente, los correspondientes sensores en los árboles de levas y cigüeñal, los sensores de posición de mariposa y temperatura de aceite, así como la unidad electrónica programable. Cuando funciona con gasolina, el grupo electrógeno es capaz de suministrar hasta 8 kW de forma continua (10 kW de pico), mientras que funcionando con hidrógeno es capaz de suministrar 5 kW de potencia eléctrica a un régimen constante de 3000 rpm. La relación aire-combustible a la que funciona el motor con gasolina es la estequiométrica ($\lambda = 1$) mientras que funcionando con hidrógeno utiliza una relación aire combustible muy pobre ($\lambda = 3$) en el caso de que funcione sin carga y se va enriqueciendo conforme se aumenta la carga eléctrica. Las comparaciones en el consumo y emisiones contaminantes se realizaron a régimen constante de 3000 rpm y a cargas eléctricas comprendidas entre 1 y 5 kW. El consumo específico de combustible resultó ser mucho menor con hidrógeno que con gasolina. A una carga eléctrica de 5 kW se alcanzó un rendimiento efectivo del 26% en el motor funcionando con hidrógeno, mientras que con gasolina se alcanzó sólo un 20%. En cuanto a las emisiones de NOx resultaron ser bajas (del orden de 30 ppm) para cargas por debajo de 4 kW en su funcionamiento con hidrógeno. El motor bi-fuel es muy robusto y las modificaciones pueden ser realizadas sin excesivas dificultades, lo que unido a unos procesos de fabricación de motores de combustión interna bien conocidos permitirían acelerar la implementación de los usos energéticos del hidrógeno.

ABSTRACT: The modifications performed to convert a gasoline carbureted engine-generator set to a bi-fuel (hydrogen/gasoline) electronic fuel-injected power unit are described. Main changes affected the gasoline and gas injectors, the injector seats on the existing inlet manifold, camshaft and crankshaft wheels with their corresponding Hall sensors, throttle position and oil temperature sensors as well as the electronic management unit. When working on gasoline, the engine-generator set was able to provide up to 8 kW of continuous electric power (10 kW peak power), whereas working on hydrogen it provided up to 5 kW of electric power at an engine speed of 3000 rpm. The air-to-fuel equivalence ratio (λ) was adjusted to stoichiometric ($\lambda = 1$) for gasoline. In contrast, when using hydrogen the engine worked ultra-lean ($\lambda = 3$) in the absence of connected electric load and richer as the load increased. Comparisons of the fuel consumptions and pollutant emissions running on gasoline and hydrogen were performed at the same engine speed and electric loads between 1 and 5 kW. The specific fuel consumption was much lower with the engine running on hydrogen than on gasoline. At 5 kW of load up to 26% of thermal efficiency was reached with hydrogen whereas only 20% was achieved with the engine running on gasoline. Regarding the NOx emissions, they were low, of the order of 30 ppm for loads below 4 kW for the engine-generator set working on hydrogen. The bi-fuel engine is very reliable and the required modifications can be performed without excessive difficulties thus allowing taking advantage of the well-established existing fabrication processes of internal combustion engines looking to speed up the implementation of the energetic uses of hydrogen.

Palabras clave: Grupo electrógeno bi-fuel, generador eléctrico hidrógeno-gasolina, hidrógeno, emisiones polucionantes.

Keywords: Bi-fuel engine-generator, Hydrogen-fueled electric generator, Hydrogen fuel, Pollutant emission.

1. INTRODUCTION

There is a renewed and increasing interest in the hydrogen-fueled internal combustion engines (H₂ICEs). This is mainly due to the possibility of using the current manufacture infrastructure of the automotive industry and the great existing

experience in H₂ICEs design and in the adaptation of engines developed to operate with conventional liquid hydrocarbon fuels to run on hydrogen [1-3]. H₂ICEs are considered a technology with the potential to stimulate the development of the hydrogen economy. H₂ICEs might be considered as a transitional technology contributing to a more

rapid introduction of hydrogen in the transport sector while H₂FCEs and hybrid configurations continue developing [1,4]. In this regard, it is very relevant the ability of properly designed and modified H₂ICEs to operate in bi-fuel mode, that is, running on both gasoline and hydrogen. This feature might be essential during the transition period for a rapid introduction of hydrogen in the transport sector which is believed the driving force for the use of hydrogen as a fuel.

With over 100 years of development maturity, the majority of the R&D effort on H₂ICEs has been directed towards their application in the automotive. In contrast, much less work has been devoted to the application of H₂ICEs to engine-generator sets. However, these devices play important roles as auxiliary power units and energy sources for decentralized applications as in the agricultural sector, particularly in the developing countries, and can serve to introduce hydrogen as a fuel in these areas [5].

There are very few examples on the manufacture or adaptation of engine-generator sets to run on hydrogen. Jeong et al. [6] modified a 2300 cm³ gas engine-generator originally designed to be fueled with LPG to run on biogas (a CH₄/CO₂ mixture)-hydrogen blends. In this work the adaptation of a commercial gasoline engine-generator set to a bi-fuel (hydrogen/gasoline) electronic fuel-injected power unit is described. In a previous paper [7] we described the steps followed to convert the SI gasoline-fueled engine of a Volkswagen Polo 1.4 car to run on hydrogen. Other works by our group dealt with renewable hydrogen production from water electrolysis and wind energy [8-10].

2. ENGINE-GENERATOR SET SPECIFICATIONS AND MODIFICATIONS PERFORMED

The original engine-generator set (MOSA GE 10000 BES/GS) and its main characteristics as well as that of the alternator are compiled in Table 1. This device provided up to 10 kVA on three-phase or 6 kVA on single-phase generation. The generator included a four-stroke 90 degrees V-twin air-cooled gasoline engine (Honda GX620) of 614 cm³. Ignition was achieved by means of transistorized magneto ignition and gasoline was supplied through carburetor.

Several modifications have been necessary to achieve bi-fuel operation of the engine generator set. The completely modified device is shown in Fig.1. All the engine transformations and the complete test program of the bi-fuel power unit were carried out at the Laboratory of Internal Combustion Engines of the Public University of Navarre. The fuel system

was changed from carburetor to a double injection system for both gasoline and hydrogen fuels. The ignition system was changed to electronic spark ignition in order to avoid wasted sparks. An electronic control unit (ECU) and several sensors were mounted as well for proper operation of the power unit.

Table 1- Specifications of the original engine-generator set.

| | |
|-----------------------------------|---|
| Engine | Air-cooled, 4-stroke, OHV, 90L V-twin |
| Bore x Stroke | 77 x 66 mm (3.0 x 2.6 in) |
| Displacement | 614 cm ³ |
| Compression ratio | 8.3 : 1 |
| Net power output | 13.5 kW at 3600 rpm |
| Net torque | 40.6 N·m at 2500 rpm |
| Ignition system | Transistorized magneto ignition |
| Carburetor | Horizontal type butterfly valve |
| Lubrication system | Full pressure |
| Governor system | Centrifugal mechanical |
| Air cleaner | Dual element type |
| Dimensions (Lx W x H) | 388 x 457 x 452 mm |
| Dry weight | 42 kg |
| A.C. Generation | 50 Hz, synchronous, three-phase, self-excited, self-regulated |
| Three-phase generation (stand-by) | 11 kVA (8.8 kW)/400 V/15.9 A |
| Three-phase generation | 10 kVA (8 kW)/400 V/14.4 A |
| Single-phase generation | 6 kVA (4.8 kW)/230 V/26 A |
| Duty cycle | 100% |
| (Cos) | 0.8 |



Fig 1. Photograph of the completely modified generator showing the gas cylinder used to store the hydrogen fuel.

Once the electrical wiring and all the electronics were installed, the ECU had to be programmed for suitable engine-generator set operation. The ECU was connected through a long serial cable to a computer and the several engine parameters (number of cylinders, number of injectors per cylinder, cycle angles at which injectors or coils are activated, among many others) were set. Moreover, every single sensor must be calibrated. First of all, the position of the TDC must be identified because all the cycle angles were referred to it. This was done through a Kistler TDC capacitive sensor installed in the spark plug hole. An oscilloscope was

used to monitor both ignition and TDC sensor signals. Ignition advance was set to 0 degrees and then the position parameter was varied until the ignition signal fired at the end of the compression stroke matching the TDC signal. The camshaft position sensor was also calibrated by recording the REF and SYNC signals, referring them to the TDC and adjusting the corresponding ECU parameter.

A test cell adapted to work with hydrogen through suitable hydrogen supply and safety systems and described in a previous work was used [7]. The performance of the bi-fuel generating set was investigated in the test bed cell. The main parameters used were the electrical output, engine speed, injection time, ignition advance and λ . A Bosch analyzer was attached to determine CO, CO₂, hydrocarbons (HC) and O₂ in the exhaust gases, and a Horiba MEXA-720NOx analyzer was used to determine NO_x. Hydrogen consumption was measured with a Bronkhorst® EL-FLOW® F-110C mass flow meter. Additionally, a National Instruments NI-CompacDAQ data acquisition system (DAS) was used. A program developed under Labview software allowed collecting additional data such as mean values of hydrogen consumption and NO_x and O₂ at the exhaust.

3. RESULTS

3.1 Specific fuel consumption and thermal efficiency.

The tests performed at the same electric loads show overall better specific fuel consumptions and thermal efficiencies running on hydrogen than on gasoline. The tests were performed at 3000 rpm. Electric loads were varied between 0 and 5 kW in steps of 1 kW and the fuel consumption was recorded. The specific fuel consumptions for gasoline and the equivalent consumptions for hydrogen are compared in Fig. 2. As can be seen the fuel consumption is lower running on hydrogen than on gasoline. The difference decreases with the load from about 34% at 1 kW lower running on hydrogen to 24% at load of 5 kW.

The thermal efficiency is derived from the specific fuel consumption and the results are shown in Fig. 3. As expected, the thermal efficiency is greater running on hydrogen compared to gasoline. At 5 kW of load up to 26% of thermal efficiency is reached with hydrogen whereas a value of 20% is achieved with the engine running on gasoline

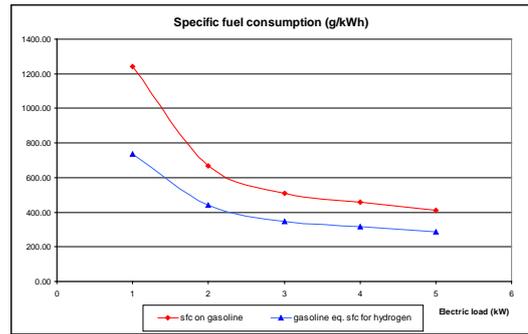


Fig 2. Specific fuel consumptions (Sfc) for gasoline and the equivalent consumptions for hydrogen.

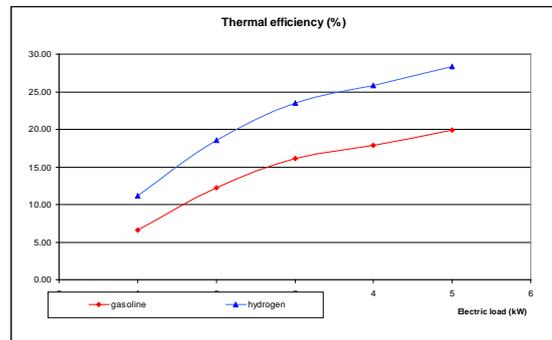


Fig 3. Thermal efficiency of the bi-fuel generator running on hydrogen and gasoline as a function of the electric power output.

3.2. Pollutant emissions.

When working on hydrogen, CO and unburned hydrocarbons (HC) emissions due to lubricating oil burning were very low. In this case, the most important pollutants in the exhaust gases were nitrogen oxides (NO_x). Unburned hydrogen emissions were negligible for λ values lower than 3. HC, CO and CO₂ emissions when running on gasoline were the typical ones for this type of engines that do not incorporate a catalytic converter. HC emissions when using gasoline were relatively constant and around 48 ppm for loads below 4 kW but decreased to 35 ppm at 5 kW of load. When using hydrogen, the HC concentration in the exhaust was about 8-9 ppm irrespective of the load.

As concerns the NO_x emissions, the results can be seen in Fig. 4. When running on gasoline the NO_x emissions rise as the load increases from about 160 ppm at 1 kW up to 750 ppm at 5 kW. On the other hand, running on hydrogen the NO_x emissions were much lower, of the order of 30 ppm for loads below 4 kW and up to 125 ppm at 5 kW.

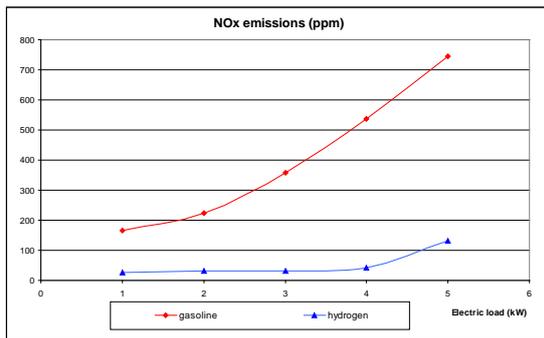


Fig 4. NOx emissions of the bi-fuel generator running on hydrogen and gasoline as a function of the electric power output.

4. CONCLUSIONS

The conversion of a commercial gasoline-fueled engine-generator set to an electronic fuel-injected generator running on both hydrogen and gasoline has been carried out. Main modifications included the inlet manifold, low-pressure hydrogen accumulator, gasoline and hydrogen injectors, the installation of a programmable electronic control unit as well as a gas cylinder of 18 l to store hydrogen at 200 bar.

The modified bi-fuel generator set running on hydrogen supplied up to 5-6 kW at the nominal engine speed of 3000 rpm and λ of 1.5. The specific fuel consumption was much more favorable with hydrogen resulting in consumptions between 34 and 24% lower than running on gasoline for loads in the 1-5 kW range. The operation on hydrogen produced nitrogen oxides emissions that were 5-7 times lower than when using gasoline provided that λ for hydrogen is maintained above 2.

The adaptation of internal combustion engines, particularly the spark ignition ones to work bi-fuel (hydrogen/gasoline) is relatively easy and it is not expensive. These modified engines have great potential for speeding up the implantation of the energetic uses of hydrogen, not only for the transportation sector, but also for the distributed production of electricity. The creation and development of a hydrogen infrastructure would also be benefited. These advantages mainly arise from the fact that the well-established fabrication processes of internal combustion engines could be maintained almost unchanged. Moreover, gasoline use in bi-fuel engines could be restricted to peak power demand periods.

Acknowledgements

We would like to express our gratitude to our friend Carlos Sopena, tragically deceased on December 18, 2009. Dear Carlos, we will follow your teachings to finish your work.

We gratefully acknowledge Acciona Biocombustibles S.A. for its financial support under

R&D contract to the Public University of Navarra OTRI 2006 13 118 (CENIT project: SPHERA). LMG, GA and PMD also acknowledge financial support by Ministry of Science and Innovation of the Spanish Government (ENE2009-14522-C05-03 and TRA2009-0265-02).

References

- [1] White CM, Steeper RR, Lutz AE. The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review. *Int J Hydrogen Energy* 2006; 31: 1292-305.
- [2] Verhelst S, Wallner T. Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2009; 35: 490-527.
- [3] Escalante Soberanis MA, Fernandez AM. A review on the technical adaptations for internal combustion engines to operate with gas/hydrogen mixtures. *Int J Hydrogen Energy* 2010; 35: 12134-40.
- [4] Winter C-J. Hydrogen energy-Abundant, efficient, clean: A debate over the energysystem-of-change. *Int J Hydrogen Energy* 2009; 34: S1-S52.
- [5] Das LM. Near-term introduction of hydrogen engines for automotive and agricultural application. *Int. J. Hydrogen Energy* 2002; 27: 479-87.
- [6] Jeong C, Kim T, Lee K, Song S, Chun KM. Generating efficiency and emissions of a spark-ignition gas engine generator fuelled with biogas-hydrogen blends. *Int. J. Hydrogen Energy* 2009; 34: 9620-7.
- [7] Sopena C, Diéguez PM, Sáinz D, Urroz JC, Guelbenzu E, Gandía LM. Conversion of a commercial spark ignition engine to run on hydrogen: Performance comparison using hydrogen and gasoline. *Int J Hydrogen Energy* 2010; 35: 1420-9.
- [8] Gandía LM, Oroz, R, Ursúa A, Sanchis P, Diéguez PM. Renewable Hydrogen Production: Performance of an Alkaline Water Electrolyzer Working under Emulated Wind Conditions. *Energy & Fuels* 2007; 21: 1699-706.
- [9] Diéguez PM, Ursúa A, Sanchis P, Sopena C, Guelbenzu E, Gandía LM. Thermal performance of a commercial alkaline water electrolyzer: Experimental study and mathematical modeling. *Int J Hydrogen Energy* 2008; 33: 7338-54.
- [10] Ursúa A, Marroyo L, Gubía E, Gandía LM, Diéguez PM, Sanchis P. Influence of the power supply on the energy efficiency of an alkaline water electrolyser. *Int J Hydrogen Energy* 2009; 34: 3221-33.

SISTEMA PORTÁTIL CON MONOCELDA PEMFC 'AIR-BREATHING'

J. Fernández-Moreno¹, G. Guelbenzu², A. J. Martín¹, M. A. Folgado¹,
P. Ferreira Aparicio¹, A.M. Chaparro¹

¹CIEMAT, Dep. of Energy, Av. Complutense, 40, 28040 Madrid

²NBEE, Embedded Systems S.A., Av. Carlos V, 45, 28938 Madrid

RESUMEN: *Un sistema portátil ha sido desarrollado que funciona con hidrógeno y una monocelda PEMFC de cátodo abierto, "air breathing". El sistema alimenta una aplicación consistente en un aspa giratoria que muestra un mensaje luminoso, o "propeller". La monocelda PEMFC, de 16 cm² de área activa, es alimentada en el ánodo con hidrógeno de un contenedor de hidruros metálicos (1 g de hidrógeno), y en el cátodo con aire del entorno. Un sistema gestor electrónico especialmente diseñado actúa como acoplamiento dc-dc para elevar el voltaje de celda a 3,3 V necesarios para los componentes electrónicos. Para su funcionamiento el sistema consta además de otros elementos auxiliares, como un ventilador que asiste al cátodo de la monocelda en la eliminación de agua, una válvula de venteo para el ánodo, y dos supercondensadores para accionamiento de la válvula y energía auxiliar. Sobre el aspa giratoria hay 10 LEDs que con su encendido sincronizado con el giro por medio de un PIC de control y un tacómetro, muestran un mensaje luminoso. Un panel frontal permite accionar el funcionamiento de los distintos componentes además de monitorizar el voltaje y la corriente de la pila. El sistema es capaz de funcionar ininterrumpidamente hasta 15 horas.*

ABSTRACT: *A new portable system has been developed with a single PEMFC of 'air breathing' type. The system is able to run an application consisting of a rotating blade display, or propeller. The single PEMFC of 16 cm² active area is fed with hydrogen from a metal hydrides canister (1 g of hydrogen) in the anode, and ambient air in the cathode. An electronic management system specially designed makes the dc-dc coupling from the cell voltage to 3.3 V for the electronics. Other elements help in the proper function of the system, like a fan for cathode, a purging valve for the anode, and two supercapacitors for valve power and auxiliary power. The propeller has 10 LEDs for the message display and a PIC for control, connected through a brush contact. A frontal panel allows to control the action of the different components, and monitorization of the voltage and current of the cell. The system may work continuously up to 15 hours.*

Palabras clave: PEMFC, sistema portátil, cátodo abierto 'air breathing', hidruros metálicos, monocelda

Keywords: PEMFC, portable system, air breathing, metal hydrides, single cell

1. INTRODUCCIÓN

Las monoceldas de pilas de combustible poliméricas (PEMFC) se caracterizan por voltajes de salida de 0,5 – 0,8V, y densidades de corriente que pueden estar por encima 1 A·cm⁻². Estas características son restrictivas para las aplicaciones eléctricas comunes, por lo que las monoceldas se consideran más como un dispositivo de laboratorio que sirve para ensayos de componentes y funcionamiento, a través de curvas de polarización, medidas de cruzamiento de gases, resistencia interna, área activa de los electrodos, y durabilidad [1]. La alimentación de dispositivos electrónicos comunes requiere normalmente una conexión en serie de al menos cuatro elementos para tener un voltaje de salida adecuado a los estándares requeridos. Sin embargo, una monocelda podría también ser utilizada para una aplicación práctica si se acopla debidamente para elevar su voltaje a valores útiles. Este objetivo es de gran interés ya que puede posibilitar la fabricación de sistemas de generación de energía basados en monoceldas de

combustible, más simples y pequeños, para aplicaciones de la medicina implantable y portátil (marcapasos, audífonos, defibrilador, bomba de insulina), electrónica portátil (teléfonos inteligentes, libros electrónicos), juguetes, etc. En estos casos, las pilas de combustible pueden aportar mayor cantidad de energía y mayor autonomía que las baterías utilizadas en la actualidad.

En este trabajo se describe un sistema portátil diseñado para ser alimentado por una monocelda PEMFC. La monocelda funciona con hidrógeno almacenado en hidruros metálicos, y aire ambiental, para lo que consta de un "cátodo abierto", o "air breathing" [2]. El sistema alimenta una aplicación "propeller", que consiste en un aspa giratoria capaz de mostrar un mensaje luminoso mediante LEDs cuyos encendido y apagado se han sincronizado con la frecuencia de giro. Algunas de las características del sistema y su funcionamiento se describen brevemente en esta comunicación.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Para la fabricación de la monocelda PEMFC ‘air breathing’ se han utilizado dos electrodos comerciales (ELAT ETEK, Pt/C sobre tela de carbón, $0,25 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$) y una membrana de Nafion 212R (Ion Power). En el lado del ánodo se ha colocado una placa de acero acanalada (doble, serpenteado) para dirigir el flujo de hidrógeno, y un contacto metálico dorado como colector de corriente. En el lado del cátodo se ha colocado un contacto de rejilla dorada. Finalmente la estructura se ha comprimido entre dos placas finales de acero (ánodo) y aluminio (cátodo). La placa final catódica tiene una matriz de agujeros redondos para permitir el acceso del aire ambiental al cátodo (Fig. 1).



Fig. 1. Vista frontal de la monocelda ‘air breathing’.

Dentro del sistema, la pila funciona en modo de ánodo cerrado, a $0,5 - 1 \text{ bar H}_2$, con posibilidad de aperturas periódicas de la válvula anódica para venteo. Este venteo es aconsejable cuando funciona a mayor corriente ($>1 \text{ A}$), para eliminar exceso de agua.

El acoplamiento dc-dc se ha diseñado especialmente para el trabajo con monoceldas PEMFC (NBEE, Embedded Systems S.A.). Un esquema se muestra en la Fig. 2. Los componentes del mismo han sido elegidos para un mínimo consumo parásito, funcionamiento a $3,3 \text{ V}$, con bloques de activación/desactivación que permiten el control individual de los distintos subsistemas: voltímetro, amperímetro, luces de interior, ventilador, válvula anódica y cargador de los supercondensadores. El control se basa en un microcontrolador PIC 8 bit que incluye una pantalla LCD para monitorización y accionamiento de los diferentes subsistemas. El software de control se ha diseñado para una gestión óptima de los flujos de energía.

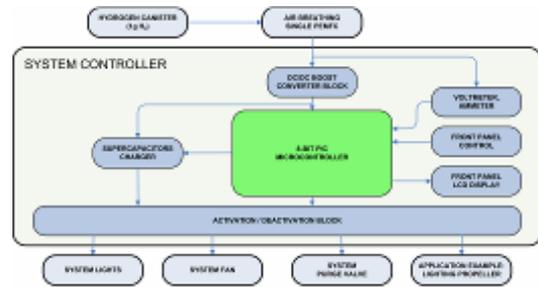


Fig. 2. Esquema del sistema de control.

La aplicación consiste en un aspa giratoria que soporta 10 LEDs cuyo encendido está sincronizado con la velocidad de giro, lo que permite que durante el giro a una suficiente velocidad de rotación se pueda mostrar un mensaje luminoso. Sobre el aspa se ha colocado un microprocesador PIC 8 bit para el control de los LEDs, y un tacómetro para medición de la frecuencia de giro (Fig. 3).



Fig. 3. Aspa giratoria.

Todos los subsistemas se hayan en una caja metálica portátil (Fig. 4).



Fig. 4. Sistema completo previo al ensamblaje final.

Un esquema de la disposición de los diferentes subsistemas se muestra en Fig. 5.

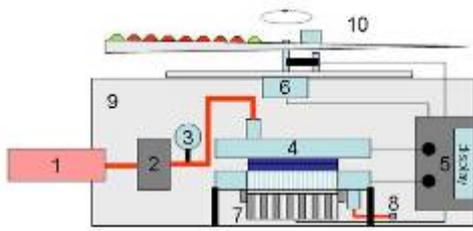


Fig. 5. Esquema del sistema propeller: 1) Hidruros metálicos; 2) Controlador de presión; 3) Medidor de presión; 4) Monocelda PEMFC; 5) Electrónica de control; 6) Motor giratorio; 7) Ventilador catódico; 8) Válvula anódica; 9) Caja; 10) Propeller.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Funcionamiento de la monocelda ‘air breathing’

Tras sus montaje, las monoceldas air breathing son estudiadas mediante curvas de polarización en las mismas condiciones de funcionamiento que en el sistema, obteniéndose respuesta como en Fig. 6.

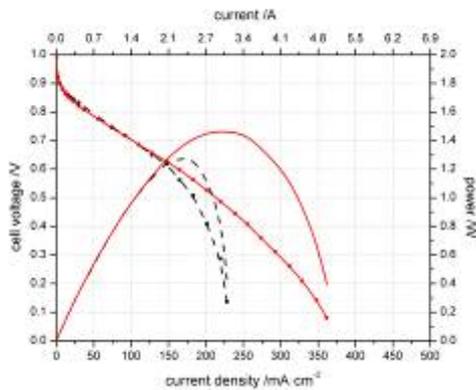


Fig. 6. Curvas de polarización y de potencia para monocelda air-breathing en condiciones pasivas (negro) y asistida con ventilador (rojo). Se obtuvieron a temperatura ambiente, y 1 bar de H₂ con ánodo cerrado.

Normalmente se observa una potencia máxima de alrededor de 1 W en condiciones de ‘air breathing’ pasivo, y de hasta 1,5 W en condiciones asistidas, ie. cuando el ventilador se acciona. Estas condiciones son de interés en el caso de funcionamiento a alta corriente, aproximadamente por encima de 1 A, cuando se genera una cantidad significativa de agua en el cátodo que debe ser eliminada para evitar su inundación.

Un aspecto importante a tener en cuenta a la hora del diseño de funcionamiento del sistema es la variabilidad en la respuesta de la monocelda, principalmente debida a cambios en la humidificación de la membrana y los electrodos. Por ejemplo, tras un largo periodo de pausa (varios días), la membrana puede llegar a perder una importante cantidad de agua, lo que se manifiesta en la respuesta de la celda. Un caso extremo se muestra en la Fig. 7.

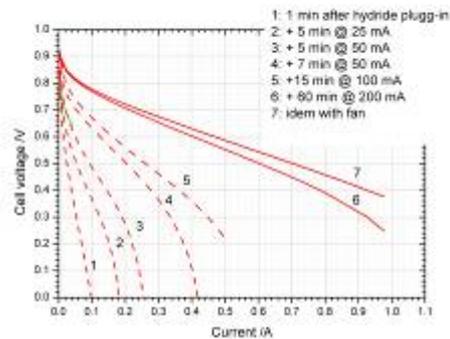


Fig. 7. Curvas de polarización de monocelda air breathing tras una parada de varios días (1) y puesta en funcionamiento a variable demanda de corriente (2-7).

Se ha llevado a cabo el análisis de las curvas de Fig. 7 según una curva de polarización estándar:

$$V = E^0 - b \log(i/i_0) - iR_i - b \log(i_L/(i_L-i)) \quad (1)$$

Donde V es el voltaje de celda, E⁰ el potencial termodinámico, i la intensidad de corriente, i₀ la corriente de intercambio, b la pendiente de Tafel, y i_L la corriente límite. Los resultados obtenidos se muestran en el diagrama de barras de la Fig. 8.

Se obtiene que inicialmente la pila tiene una alta resistencia interna (R_i) y baja corriente limitante (i_L) consecuencia del bajo estado de hidratación de la membrana y los electrodos. Ambos valores se recuperan con el funcionamiento tras unos minutos gracias a la producción de agua en el cátodo. Este efecto impide el funcionamiento correcto inmediato, tras el arranque del sistema. Para corregir este problema se han ensayado diferentes posibilidades, tales como la inclusión de elementos humectantes en el circuito anódico, la asistencia inicial con los supercondensadores, o la inclusión de un protocolo para mantener periódicamente la humidificación.

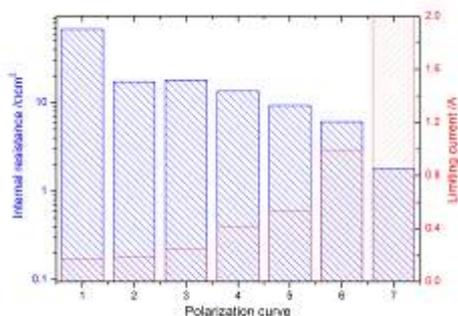


Fig. 8. Resultados de R_i (resistencia interna) y i_L (corriente límite) obtenidos del ajuste de las curvas de polarización de Fig. 7 a la curva teórica (Eq. 1).

Cada uno de estos métodos ha sido analizado. Elementos humectantes adicionales, tales como un depósito humidificado, añaden una complicación adicional en el circuito anódico, además de requerir un mantenimiento; la asistencia con supercondensadores es limitada, ya que su energía es consumida por el sistema en 2-3 minutos si no están siendo recargados en continuo; finalmente, incluir periodos de funcionamiento del sistema para mantener la humectación de la membrana conlleva un gasto adicional de hidrógeno y con ello una limitación de la autonomía del sistema. Por tanto, la resolución del problema está por decidir.



Fig. 9. Sistema portátil propeller en funcionamiento.

3.2. Funcionamiento del sistema

El funcionamiento continuo del sistema ha sido comprobado, hasta un tiempo máximo de 15 horas, sin recarga de los hidruros metálicos. Esta autonomía es posible con un estado óptimo de la pila de combustible, que le permite trabajar a un voltaje suficientemente alto ($V > 0.6V$) con un rendimiento termodinámico mejor que el 50%.

El sistema ha sido programado para mostrar una serie de letreros luminosos sucesivos, algunos de los cuales se muestran en Fig. 9.

4. CONCLUSIONES

Esta comunicación muestra el desarrollo de una aplicación portátil basada en una monocelda PEMFC de tipo 'air breathing'. Con ello se demuestra la posibilidad de uso práctico de las monoceldas, además de su interés como dispositivos para estudio de componentes en laboratorio. La monocelda es capaz de desarrollar una potencia de hasta 1,5 W, suficiente para alimentar el sistema, con un rendimiento en condiciones air breathing (temperatura ambiente, alimentación pasiva con aire ambiental), de hasta el 50%, lo que permite un funcionamiento ininterrumpido de hasta 15 h., utilizando para ello un contenedor de hidruros metálicos con 1 g de hidrógeno. Se han descrito algunas propiedades de la pila y del funcionamiento del sistema. Problemas en el funcionamiento del sistema, especialmente debido a la variable respuesta de la monocelda, han sido analizados y distinta posibilidades consideradas.

Agradecimientos

Se agradece la financiación de los proyectos Comunidad de Madrid, DIVERCEL, S2009/ENE-1475, y Ministerio de Ciencia e Innovación de España, ELECTROFILM, MAT2011-27151

Bibliografía

- [1] Technical Specification TS IEC62282-7-1. Ed.1., International Electrotechnical Commission, Junio de 2010.
- [2] B. Babcock, A.J. Tupper, D. Clark, T. Fabian, R. O'Hayre, J. Fuel Cell Sci. Tech. 7 (2010) 021017-1.

ROBOT HUMANOIDE (TEO) ALIMENTADO MEDIANTE UN SISTEMA DE PILA DE COMBUSTIBLE

G. Adame García¹, V. Mesa Vélez-Bracho¹, D. Muñoz Alé¹, A. Pérez Vega-Leal², S. Martínez de la Casa³

¹Abengoa Hidrógeno, Campus Palmas Altas, C/ Energía Solar 1, 41014 Sevilla, España.

²Universidad de Sevilla, Av. Descubrimientos SN, 41018 Sevilla, España.

³Universidad Carlos III de Madrid, Avenida Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid, España.

RESUMEN: El Grupo de Robótica Humanoide del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid desarrolla el robot humanoide TEO, sucesor del robot RH-1. Aunque con el RH-1 ya se consiguió una caminata estable, quedaron muchos aspectos por mejorar, entre ellos la autonomía. Para el TEO, Abengoa Hidrógeno desarrolla el sistema eléctrico basado en pila de combustible, compuesto de cuatro elementos: sistema de almacenamiento de hidrógeno, sistema de pila de combustible, sistema de adecuación de la potencia eléctrica de salida y sistema de control desarrollado por la Universidad de Sevilla. Con este sistema de alimentación mediante pila de combustible se espera alcanzar una autonomía superior a la proporcionada por las baterías en el RH-1. Esta nueva aplicación del hidrógeno y de las pilas de combustible abre nuevos nichos de mercado en el ámbito de la robótica para diferentes aplicaciones en los sectores aeroespacial, civil y de defensa.

ABSTRACT: The Systems Engineering and Automation Department at the University Carlos III of Madrid develops the humanoid robot TEO, successor to the RH-1 robot. Although the RH-1 already got a steady walk, there were many aspects to improve, including autonomy. For the TEO, Abengoa Hidrógeno develops the electric system based on fuel cell composed of four elements: hydrogen storage system, fuel cell system, power conditioning system and control system developed by the University of Sevilla. This fuel cell based power system is expected to achieve a greater autonomy than the provided by the batteries in the RH-1. This new application of hydrogen and fuel cells open new market niches in the field of robotics for various applications in aerospace, civil and defense.

Palabras clave: PEMFC, robot humanoide, autonomía, hidrógeno.

Keywords: PEMFC, humanoid robot, autonomy, hydrogen.

1. INTRODUCCIÓN

El grupo de investigación RoboticsLab de la Universidad Carlos III de Madrid lleva trabajando más de 10 años en proyectos relacionados con la robótica humanoide. En concreto, enmarcado dentro del proyecto RH, se han desarrollado plataformas humanoides abiertas y robustas para la investigación sobre conceptos tales como la caminata bípeda, el control de la estabilidad, la fusión sensorial, la interacción humano-robot para el desarrollo de tareas colaborativas y otros aspectos relacionados con el diseño y operación de este tipo de robots. Siguiendo esta línea de trabajo, el nuevo prototipo de robot humanoide TEO (Task Environment Operator) [1] ha sido concebido como una versión mejorada de sus predecesores RH-0 y RH-1 [2].

TEO ha sido diseñado para afrontar nuevos desafíos relacionados con el movimiento bípedo, la eficiencia energética y la mejora de la autonomía de funcionamiento. El diseño mecatrónico de esta plataforma busca la consecución de un movimiento de locomoción humana natural y adaptable, además

de intentar conseguir funcionalidades y capacidades semejantes a la humana. Existen múltiples componentes en un robot humanoide que consumen energía durante el funcionamiento del robot, tales como motores, sensores, micro-controladores y procesadores integrados. De todos estos, el sistema que más energía demanda es el generador del movimiento compuesto por motores sin escobillas de corriente continua. Las dimensiones y el peso de la plataforma robótica, junto con su configuración cinemática y rigidez estructural, afectarán al consumo final de energía.

Con el fin de evitar los problemas de energía experimentados previamente con el RH-1, Abengoa Hidrógeno ha diseñado un sistema generador de energía eléctrica basado en pila de combustible de tecnología PEM y alimentado a partir de hidrógeno a presión. La característica clave de las pilas de combustible que las hace ideales para ser utilizadas como una alternativa de las baterías, es el tiempo de funcionamiento sin recarga, lo que incrementa la autonomía en comparación con las baterías convencionales. Obviamente, por definición, el

tamaño y el peso son también parámetros muy importantes.

2. DISEÑO E INTEGRACIÓN

El robot humanoide TEO pesa 55 kg, mide 175 cm y posee 28 grados de libertad (GDL) repartidos de la siguiente manera: 6 GDL por pierna, 2 GDL en la cintura, 6 GDL por brazo y 2 GDL en el cuello. Cada grado de libertad está compuesto por un conjunto motor más reductor.

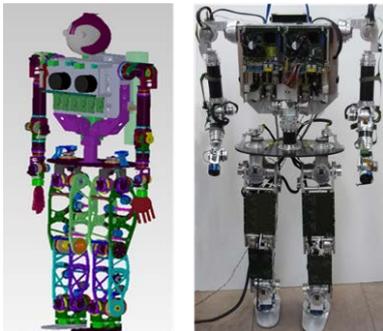


Fig. 1. Modelo 3D del robot y robot TEO real

La generación del movimiento es realizada por un motor sin escobillas de corriente continua. La transmisión de movimiento se realiza a través de un sistema de correa y poleas unido a un reductor del tipo Harmonic Drive™. Por último, cada articulación posee un sistema de sensores compuesto por un encoder relativo utilizado para el control del motor y un encoder absoluto utilizado para conocer el ángulo de la articulación.

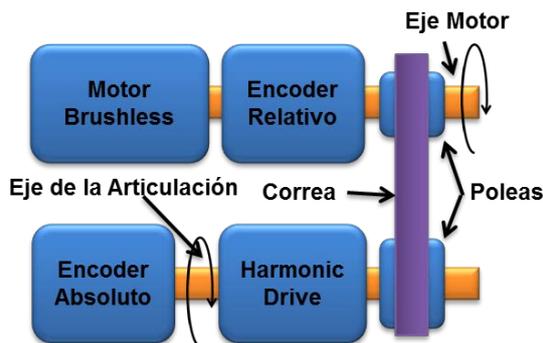


Fig. 2. Esquema de transmisión

El diseño de la plataforma ha estado basado en dos premisas principales: alta eficiencia en términos de consumo de energía y robustez mecánica. En términos generales, los prototipos de robots humanoides existentes en el mundo son pesados y tienen una limitada autonomía energética funcionando con baterías. El robot humanoide ASIMO de Honda puede caminar durante sólo 30 minutos con un paquete de baterías que lleva en la

espalda. La eficiencia energética es uno de los retos más importantes para robots móviles en general. Por ejemplo, [3] demuestran que el consumo de energía es uno de los temas principales en su diseño robótico.

Después de analizar los requisitos de potencia de TEO, el robot en reposo consume una potencia continua promedio de 150 W. Esta potencia es consumida por el sistema de control estando preparado para la ejecución de cualquier movimiento. Para el robot humanoide, la tarea que más demanda energía es la caminata. Por ello, todos los sistemas del robot se han dimensionado para poder realizar una tarea de locomoción a una velocidad máxima de 0,75 m/s. La tabla siguiente resume la demanda de potencia durante la realización de este tipo de movimiento teniendo en cuenta solamente el tren inferior y suponiendo el resto del cuerpo del robot inmóvil.

Tabla 1. Requisitos de potencia del robot TEO

| | Por Articulación | Carga de la Articulación [Nm] | Potencia [W] |
|-------------------------------|------------------|-------------------------------|--------------|
| Tobillo Sagital (x2) | rms | 18,7 | 56,6 |
| | pico | 40,6 | 123,8 |
| Tobillo Frontal (x2) | rms | 27,7 | 30,6 |
| | pico | 85 | 94,3 |
| Rodillas (x2) | rms | 25,4 | 31,3 |
| | pico | 72 | 90 |
| Cadera Frontal (x2) | rms | 10,2 | 18 |
| | pico | 26 | 46,8 |
| Cadera Sagital (x2) | rms | 19,1 | 36 |
| | pico | 84 | 158,4 |
| Cadera Axial (x2) | rms | 3,2 | 7,2 |
| | pico | 7,3 | 18 |
| P_{rms} Total | | | 360 |
| P_{pico} Total | | | 1062 |

El generador eléctrico basado en pila de combustible empleado para la alimentación del robot TEO se compone de 4 subsistemas: sistema de almacenamiento de hidrógeno, sistema de pila de combustible, sistema de adecuación de potencia y sistema de control. Los dos últimos han sido desarrollados por la Universidad de Sevilla.

El elemento principal del sistema de pila de combustible es la propia pila de combustible. Se ha seleccionado un stack de tipo PEM de 1000 W de potencia neta con refrigeración por aire, por ser la que presentaba una mejor relación potencia/peso. La pila de combustible va alojada en el torso del robot.

Al resto de componentes que forman parte del sistema de pila de combustible se les denomina Balance de Planta o BoP. En el BoP se incluyen todos los equipos auxiliares (sensores, válvulas, reguladores, etc.) que permiten que el hidrógeno llegue a la pila de combustible en las condiciones adecuadas de operación. Toda la instrumentación incluida en el sistema se ha seleccionado teniendo en cuenta que el peso es un parámetro crítico en este caso, por lo que se han elegido en todo caso los componentes más ligeros.



Fig. 3. Pila de combustible PEM integrada en el robot

El sistema de almacenamiento de hidrógeno está compuesto principalmente por dos depósitos de hidrógeno a 200 bar de presión. Estos depósitos van alojados en la cadera del robot. Al ser la presión de entrada a la pila de combustible muy inferior a la presión de almacenamiento, se dispone de una etapa de regulación de presión.

Los sistemas de control y adecuación de potencia permiten, por un lado, adaptar la potencia de salida de la pila de combustible a las condiciones adecuadas para alimentar al robot y, por otro lado, controlar el correcto funcionamiento de todo el sistema y garantizar la seguridad mediante la gestión de alarmas.

Este sistema debe ser capaz de suministrar la potencia requerida durante el correcto funcionamiento, así como permitir su funcionamiento ante situaciones críticas como puede ser un fallo en la pila de combustible. Para ello se ha diseñado el sistema esquematizado en la Fig. 4.

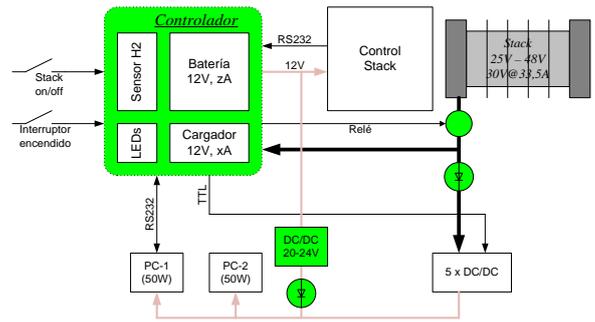


Fig. 4. Esquema del sistema de control y adecuación de potencia

Desde el punto de vista del usuario, el sistema de potencia cuenta con dos interruptores: uno para el encendido del sistema y otro para el encendido específico de la pila de combustible PEM. Este segundo es necesario como medida de protección manual y como confirmación del encendido automático por parte del controlador. Además se han añadido dos leds para indicación luminosa del estado de operación del sistema.

Desde el lado del robot, el sistema de potencia dispone de:

- Tensión de alimentación de potencia. Es directamente la salida del stack, cuya disponibilidad viene controlada mediante un relé. Los valores de tensión están en el rango 25V a 48V, con valor de potencia máxima de 1kW a 30V (33,5 A). Esta alimentación será usada por los motores y demás elementos de potencia del robot.
- Tensión regulada de 24V. Esta tensión se obtiene a través de un elevador CC-CC a partir de las baterías internas del controlador. La tensión de 24V se emplea como SAI (sistema de alimentación ininterrumpida) de los dos PC embebidos del robot.
- Salida TTL como señal digital de indicación de presencia de alimentación estable. Esta señal estará disponible siempre que el controlador considere que la fuente principal (PEM) o la entrada auxiliar de potencia sean confiables.
- Puerto de comunicaciones RS232. Este canal permite la comunicación del sistema de potencia con los PC del robot.

En cuanto al control de la pila de combustible PEM empleada, ésta incorpora un sistema de control básico para la operación autónoma de la ventilación y purga así como las acciones básicas de seguridad (detección de fugas de H₂, temperatura elevada,...). Además incorpora un protocolo serie (SLIP) para la transmisión de datos con el exterior. Si bien para la operación autónoma sería suficiente con una fuente externa de arranque, para su uso en el robot se han implementado:

- Batería de arranque, la cual necesita sistema de recarga para una operación prolongada en el tiempo.
- Pasarela de comunicaciones para adaptar el protocolo SLIP al protocolo RCP (Robot Command Protocol) usado en el robot.

El controlador que se ha añadido a la PEM tiene como misión el manejo de la PEM, la supervisión de su correcto funcionamiento y la gestión de potencia tanto hacia los motores como la tensión de SAI para los PC.

Durante el funcionamiento normal, la fuente de energía activa (PEM o auxiliar) darán la potencia necesaria para alimentar los motores, generar los 24V para los PC (mediante reductores CC-CC) y, finalmente, para cargar la batería interna (que hace funciones de SAI).

Una vez se ha solicitado el arranque de la fuente de energía, el controlador detectará la presencia de entrada auxiliar de potencia. Si está presente (y estabilizada), activará el SAI (mediante la batería interna) y dará la consigna al robot de que la alimentación es estable. Si no hay entrada auxiliar de potencia, iniciará el encendido de la PEM. Usará la batería interna para alimentar el control de la PEM. Una vez encendida y estabilizada, activará el SAI y activará la señal correspondiente.

En caso de que la fuente de alimentación falle (PEM o auxiliar) el SAI continuará alimentando a los PC y la señal TTL bajará para indicar que ya no hay una alimentación estable. Este estado de alimentación mediante SAI se prolongará durante unos minutos para que los PC puedan realizar una parada ordenada. La batería del SAI siempre mantendrá un mínimo de carga para mantener activo el control del sistema de alimentación y así permitir un nuevo arranque de la PEM.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las pruebas experimentales realizadas hasta el momento han estado encaminadas a verificar el correcto funcionamiento del sistema de pila de combustible de forma independiente, quedando pendientes las pruebas de integración en el robot humanoide.

Para empezar, se realizaron pruebas para verificar el correcto funcionamiento del sistema de pila de combustible empleando el sistema de control y gestión de potencia proporcionado por el fabricante. En este caso, se empleó hidrógeno tomado directamente de un puesto de trabajo de laboratorio.

A continuación se realizó la integración del sistema de control y adecuación de potencia desarrollado por la Universidad de Sevilla con el sistema de pila de combustible y el BoP,

comprobandose que el sistema de comportaba según lo esperado y que la salida en potencia cumplía los requisitos exigidos.

Las últimas pruebas realizadas hasta el momento han tenido como objetivo comprobar la autonomía del sistema de pila de combustible con el sistema de almacenamiento de hidrógeno seleccionado. El resultado de las pruebas fue una autonomía de aproximadamente 20 minutos empleando una sola botella de hidrógeno y con la pila de combustible trabajando a una potencia cercana a la máxima (1000 W).

Hay que tener en cuenta que el robot no trabajará casi nunca a la máxima potencia por lo que la autonomía del sistema mejorará considerablemente a medida que se reduzca en consumo.

4. CONCLUSIONES

El empleo de un sistema de alimentación basado en pila de combustible puede suponer una mejora significativa en la autonomía de sistemas robóticos que actualmente se alimentan con baterías convencionales.

Más aún, si se tiene en cuenta el avance tecnológico que se está produciendo en los últimos años en el campo del almacenamiento de hidrógeno con el desarrollo de depósitos cada vez más ligeros (fabricados de composite) y que permiten el almacenamiento a una presión superior.

Esta aplicación de las pilas de combustible podría dar solución a muchos de los problemas energéticos de este sector.

Bibliografía

- [1] S. Martínez, C. A. Monje, A. Jardón, P. Pierro, C. Balaguer, D. Muñoz. *TEO: Full-Size Humanoid Robot Design Powered by a Fuel Cell System*. Cybernetics and Systems Vol. 43, Iss. 3, 2012.
- [2] M.Arbulú; D.Kaynov; L.M.Cabas; C.Balaguer. *The Rh-1 full-size humanoid robot: design, walking pattern generation and control* (Print ISSN: 1176-2322, Online: ISSN: 1754-2103). Journal of Applied Bionics and Biomechanics. Vol. 6. No. 3. pp.301-344. 2009.
- [3] P. E. Rybski, N. P. Papanikolopoulos, S. A. Stoeter, D. G. Krantz, K. B. Yesin, M. Gini, R. Voyles, D. F. Hougen, B. Nelson, and M. D. Erickson, *Enlisting rangers and scouts for reconnaissance and surveillance*, IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 7, no. 4, pp. 14–24, Dec., 2000.

PROYECTO REWAGEN: ELECTROCHEMICAL WATER TREATMENT SYSTEM IN THE DAIRY INDUSTRY WITH HYDROGEN RECOVERY AND ELECTRICITY PRODUCTION

E. Torralba-Calleja, J. García-Montaño, A. Serra, D. Gutiérrez-Tauste

Centro Tecnológico LEITAT, C/ de la Innovació 2, 08225, Terrassa, Barcelona

RESUMEN: El objetivo principal del proyecto REWAGEN, coordinado por IGB Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. en Alemania (FRAUNHOFER) y con la participación de Acondicionamiento Tarrasense Asociacion (LEITAT), HyGear B.V. (HYG), Aqon water solutions GMBH (Aqon), Knowledge innovation market S.L. (KIM), Idropan Dell Porto Depuratori SRL (IDROPAN), Productes el Canadell SL (CTR), C-Tech Innovation Limited (C-TECH), ISA-Intelligent Sensing Anywhere S.A. (ISA) y Eilenburger Elektrolyse- und Umwelttechnik GmbH (EUT), consiste en la investigación y el desarrollo de un prototipo para el tratamiento de aguas residuales de la industria alimentaria, basado en la combinación secuencial de tres tecnologías avanzadas: electrocoagulación, electrooxidación y la recuperación del hidrógeno residual generado para su conversión en electricidad, con el objetivo de obtener un ahorro energético y una reutilización del agua tratada para diferentes aplicaciones – más eficiente en el tratamiento de las aguas residuales y sostenible en términos energéticos. La idea es desarrollar un sistema de tratamiento de estos efluentes con el objetivo de cerrar el ciclo del agua, integrando una gestión de la energía y el agua, donde la electricidad generada a partir de la conversión del hidrogeno sea utilizada dentro del propio sistema de tratamiento. Además, los residuos extraídos del tratamiento de aguas residuales serán potencialmente reutilizados en para cubrir diferentes necesidades dentro del propio sector.

ABSTRACT: The main objective of the REWAGEN project, coordinated by IGB Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. in Germany (FRAUNHOFER) and with the participation of Acondicionamiento Tarrasense Asociacion (LEITAT), HyGear B.V. (HYG), Aqon water solutions GMBH (Aqon), Knowledge innovation market S.L. (KIM), Idropan Dell Porto Depuratori SRL (IDROPAN), Productes el Canadell SL (CTR), C-Tech Innovation Limited (C-TECH), ISA-Intelligent Sensing Anywhere S.A. (ISA) and Eilenburger Elektrolyse- und Umwelttechnik GmbH (EUT), is the research and development of a prototype for wastewater treatment in the food industry based on the sequential combination of three advanced technologies: electrocoagulation, electrooxidation and the recovery of generated hydrogen for energy saving and the reutilization of the resulting treated water for different applications - more efficient in terms of wastewater treatment and sustainable in terms of energy needs. The idea is to develop a wastewater treatment system aiming at closing the water cycle, by integrating energy and water management, where the electricity generated through the hydrogen conversion is used inside the treatment system. Additionally, the extracted residues from the waste water treatment are potentially reused inside the food and dairy industry to cover different needs.

Palabras clave: electrooxidación, electrocoagulación, hidrógeno, pila de combustible, industria alimentaria
Keywords: electrooxidation, electrocoagulation, hydrogen, fuel cell, food industry

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este proyecto es la investigación y el desarrollo de un sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria alimentaria – concretamente del sector lácteo- basado en tecnologías electroquímicas avanzadas, el cual sea eco-eficiente y que permita la reutilización del agua y la valorización de los residuos generados durante el propio proceso de tratamiento.

La energía necesaria para el tratamiento será parcialmente recuperada gracias a la producción de hidrógeno durante el tratamiento electroquímico, mejorando así la sostenibilidad del mismo.

El sistema incluye un pre-tratamiento, un proceso de electrocoagulación (EC) seguido de un proceso de electrooxidación (EO), y finalmente un proceso para la reducción de conductividad. Además, se tendrá en cuenta la separación de los metales provenientes de los lodos de la electrocoagulación, para que la fracción orgánica de éstos pueda ser valorizada con fines energéticos o como fertilizantes.

La novedad fundamental del proceso será la recuperación y valorización del hidrógeno, donde este subproducto obtenido a partir de los procesos electroquímicos, se purificará y aprovechará en una pila de combustible permitiendo la recuperación de

energía para el abastecimiento del proceso de tratamiento de aguas.

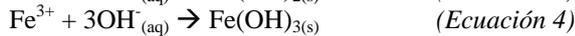
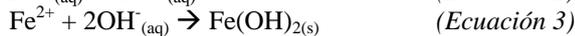
Inicio del proyecto: Junio 2012

Final del proyecto: Junio 2016

2. PARTE EXPERIMENTAL

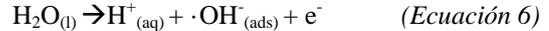
El proyecto tiene como objetivo el tratamiento de efluentes lácteos compuestos por aguas residuales y suero por medio de procesos electroquímicos con el fin de lograr la calidad deseada del agua para su reutilización, recuperar el hidrógeno generado durante el tratamiento como subproducto en un generador secundario de energía, alimentando las principales tecnologías de tratamiento de aguas residuales. Además, el sistema pretende minimizar y valorizar los lodos electrogenerados. La Fig. 1 muestra un diagrama de la planta. El primer paso necesario se basa en la eliminación de las grasas y aceites con el fin de no interferir en los procesos posteriores. Posteriormente, la electrocoagulación y electrooxidación [1][2] como procesos electroquímicos de oxidación avanzada (EAOP), se acoplarán de forma secuencial con el fin de eliminar principalmente los sólidos en suspensión, la turbidez y la carga orgánica.

La EC es un proceso electroquímico que se utiliza como alternativa a los procesos convencionales de coagulación/floculación. En ésta tecnología, los agentes coagulantes se generan *in situ* a través de la oxidación electroquímica de los electrodos metálicos de sacrificio (como el Fe o Al) del material anódico (Ecuación 1). El Fe(II)/Fe(III) o aluminio obtenido (Ecuación 2) junto a los iones hidroxilos (Ecuaciones 3 y 4) generan partículas coagulantes que desestabilizan y adsorben los contaminantes del agua mediante la complejación de la superficie o la atracción electrostática[3]. Los contaminantes son separados por sedimentación o electroflotación debido a la generación de burbujas de gas hidrógeno producidas en la superficie del cátodo (Ecuación 5). Algunas de las reacciones involucradas en el proceso de EC usando Fe como ánodo son las siguientes:



La EO se basa en la generación *in situ* de especies radicales altamente reactivas relacionadas con el reactivo hidroxil ($\cdot\text{OH}$) (Ecuación 6), el cual es un oxidante fuerte con un potencial estándar redox elevado ($E^0(\cdot\text{OH}/\text{H}_2\text{O})=2.80\text{V}$ vs. NHE), éste radical reacciona no-selectivamente con la mayoría

de compuestos orgánicos induciéndoles a la mineralización. Los ánodos más utilizados para llevar a cabo la EO son el Pt y el diamante dopado con boro (DDB)[4]. Contrariamente a la EC, en la EO se utilizan electrodos estables.



Finalmente, se desarrollará un post-tratamiento basado en la Tecnología de Desionización Capacitativa (CDI) para obtener un nivel apropiado de conductividad para la reutilización del agua. Parte del proyecto REWAGEN será valorizar los subproductos obtenidos a lo largo de los EAOP, tales como los lodos producidos en la EC y el hidrógeno producido en ambos procesos de EC&EO.

Por lo tanto, el contenido de metal en los lodos (principalmente hierro o aluminio) se separará en escala de laboratorio de lo otros productos tales como la caseína, fosfatos, nitratos, otra materia orgánica, etc. El hidrógeno producido se recogerá, purificará y utilizará como combustible en un sistema de pila de combustible para ser desarrollado como un Generador secundario de energía.

La pila de combustible que se va a instalar en nuestro sistema es una pila de combustible con membrana de intercambio de protones (PEMFC) siempre y cuando el grado de pureza del hidrógeno sea el adecuado para éste tipo de sistema. Las PEMFC utilizan como electrolito una membrana polimérica, basada en ácidos sulfónicos perfluorados, que debe mantenerse completamente hidratada durante la operación para favorecer la conducción de los protones. Este requerimiento limita la temperatura de operación por debajo de 100 °C y es crítico para obtener una buena eficiencia. Si obtuviéramos un grado de pureza inadecuado para una PEMFC, aplicaríamos otro tipo de pila de combustible capaz de trabajar bajo estas condiciones.

Se requerirá un gran esfuerzo y investigación en este proyecto, debido a que es la primera vez que los procesos de EC&EO son unidos a un sistema de celdas de combustible para recuperar el hidrógeno producido de baja pureza.

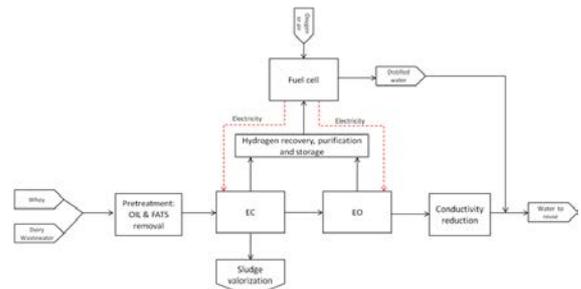


Fig. 1. Diagrama del proceso

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dentro de los objetivos específicos que se han marcado en el proyecto REWAGEN, se ha determinado obtener los siguientes resultados:

Obtención de un sistema para tratar las aguas residuales junto con el suero (caracterizado por su alta conductividad) acoplando procesos electroquímicos de oxidación avanzada (EC&EO).

Desarrollo de procesos electroquímicos sostenibles mediante la recuperación de hidrógeno (producido como subproducto), purificado y utilizado como combustible en un sistema de celda de combustible. Por lo menos, obtener una reducción de 0,7 kWh por cada hora de tratamiento mediante los procesos electroquímicos propuestos.

Reutilización del 80-95% de las aguas residuales tratadas en la industria.

Reducción de alrededor del 30% del consumo del agua de entrada de una industria tipo del sector.

Reducción del Potencial de calentamiento global (GWP) y del Potencial de agotamiento de ozono (PAO) en un 10% debido a un sistema parcialmente sostenible.

Valorización de los lodos generados durante el proceso de EC a través de la recuperación de metal (hierro o aluminio) y el resto de la materia (mediante digestiones anaerobias o como fertilizantes).

No adición de productos químicos en el sistema debido a que con los procesos electroquímicos los reactivos químicos se generan in situ aplicando una cierta intensidad de corriente entre los electrodos.

Monitorización del 80-100% del sistema.

4. CONCLUSIONES

Con este proyecto, se pretende desarrollar por primera vez un sistema de tratamientos de aguas residuales con tecnologías tales como EC&EO, las cuales nunca se habían aplicado junto a la recuperación de hidrógeno.

Agradecimientos

La investigación que lleva a estos resultados ha recibido financiación del Séptimo Programa Marco de la Comunidad Europea de (FP7/2007-2013) en virtud del Grant Agreement n° 283018.

The research leading to these results has received funding from European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under Grant agreement nr 283018.



Bibliografía

- [1] E. Brillas, B. Boye, I. Sirés, J.A. Garrido, R.M. Rodríguez, C. Arias, P.-LL. Cabot and Ch. Comninellis. "Electrochemical Destruction of Chlorophenoxy Herbicides by Anodic Oxidation and electro-Fenton using a Boron-Doped Diamond Electrode". *Electrochim. Acta*, 49, 4487-4496, 2004.
- [2] B. Boye, G. Farnia, G. Sandonà, A. Buso and M. Giomo. "Removal of vegetal tannins from wastewater by electroprecipitation combined with electrogenerated Fenton oxidation". *J. Appl. Electrochem*, 35, 369-374, 2005.
- [3] Martínez-Huitle, C.A.; Brillas, E. "Decontamination of wastewater containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review". *Appl. Catal. B: Environ.*, 87 (2009) 105-145.
- [4] Sirés I., Garrido J.A., Rodríguez R.M., Brillas E., Oturan N., Oturan, M.A. "Catalytic behavior of the Fe³⁺/Fe²⁺ system in the electro-Fenton degradation of the antimicrobial chlorophene". *Appl. Catal. B: Environ.* 72, 382-394, 2007.

PROYECTO MEGARA: GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR COMBUSTIÓN DE HIDRÓGENO: MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS, TURBINAS Y MICROTURBINAS

C. Lucero, M. Escudero, R. Palomino, M. J. García, V. Mesa

Abengoa Hidrógeno, Campus Palmas Altas, Edificio B, Planta Baja, C/Energía Solar 1, CP. 41014, Sevilla, España

RESUMEN: El proyecto Megara “Generación de Energía Eléctrica por Combustión de Hidrógeno: Motores de Combustión Interna Alternativos, Turbinas y Microturbinas”, desarrollado por Abengoa Hidrógeno, tiene por objeto el estudio y desarrollo de sistemas de generación de energía eléctrica basados en motores de combustión interna alternativos (MCIA), turbinas y microturbinas alimentados con hidrógeno como combustible. Se plantea este proyecto para el desarrollo de aplicaciones de obtención de energía a partir de hidrógeno, no como sustituto de las pilas de combustible, sino como alternativa económica a corto y medio plazo.

La actividad desarrollada en el proyecto Megara se ha organizado en tres áreas en función de la tecnología empleada: MCIA, microturbinas y turbinas.

Los estudios desarrollados hasta el momento han permitido identificar las modificaciones necesarias para la adaptación de un MCIA para su uso con hidrógeno. Estos estudios se han basado en búsquedas bibliográficas, estudios cualitativos. Esta información se ha empleado como base de partida para comenzar con la realización de un primer prototipo consistente en adaptar un generador existente para su empleo con hidrógeno como combustible.

Los estudios desarrollados en microturbinas y turbinas se han centrado principalmente en analizar el comportamiento de la cámara de combustión e identificar las modificaciones en el diseño de las mismas requeridas para emplear hidrógeno como combustible. Estos estudios se han basado en búsquedas bibliográficas, estudios cualitativos y simulación de la cámara de combustión y de los posibles ciclos. En el caso de las microturbinas, se ha concluido con la viabilidad de desarrollar un prototipo. En lo referente a las turbinas de gas, se ha propuesto un diseño de ciclo combinado para su integración en plantas de potencia.

ABSTRACT: Megara Project, carried out by Abengoa Hidrógeno, has as objective to study and develop an electricity generation system based on Internal Combustion Engines (ICE), turbines and microturbines. This Project is presented to develop energy generation systems by means of hydrogen, not as a substitution of fuel cells, but as an economic feasible option in the short and mid term.

The activity developed in Megara Project has been organized in three different areas related to the technology applied: ICE, microturbines and turbines.

Studies carried out have helped in the identification of the modifications required to adapt an ICE to be used with hydrogen. These studies have been based in bibliographic searches and qualitative calculations. This information has served as an input to start with the implementation of a first prototype based on the adaptation of an existing generator to be used with hydrogen as a fuel.

Studies developed in microturbines and turbines areas have been mainly focused on the analysis of the performance of the combustion chamber and identification of the design modifications required to employ them with hydrogen as a fuel. These studies have been based on bibliographic searches, qualitative calculations and simulations of the combustion chamber as well as the different cycles proposed. In the microturbines case, it has been concluded the viability to develop a prototype. In relation with gas turbines, a design of a combined cycle for its integration with a power plant has been proposed.

Palabras clave: Motor, turbina, generador, hidrógeno, electricidad.

Keywords: Engine, turbine, generator, hydrogen, electricity.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto Megara “Generación de Energía Eléctrica por Combustión de Hidrógeno: Motores de Combustión Interna Alternativos, Turbinas y Microturbinas”, tiene por objeto el estudio y desarrollo de sistemas de generación de energía eléctrica basados en motores de combustión interna

alternativos (MCIA), turbinas y microturbinas alimentados con hidrógeno como combustible.

De este modo, el proyecto Megara engloba las actividades llevadas a cabo por Abengoa Hidrógeno en este ámbito. El proyecto tiene establecida una duración de tres años, comenzando su actividad a principios de 2011.

Siendo el objetivo fundamental la obtención de energía desde una fuente limpia, renovable y sostenible, las aplicaciones basadas en la combustión de hidrógeno se consideran dentro de las posibles tecnologías futuras para dicho fin. Estas aplicaciones emplean para ello una tecnología robusta, como son los motores de combustión interna alternativos, las turbinas y las microturbinas, tradicionalmente empleados con otros combustibles (gasolina, gas natural, etc.), añadiéndoles el desafío tecnológico de su adaptación para ser utilizados con hidrógeno. Ésta no es una tarea sencilla ya que el hidrógeno presenta una combinación de características en la combustión, como son su alto poder calorífico, su alto rango de inflamabilidad, su baja densidad, etc., que hacen que la adaptación no sea directa, siendo necesario en algunos casos encontrar soluciones particulares.

Se plantea este proyecto para el desarrollo de aplicaciones de obtención de energía a partir de hidrógeno, no como sustituto de las pilas de combustible, sino como alternativa económica a corto y medio plazo.

A diferencia de las pilas de combustible, que permiten transformar la energía química contenida en el hidrógeno directamente en energía eléctrica, las aplicaciones basadas en la combustión obtienen energía mecánica, que puede ser convertida posteriormente en energía eléctrica en un alternador. Sin embargo, dadas las temperaturas que se obtienen en los productos de combustión, una alternativa interesante es plantear distintos esquemas de hibridación con pilas de combustible de alta temperatura o generadores de vapor.

Como ventaja adicional, este tipo de tecnología presenta un coste más reducido y asequible, lo que permite considerarla como otra opción para la obtención de energía a través del hidrógeno.

2. PARTE EXPERIMENTAL

La actividad desarrollada en el proyecto Megara se ha organizado en tres áreas en función de la tecnología empleada: MCIA, microturbinas y turbinas.

Para el cumplimiento de los objetivos se realizan, según cada caso, estudios de viabilidad, análisis cualitativos, ensayos en banco motor y aplicaciones demostrativas, con el fin de identificar los beneficios aportados y las barreras que hay que superar al emplear el hidrógeno en sistemas convencionales de combustión para la obtención de energía de forma viable.

De este modo, el área de MCIA, dado el desarrollo actual de esta tecnología, además de estudios teóricos, se incluye el desarrollo de una aplicación demostrativa, mientras que el área de turbinas; debido principalmente al alto coste y poca

versatilidad a la hora de realizar cambios se limita a estudios analíticos y de viabilidad. Respecto a las microturbinas, aunque comparten morfología y características de funcionamiento con las turbinas, resultan más accesibles desde un punto de vista económico y técnico, y en función de los resultados que se obtengan, se estudiará la viabilidad de realizar pruebas en bancada para analizar y evaluar su comportamiento.

A continuación, se realiza una descripción más detallada de las actividades a realizar en cada una de las tareas propuestas.

2.1 Actividades en el área de MCIA

Esta tarea consistirá en organizar y profundizar en el conocimiento en la operación de motores de combustión interna alternativos con hidrógeno. Dentro de este estudio teórico se recopilará la información obtenida sobre aspectos técnicos y resultados en relación con el desarrollo, la operación y el mantenimiento. Se estudiarán las modificaciones necesarias para la adaptación de un MCIA al uso de hidrógeno, se realizarán estudios analíticos para determinar la potencia obtenida, los rendimientos y las emisiones de NOx asociadas [1].

Todos estos estudios concluirán con los mapas de operación del motor en función de los parámetros anteriormente mencionados. Tras este análisis, se desarrollará una aplicación para la generación de potencia auxiliar (APU) basada en esta tecnología.

Este primer prototipo, consistente en la modificación de un modelo comercial para su empleo con hidrógeno como combustible, servirá de demostrador y permitirá poner en práctica el conocimiento adquirido.

2.2 Actividades en el área de microturbinas

En el área de las microturbinas de gas, se plantea el estudio de la adaptación de microturbinas comerciales existentes para su uso con hidrógeno.

A partir de las conclusiones obtenidas, se evaluará la posibilidad de desarrollar un prototipo basado en estas tecnologías.

De forma complementaria, se estudiarán las posibilidades de hibridación con otras tecnologías.

2.3 Actividades en el área de turbinas

En esta tarea se realizará un estudio técnico-económico de la viabilidad de emplear turbinas de gas con hidrógeno; y en concreto, su aplicación en plantas de producción de potencia (generación estacionaria).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan a continuación los principales resultados obtenidos hasta la primera mitad de la anualidad 2012 en las distintas áreas.

3.1. MCIA

Se ha realizado un análisis del estado del arte del uso de motores de combustión interna alternativos con hidrógeno.

Destacar que la mayoría de la documentación consultada se centra en la adaptación del motor de gasolina (MECH, encendido provocado por chispa) para su uso con hidrógeno como combustible, aunque algunos autores también estudian la adaptación del motor diesel (MEP, encendido por compresión). La baja predisposición a la adaptación de los motores diesel se fundamenta en la elevada temperatura de autoignición del hidrógeno. El estado del arte se centra fundamentalmente en los problemas surgidos de la combustión del hidrógeno en este tipo de motores y en la adaptación de los distintos elementos y sistemas del motor para conseguir un correcto funcionamiento.

En la actualidad los proyectos de desarrollo de motores de combustión interna con hidrógeno se centran en el sector de la automoción, por lo que las grandes compañías de vehículos son líderes en dichos proyectos de investigación.

En esta línea, se ha llevado a cabo un estudio de las modificaciones necesarias para la adaptación de un motor de combustión interna al uso de hidrógeno, estando la mayoría de estas acciones asociadas a prevenir las anomalías propias de la combustión de hidrógeno. Conforme a esto, las modificaciones planteadas afectarán a los siguientes puntos:

- Bujías
- Sistema de inyección
- Sistema de refrigeración
- Lubricación
- Ventilación del cárter
- Relación de compresión
- Turbulencia en el interior del cilindro
- Evitar o reducir los puntos calientes
- Materiales

Posteriormente, se han realizado diferentes estudios cualitativos que permiten realizar una evaluación preliminar del comportamiento de estos motores una vez modificados atendiendo a parámetros de eficiencia, potencia obtenida y disminución de emisiones contaminantes. La Fig. 1 ilustra la mayor eficiencia térmica teórica de los motores de hidrógeno frente a los motores de gasolina producto de las relaciones de compresión superiores. Como complemento se muestra la eficiencia térmica de los motores diesel.

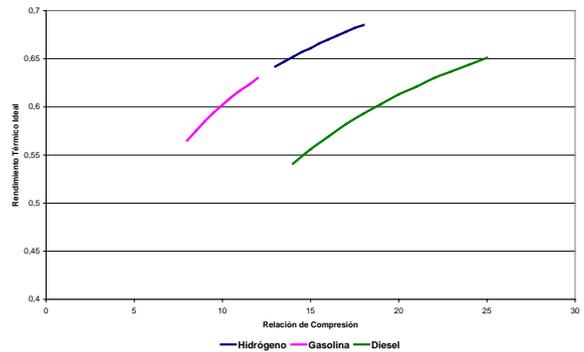


Fig 1. Rendimiento térmico ideal en función de la relación de compresión para motores alimentados con hidrógeno, gasolina y diésel.

Acorde con los resultados obtenidos, se ha comenzado el desarrollo de una aplicación para la generación de potencia auxiliar (APU) basada en esta tecnología. La aplicación consistirá en la implementación de las modificaciones necesarias a un grupo electrógeno comercial basado en MCIA tipo MECH para emplear hidrógeno como combustible.

De acuerdo con las especificaciones de partida, se ha comenzado la selección y adquisición de los componentes, así como las modificaciones que permitirán el desarrollo del prototipo.

3.2. Microturbinas

Los estudios relacionados con las microturbinas de gas con combustión de hidrógeno han aumentado debido el reciente interés en su utilización como sistema de propulsión en vehículos aéreos no tripulados (UAV), además de por sus beneficios medioambientales.

Anteriormente, Nomura, M. et al [2], había trabajado para la adaptación de una turbina de gas comercial para que opere con hidrógeno en lugar de con un combustible fósil utilizando para ello turbinas de potencia reducida.

El sistema de suministro del combustible debe rediseñarse porque cuando el flujo es excesivo o la relación hidrógeno-oxígeno es demasiado elevada, la ignición se produce con una fuerte explosión en el combustor.

Con las modificaciones realizadas por Nomura sólo se demuestra la posibilidad práctica de quemar hidrógeno en una turbina de gas pero no se garantiza un rendimiento óptimo ni el funcionamiento de la turbina a largo plazo. Una exposición prolongada al hidrógeno puede reducir la vida útil de los materiales de la turbina, además de generar otros problemas derivados del propio proceso de combustión.

Las principales propuestas planteadas de cara a mejorar el funcionamiento de la microturbina de gas son las que se resumen a continuación:

- Modificación de la geometría
- Modificación de la relación de compresión
- Modificación del caudal inyectado
- Dilución con nitrógeno

Para poder analizar el impacto de estas modificaciones, se han realizado diferentes simulaciones termo-fluido-dinámicas de la cámara de combustión; encontrando limitaciones asociadas a las altas temperaturas derivadas de la combustión del hidrógeno (que pueden ocasionar problemas de resistencia en los materiales), así como procesos de producción de NOx al combinarse el oxígeno y el nitrógeno del aire

En las diferentes opciones propuestas siempre se plantea llegar a un compromiso con el nivel máximo de temperaturas permitido por los materiales del sistema (limitado en este estudio la temperatura de salida de los gases de combustión a 1.600 K, similar a la que se obtiene con gas natural). También es interesante destacar el efecto de la zona de recirculación a la salida de la cámara de combustión en los gradientes de temperatura y composición de los gases, lo que afecta al funcionamiento de la turbina.

Con los resultados obtenidos en este estudio se ha concluido que es viable el desarrollo de un prototipo de generador de energía eléctrica basado en la modificación de una microturbina de gas para ser alimentada con hidrógeno.

3.3. Turbinas

En este área se ha estudiado el empleo de hidrógeno como combustible en turbinas de gas para su utilización en plantas de potencia.

Tras evaluar todas las alternativas planteadas, y seleccionar la opción más interesante, se ha realizado el dimensionamiento de una turbina de gas que funcione con hidrógeno para obtener una potencia de 10 MW a la salida del ciclo. La turbina de gas seleccionada consta de un compresor de flujo axial de once etapas, una cámara de combustión simple, y de una turbina axial de tres etapas.

Inicialmente se han realizado análisis [3] sobre la cámara de combustión de la turbina de gas empleando hidrógeno, lo que ha permitido una caracterización previa de la cámara.

Posteriormente, se ha estudiado los ciclos termodinámicos que pueden aplicarse a una turbina de gas que opere con hidrógeno, con el objetivo de aumentar al máximo el rendimiento global del sistema.

Finalmente, se ha decidido acoplar la turbina de gas con hidrógeno a la planta de potencia mediante el ciclo combinado que se observa en la Fig. 2. El acoplamiento entre el ciclo de alta temperatura (ciclo Brayton) y el ciclo de baja temperatura se

realiza mediante una caldera de recuperación de calor (HRSG).

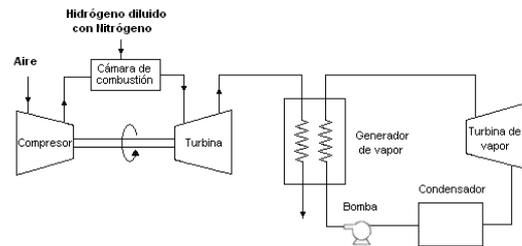


Fig. 2. Esquema Ciclo Combinado propuesto.

Sobre este sistema se han realizado diferentes simulaciones para evaluar el rendimiento final del sistema así como su viabilidad técnico-económica.

4. CONCLUSIONES

El proyecto Megara estudia diferentes aplicaciones para producir energía empleando el hidrógeno como combustible en un proceso de combustión.

Los estudios desarrollados hasta el momento han permitido identificar las modificaciones necesarias para la adaptación de un MCIA para su uso con hidrógeno. Esta información ha servido como base de partida para la realización de un primer prototipo consistente en adaptar un generador existente para su empleo con hidrógeno como combustible.

Los estudios desarrollados en microturbinas y turbinas se han centrado principalmente en analizar el comportamiento de la cámara de combustión e identificar las modificaciones en el diseño de las mismas al emplear hidrógeno como combustible. En el caso de las microturbinas, se ha concluido con la viabilidad de desarrollar un prototipo. Respecto a las turbinas de gas, se ha propuesto un diseño de ciclo combinado para su integración en plantas de potencia.

Bibliografía

- [1] Das LM. Exhaust emission characterization of hydrogen operated engine system: nature of pollutants and their control techniques. *Int J Hydrogen Energy* 1991;16:765-75.
- [2] Nomura, M.; Tamaki, H.; Morishita, K.; 1981. Hydrogen combustion test in a small gas turbine. *International Journal of Hydrogen Energy*, v 6, n 4, p 397-412.
- [3] Bannister, R.L.; Newby, R.A. 1998. Development of a hydrogen-fueled combustion turbine cycle for power generation. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*.

ANÁLISIS DE UNA MICRORRED CON GENERACIÓN DE ORIGEN RENOVABLE E INTEGRACIÓN CON PILA DE COMBUSTIBLE DE TIPO PEM

B. Martínez Ruiz¹, J.L. Serrano¹, T. González-Ayuso¹, L.Daza²

¹CIEMAT, Avda. Complutense, 40, 28040 Madrid

²Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (CSIC), C/Marie Curie 2, Campus Cantoblanco, 28049 Madrid.

RESUMEN: La generación distribuida de energía se presenta, cada vez en mayor medida, como una alternativa real al sistema energético actual. El consumo de energía en el mismo lugar donde es generada supone una serie de ventajas derivadas, entre otras, de la eliminación del transporte energético. Por otro lado el control inteligente de las distintas microrredes localizadas en puntos distribuidos descarga el sistema general de problemas y ayuda a la eficiencia energética y económica a nivel local. En este trabajo se presenta una microrred formada por un subsistema de generación de energía, un subsistema de almacenamiento energético, un subsistema de consumo y un subsistema de control. Se analiza su operación, poniendo especial atención al control realizado y la caracterización de componentes tales como la pila de combustible tipo PEM.

ABSTRACT: Nowadays the penetration of distributed generation including microgeneration is a fact and a real alternative to the current energetic system. The demand of energy in the same place where it is generated, gets a lot of advantages coming from, among others, the elimination of the energy transport. On the other hand the smart management via efficient control strategies lightens the electrical network, reducing problems and, helping to achieve higher both energetic and economical efficiency. In this paper a microgrid is showed compound of a subsystem of energy generation, a subsystem of control, another subsystem of energetic storage and a last subsystem of demand. The performance of the microgrid is analyzed, highlighting the control carried out and the parameterization of some of the components as for instance the PEM fuel cell.

Palabras clave: PEMFC, microrred, energía renovable, híbrido, control.

Keywords: PEMFC, microgrid, renewable energy, hybrid, control.

1. INTRODUCCIÓN

Según el CERTS la microrred es una agregación de cargas y microgeneradores operando como un sistema único que provee tanto energía eléctrica como energía térmica. El VI programa Marco a su vez da la siguiente definición: “Las microrredes comprenden sistemas de distribución en baja tensión junto con fuentes de generación distribuida, así como dispositivos de almacenamiento”.

Este tipo de topología energética presenta una serie de ventajas desde el punto de vista técnico, económico y medioambiental, tales como:

- Eficiencia energética
- Reducción de emisiones
- Incremento de la penetración de la EERR
- Reducción del coste energético
- Minimización de las pérdidas eléctricas

La operación de los elementos de una microrred puede proporcionar beneficios globales al sistema si se gestionan y coordinan de manera inteligente. En este trabajo se presentan diferentes actuaciones sobre una microrred situada en las instalaciones del CIEMAT, siempre con el objetivo final de la eficiencia energética y el control inteligente de la misma.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Para mejor comprensión se divide la microrred estudiada (EGA1500) [1,2] en los diferentes componentes que la constituyen.

2.1. Subsistema de generación

La microrred presentada está compuesta por tres tipos de generación eléctrica; paneles fotovoltaicos, cuya generación será variable en función de la meteorología, emulador eólico, cuya generación será igualmente de alta variabilidad y por último la pila de combustible, alimentada bien mediante hidrógeno suministrado directamente de botellas o a través de un sistema de almacenamiento de hidruros metálicos.

2.2. Subsistema de almacenamiento

El subsistema de almacenamiento está compuesto por un banco de baterías Tudor OPzV con una capacidad de 600Ah. Las baterías están conectadas a un bus de continua, y la variable principal de control de las mismas es el SOC (estado de carga).

Además esta microrred también incluye almacenamiento energético en forma de hidrógeno.

2.3. Subsistema de demanda

La simulación de consumos en esta microrred se realiza con una carga dinámica electrónica H&H con una capacidad de hasta 5kW.

2.4. Subsistema de control

El subsistema de control está compuesto por toda la instrumentación y acondicionamiento necesarios para permitir la interacción entre el software y los diferentes elementos del sistema, sin descuidar los elementos de seguridad. La unificación de todos estos elementos se realiza bajo el entorno de programación Labview.

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. Subsistema de generación

Uno de los elementos pertenecientes al subsistema de generación es la pila de combustible. Para su caracterización se ha llevado a cabo un ajuste del modelo estático, partiendo de [3].

El número de parámetros a determinar ha sido de quince. Para el ajuste de los mismos se ha optado por el algoritmo Levenberg-Marquardt [4].

$$E = 1,229 - 8,5 \times 10^{-4}(T_{fc} - 298,15) + 4,308 \times 10^{-5} T_{fc} \left[\ln \frac{P_{H_2}}{1,01325} + \frac{1}{2} \ln \frac{P_{O_2}}{1,01325} \right]$$

$$V_{act} = \left[\begin{array}{l} 0,1395 - 8,5 \times 10^{-4}(T_{fc} - 298,15) + \\ + 4,308 \times 10^{-5} T_{fc} \left[\ln \frac{P_{H_2}}{1,01325} + \frac{1}{2} \ln \frac{P_{O_2}}{1,01325} \right] \end{array} \right] +$$

$$\left[\begin{array}{l} (-1,610 \times 10^{-5} T_{fc} + 0,0154) \left(\frac{P_{O_2}}{0,1173} + P_{air} \right)^2 + \\ + (0,0002 T_{fc} - 0,1736) \left(\frac{P_{O_2}}{0,1173} + P_{air} \right) + \\ + (-0,0006 T_{fc} + 0,5473) \end{array} \right] (1-e)^{-15i}$$

$$V_{ohm} = \frac{0,0125}{0,068686 \exp \left(175 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{fc}} \right) \right)} i$$

$$V_{conc} = i \left[\left((0,0009 T_{fc} - 0,5317) \left(\frac{P_{O_2}}{0,1173} + P_{air} \right) + (-0,0011 T_{fc} + 1,9239) \right) \frac{i}{2,2} \right]^{1,9999}$$

$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc}$$

$$V_{FC} = n_{cell} V_{fc}$$

Fig. 1. Modelo estático de Pukrushpan [3]. En rojo se muestran los parámetros obtenidos en el ajuste.

La función a minimizar ha sido el error, el vector de observaciones han sido los datos obtenidos de la operación del sistema y la estimación inicial de los coeficientes ha partido de lo expuesto en [3].

El 80% de los datos del sistema disponibles han sido empleados para el modelado (ajuste), mientras que el restante 20% ha sido utilizado para la validación.

Con respecto a la generación fotovoltaica únicamente se ha calculado su eficiencia con un

valor de 9.21% mientras que el emulador eólico por su parte se encuentra en periodo de pruebas.

3.2. Subsistema de almacenamiento

El almacenamiento mediante hidruros metálicos no ha sido empleado en este trabajo, realizándose principalmente un estudio sobre el comportamiento de las baterías del sistema en condiciones de operación.

Se ha analizado la relación entre la temperatura y el estado de carga y se ha realizado un análisis sobre la eficiencia en la conversión.

La eficiencia se ha calculado como el cociente entre la energía entregada ante un requerimiento y la energía necesaria para llevar a la batería al estado inicial que tenía antes de satisfacer esa demanda.

3.3. Subsistema de demanda

Conectados a una microrred se va a tener usuarios con diferentes hábitos de consumo. Este puede ser caracterizado mediante una curva de demanda eléctrica. El objetivo final de la estación es su funcionamiento como sistema autónomo capaz de responder eficientemente a estas demandas. Se presenta un perfil del mes de septiembre obtenido según datos de red eléctrica española.

3.4. Subsistema de control

Una microrred puede ser gestionada como si fuera en su conjunto una unidad predecible de generación y consumo. En este contexto el objetivo general de este subsistema es el de proporcionar una herramienta de gestión inteligente de la energía y una herramienta para el usuario final.

En estos términos se han incluido en el software elementos de predicción meteorológica de manera que se realiza una consulta a la base de datos de la agencia estatal de meteorología, y se lleva a cabo un control difuso del consumo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Subsistema de generación

En la primera gráfica de la Fig. 2 en azul se observa el resultado de los perfiles aplicados para la curva de polarización. La línea roja se corresponde con los datos del modelo para la zona de ensayo. Por último en verde aparece la curva correspondiente a la salida del modelo para todo el rango completo.

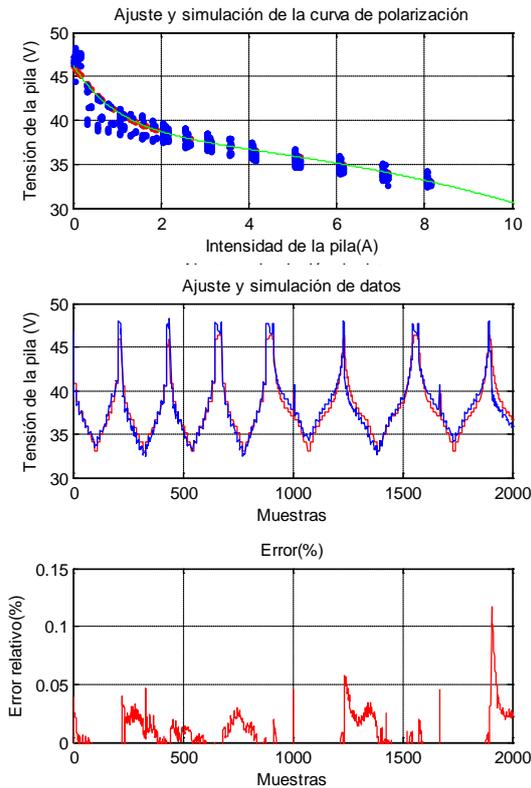


Fig. 2. Resultados del ajuste del modelo, simulación y error.

El modelo obtenido (Fig. 1) se ajusta bien al comportamiento de la pila con un error relativo inferior al 0,1%. Los parámetros obtenidos aparecen en color rojo en el modelo de la Fig. 1.

El comportamiento de la generación fotovoltaica frente a la demanda aplicada puede consultarse en el apartado correspondiente al subsistema de demanda.

4.2. Subsistema de almacenamiento

En la Fig. 3 se puede observar la relación existente entre el estado de carga y la temperatura de las baterías.

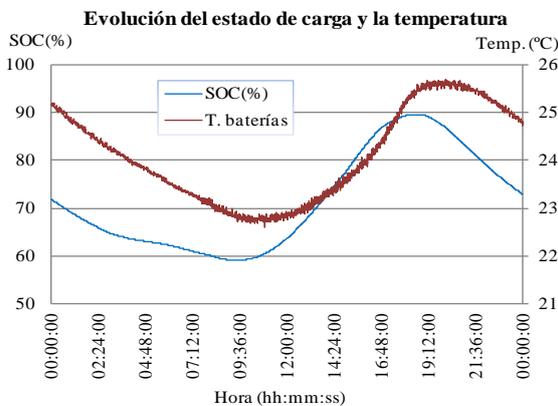


Fig. 3. Evolución del estado de carga y de la temperatura en condiciones de operación.

La temperatura comienza a aumentar prácticamente de manera simultánea a la subida del estado de carga. Llegados al pico de carga (alrededor de 95%) el sistema deja de almacenar energía en las baterías y se comprueba que comienza también un descenso en la temperatura. Este efecto puede observarse con mayor detalle en la Fig. 4.

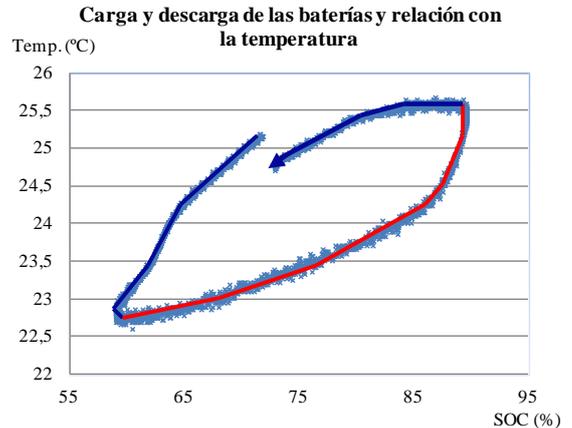


Fig. 4. Proceso de carga (rojo) y descarga (azul) de las baterías con respecto a la temperatura.

Para el cálculo de la eficiencia de las baterías se ha partido de un estado de carga de 70%. Con la demanda aplicada, el estado de carga de las baterías ha disminuido hasta un valor de 59% en un periodo de alrededor de 9 horas. Se ha procedido posteriormente a su recarga para devolverlas al estado inicial. La eficiencia final alcanzada ha sido de un 90,37%.

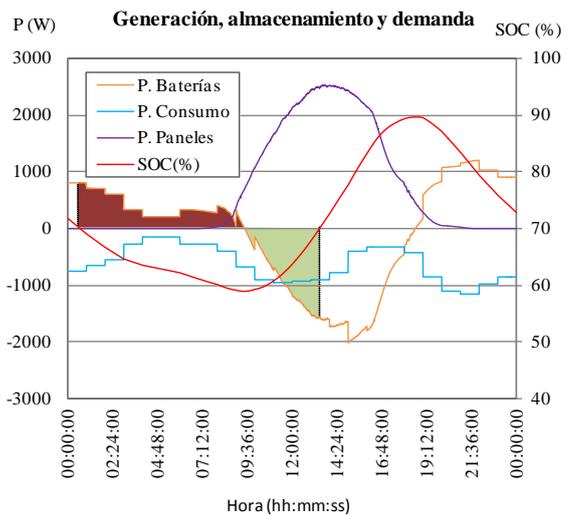


Fig. 5. Comportamiento del sistema completo durante 24 horas. En rojo zona de descenso del SOC y en verde zona de recuperación hasta 70%

En la Fig. 5 aparece en rojo la zona correspondiente al periodo de descarga y en verde la

correspondiente al proceso de carga hasta alcanzar el SOC el valor de 70%.

4.3. Subsistema de demanda

La producción energética del sistema actualmente está principalmente basada en la generación fotovoltaica y el pico de producción coincide aproximadamente con el pico de demanda.

La Fig. 6 muestra la operación del sistema en un periodo de 24 horas con el perfil de demanda aplicado (línea azul).

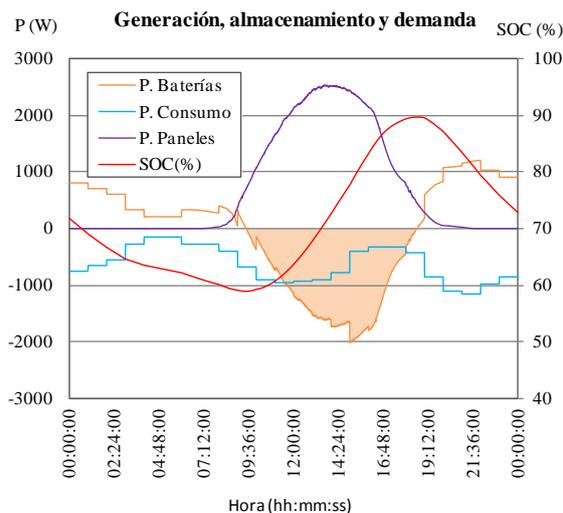


Fig. 6. Operación del sistema, perfil de demanda aplicado al mismo y reacción del sistema ante la demanda.

Durante las primeras horas del día y ante la ausencia de generación fotovoltaica la aportación energética pasa por hacer uso de la energía almacenada en las baterías, por lo que con el paso de las horas el estado de carga de las mismas va disminuyendo.

Una vez que comienza a hacerse presente la radiación solar se aprecia un periodo en el que la demanda es conjuntamente abastecida tanto por la generación fotovoltaica como por la energía contenida en las baterías; para dar paso finalmente a una zona en la que el abastecimiento es completamente de origen fotovoltaico. Dado que el consumo es inferior a la energía generada por los paneles, el excedente va a parar de nuevo a las baterías, produciéndose su recarga (zona sombreada).

4.4. Subsistema de control

Se ha configurado el modo automático de la estación de modo que, partiendo de la predicción de datos meteorológicos, sea aplicado un factor de corrección sobre el perfil de consumo. Con ello se consigue que incluso en días en los que la generación renovable sea insuficiente el consumo pueda ser ajustado a los niveles de generación,

evitando trabajar en estados de carga de las baterías bajos y poco eficientes.

Cuando a pesar de ello el aporte por parte de las baterías y los paneles fotovoltaicos sea insuficiente, se procede al arrancado automático de la pila de combustible estableciendo el usuario un límite mínimo de SOC para el arranque y otro superior para el apagado. La alimentación de gas en este caso se ha realizado de manera directa a través de botellas de hidrógeno, sin pasar por el almacenamiento en hidruros metálicos.

5. CONCLUSIONES

La caracterización de una pila de combustible mediante el ajuste de un modelo estático por el algoritmo de Levenberg-Marquardt es altamente dependiente de la estimación inicial de los parámetros.

El método de ajuste llevado a cabo arroja buenos resultados con errores relativos en el ajuste inferiores al 0,1%.

El banco de baterías de la microrred en condiciones de operación presenta una eficiencia en la conversión del 90,37%.

El subsistema de control es la base de la microrred y núcleo central a partir del cual se deriva la energía en las diferentes direcciones posibles.

El suministro de energía está asegurado en todo momento, manteniendo la principal variable de control (SOC) dentro de márgenes aceptables (50-95%) debido a la gestión realizada por el software de control.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación de la Comunidad de Madrid a través del Programa DIVERCEL S2009/ENE-1475.

Bibliografía

- [1] T. González-Ayuso, J.L. Serrano, J.L. Ortiz, M. Lambea, L. Daza, CONAPPICE 2008, (2008) 369-372.
- [2] T. González, J. L. Serrano, A. M. Chaparro, J. L. Ortiz, L. Daza, Fuel Cell Seminar 2009. 2009-232-A-FCS&E.
- [3] J.T. Pukrushpan, H. Peng, A.G. Stefanopoulou, "Control-Oriented Modeling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 126, No. 1, 2004
- [4] k. Levenberg, "A Method for the Solution of Certain Problems in Least-Squares," Quarterly Applied Math. 2, 1944, 164-168.

DESCRIPCIÓN DE UNA PLANTA PILOTO PARA APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS MEDIANTE PEMFC

M. Martín¹, M. M. Castro², T. R. Serna³, N. Moya³

¹ Aguas de Murcia, Plaza Circular, 9., 30008, Murcia, España.

² Aqualogy Aqua Ambiente Servicios Integrales, S.A., Plaza de Cetina, nº 6, 2º, 30001, Murcia, España.

³ Aqualogy Medio Ambiente, Avda de la Diagonal, 211, 08018, Barcelona, España.

RESUMEN: *La lucha contra el calentamiento global es una de las principales prioridades de las políticas en energía y medio ambiente de la Unión Europea (UE). Además de contribuir a la consecución de los objetivos de la UE, mediante la producción y uso del biogás se obtienen numerosos beneficios socioeconómicos y medioambientales.*

Las pilas de combustible están destinadas a convertirse en una alternativa interesante para su uso en instalaciones productoras de biogás. El objetivo del proyecto BIOCELL es demostrar la viabilidad técnica y económica de la producción de energía a partir de biogás mediante pilas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) y pilas de combustible de óxidos sólidos (SOFC), adaptadas para trabajar en Estaciones Depuradoras de Agua Residual (EDAR), desarrollando herramientas adecuadas para su implantación a escala industrial y valorando el impacto medioambiental generado.

El proyecto ha estudiado en planta piloto dos tipos de pilas de combustible (PEMFC y SOFC) y ha implicado un elevado grado de innovación tecnológica, debido a la ausencia de antecedentes de plantas industriales operando con biogás este tipo de tecnologías y a la falta de equipos comerciales adecuados para su integración en las instalaciones.

A lo largo de este documento se describe la planta experimental instalada por Aguas de Murcia en la EDAR Murcia-Este, y compuesta por pretratamiento, procesador de combustible y dos pilas PEM.

Es necesario seguir trabajando en la optimización del sistema, implicado a fabricantes de pilas de combustible, productores de biogás y centros de investigación con el objeto de desarrollar catalizadores menos sensibles y pilas de mayor capacidad que admitan gas de reformado como alimentación.

ABSTRACT: *Mitigation of global warming is a major priorities in energy and environmental policies of the in the European Union (EU). Besides contributing to the achievement of the EU objectives, production and use of biogas allow to create many economic and environmental benefits.*

Fuel cells are destined to become an attractive alternative for being used in biogas production facilities. The objective of BIOCELL project is to demonstrate the technical and economic feasibility of energy production from biogas by means of proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) and solid oxide fuel cells (SOFC), adapted for working in Wastewater Treatment Plants (WWTP), developing appropriate tools for their implementation on an industrial scale and assessing the environmental impact generated.

Over the project two types of fuel cells have been studied (PEMFC and SOFC) and this has involved a high degree of technological innovation, due to the absence of background information about industrial plants operating this kind of technologies such as the lack of commercial equipment suitable for integration into the demonstration plant.

This paper describes the experimental plant built for biogas valorization by PEMFC in Murcia-Este, WWTP managed by Aguas de Murcia, made up

Further work is necessary to optimize the technology, but involving fuel cell manufacturers, biogas producers and research centers in order to develop catalysts less sensitive and higher capacity batteries that support reformed gas as feed

Palabras clave: *biogás, limpieza, PEMFC, reformado*

Keywords: *biogas, cleaning, PEMFC, reforming*

1. INTRODUCCIÓN

La lucha contra el calentamiento global es una de las principales prioridades de las políticas en energía y medio ambiente de la UE. Además de contribuir a la consecución de los objetivos de la UE, mediante la producción y uso del biogás se

obtienen numerosos beneficios socioeconómicos y medioambientales, entre los que destacan el aprovechamiento de una fuente de energía renovable, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y reducción del volumen de residuos generados.

El biogás es una mezcla de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) que se genera en las EDAR como subproducto del proceso de estabilización de los fangos mediante digestión anaerobia (DA) [1].

La explotación del biogás mediante combustión en calderas, en plantas de cogeneración, micro-turbinas y el enriquecimiento a biometano para su uso como combustible de automoción o para la inyección a red de gas natural, está ampliamente desarrollada. Debido a su alta eficiencia eléctrica y un menor impacto ambiental, las pilas de combustible están destinadas a convertirse en una alternativa interesante para su uso en instalaciones productoras de biogás [2,3].

Desde el año 2005, Aguas de Murcia, empresa responsable de la gestión del ciclo integral del agua en el municipio de Murcia, ha venido desarrollando experiencias encaminadas a valorizar y sacar el máximo rendimiento del biogás generado en sus instalaciones de depuración y, desde el año 2009, la empresa participa en el proyecto BIOCELL.

El objetivo de este proyecto, financiado a través del programa LIFE+ de la UE, es demostrar la viabilidad técnica y económica de la producción de energía a partir de biogás mediante pilas de combustible PEMFC y SOFC, adaptadas para trabajar en EDAR, desarrollando herramientas adecuadas para su implantación a escala industrial y valorando el impacto medioambiental generado.

El proyecto ha estudiado en planta piloto los dos tipos de pilas y ha implicado un elevado grado de innovación tecnológica, debido a la ausencia de antecedentes de plantas industriales operando con biogás este tipo de tecnologías y a la falta de equipos comerciales adecuados para su integración en las instalaciones.

A lo largo de este documento se describirá en mayor detalle la planta experimental construida en la EDAR Murcia-Este (Fig. 1), gestionada por Aguas de Murcia, para el aprovechamiento del biogás mediante PEMFC.



Fig. 1. Vista de la planta experimental para el aprovechamiento del biogás mediante PEMFC en la EDAR Murcia Este.

2. PARTE EXPERIMENTAL.

En la Fig. 2 se muestra el diagrama de flujo del proceso de obtención de energía del biogás mediante pilas de combustible tipo PEM y a continuación se describen los principales equipos que la componen.

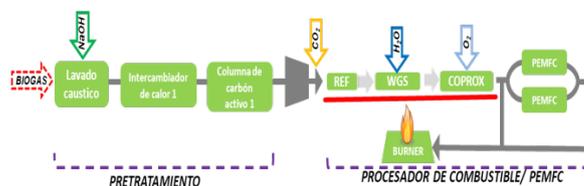


Fig. 2. Diagrama de flujo de la planta piloto PEMFC.

La composición del biogás producido durante la DA del fango de EDAR puede variar mucho, dependiendo principalmente de las características del agua tratada. Es necesario establecer pretratamientos adecuados para poder sacar el máximo partido del recurso, homogeneizando su calidad y preservando las instalaciones de los efectos perjudiciales ocasionados por los compuestos indeseados. La etapa de pretratamiento del biogás está compuesta por una fase de lavado caustico (absorción del sulfuro de hidrogeno (H₂S) mediante lavado químico con una disolución de sosa (NaOH)) y un refinado (enfriamiento de la corriente (2°C), para la eliminación por condensación de humedad y siloxanos (Si), y adsorción en un lecho de carbón activo impregnado en sosa bituminosa, para retener agua (H₂O), H₂S y Si). El pretratamiento lo conforman los equipos y unidades descritos en la Tabla 1:

Tabla 1. Equipos que componen la etapa de limpieza y refinado de biogás en la planta piloto PEMFC.

| Descripción de Equipos | Marca | Mod. /Caract. |
|--|---------------------------------|---------------------------------------|
| Caudalímetro entrada | Endress+Hauser | T-MASS S AT 70 F |
| Válvula motorizada regulación de caudal | Schischek | k-100 |
| Bomba recirculación | Tecnum | BKMK-6.9 |
| Bomba dosificadora | Dosapro | GA-25 |
| Sonda de pH | Endress+Hauser | CPM253 PR8010 |
| Scrubber | Tecnum | 3 uds. x0.025 m ³ |
| Torre de lavado | Tecnum | DPFKK-5, vertical, 500 L de capacidad |
| Intercambiador multitubular agua-biogás. | Heat Exchangers Spiratube (HES) | K 4 60/18 1.1 304/316L H |
| Enfriadora de agua | TEC-FRED | Modelo 541 |
| Torres de contacto vertical | Tecnum | ECVKK - 2 |

El procesador de reformado experimental ha sido diseñado y fabricado por la empresa Olea Madrid S.L. y está formado por un procesador de biogás, en el que se genera una corriente rica en H₂ para

alimentar dos pilas de combustible y los equipos auxiliares necesarios para su correcto funcionamiento. Los gases de salida anódicos, así como el exceso de gas de reformado producido, son recirculados hacia un quemador, que proporciona la energía térmica necesaria para llevar a cabo el proceso.

Los procesos que se desarrollan en el procesador de combustible [4] son: el reformado catalítico (**REF**, $\text{CH}_4(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g}) \leftrightarrow 2\text{H}_2(\text{g}) + 2\text{CO}(\text{g})$), que es una reacción endotérmica ($T > 700^\circ\text{C}$), y la oxidación del monóxido de carbono (CO) en dos pasos: Water Gas Shift (**WGS**, $\text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \leftrightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$) y CO PReferential OXidation (**COPROX**, $\text{CO}(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \leftrightarrow \text{CO}_2(\text{g})$) cuyo objetivo es la eliminación, casi en su totalidad, del CO en la corriente que alimentará a la pila [5] debido a que este compuesto constituye un veneno para las pilas PEM. El CO es absorbido en el ánodo de platino (Pt) de la pila PEM, inhibiendo la disociación del H_2 en protones y en electrones [6].

Las condiciones de alimentación del biogás se han establecido para un caudal de entre 4,4 y 5,5 m^3/h de una mezcla de CH_4/CO_2 , 1:1, y una presión de entrada entre 3,4 y 5,5 bar. Para poder garantizar esas condiciones a la entrada se ha dispuesto un compresor (ADICOMP, BVG2.2-4.30LD-(WP) (EEx-nL)) que permite vencer la pérdida de carga de las etapas anteriores, y un controlador de flujo másico (Bürkert Fluid Control Systems, Type 8626).

El procesador de combustible está compuesto principalmente por los equipos y unidades descritos en la Tabla 2:

Tabla 2 . Equipos y unidades que componen el procesador de combustible en la planta piloto PEMFC.

| Descripción de Equipos | Marca | Mod. /Caract. |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Reactor de REF | Diseño y fabricación Olea Madrid S.L. | Volumen del lecho=1,3 dm^3 |
| Reactor de WGS | Diseño y fabricación Olea Madrid S.L. | Volumen lecho 1= 0,6 dm^3 /Volumen lecho 2=1,3 dm^3 |
| Reactor de COPROX | Diseño y fabricación Olea Madrid S.L. | Volumen lecho= 0,09 dm^3 |
| Quemador catalítico | KINEMAX® | Serie G |
| Soplante quemador | Atlas Copco | HPE 3010 |
| Bomba Dosificadora (H ₂ O) | IWAKI AMERICA | Serie EW |
| Pilas de combustible | MES SA | Fuel Cell DEA (1,5 kW) |
| Carga electrónica | ENELEC,S.L | ZS3006 |

Las composiciones normales del biogás a la salida del pretratamiento están en torno a un 65% CH_4 y un 35% CO_2 ; es necesario añadir CO_2 a la entrada del procesador para alcanzar las condiciones

de proceso. También es necesario suministrar H_2O al reactor de WGS y oxígeno (O_2) en COPROX para conseguir la oxidación del CO. Los equipos auxiliares, indispensables para el correcto funcionamiento del procesador de combustible, son los descritos en la Tabla 8:

Tabla 1. Equipos auxiliares en la planta piloto PEMFC.

| Descripción de Equipos | Marca | Mod./Caract. |
|--|-------------|---|
| Almacenamiento criogénico de CO_2 | Air Liquid | Capacidad almacenamiento <20 m^3 |
| Compresor aire COPROX | Atlas Copco | LF-5-10FF/475/380 |
| Sistema de purificación y almacenamiento de agua | Millipore | Descalcificador compacto / Módulo de pretratamiento PREPAK L3/Sistema Elix 35/ Depósito Millipore SDS |

Tanto para el control como para la automatización del proceso es necesario disponer de equipos de analítica de gases robustos y fiables. Los equipos y técnicas analíticas utilizadas para la automatización del reformador y el control del proceso completo, se describen la Tabla 9:

Tabla 2. Equipos y técnicas de análisis utilizados para el control de proceso en la planta piloto PEMFC.

| Descripción de Equipos | Marca | Mod./Caract. |
|---|------------------------------|---|
| Control de proceso en las etapas de limpieza, refinado y secado extra del biogás. Módulo de análisis. | Siemens | Ultramat 23, analizador de IR con celda electroquímica (CH ₄ , CO ₂ y O ₂) |
| Control de proceso en las etapas de limpieza, refinado y secado extra del biogás. Ampollas colorimétricas de detección de H ₂ S | Dräger | Rangos 0,2 - 7% vol. and 1 - 20 ppm |
| Control de proceso en las etapas de limpieza, refinado y secado extra del biogás. Equipo portátil de analítica de gases | Geotech | Biogas Check Analyser, CH ₄ , CO ₂ y O ₂ de forma directa y sonda externa para la medición de H ₂ S (0 - 5.000 ppm) |
| Control de proceso en las etapas de limpieza, refinado y secado extra del biogás. Analíticas de siloxanos | Agilent | Cromatógrafo 6890 N conectado a un espectrómetro de masas 5973 |
| Sonda humedad relativa 1 | ROTRONIC | Hygroclip ID-EX |
| Sonda humedad relativa 2 | Vaisala | HUMICAP® |
| Automatización del procesador. Ajuste de la proporción de CO ₂ a la entrada. Módulo de análisis. | Asea Brown Boveri S.A. (ABB) | EasyLine EL3020 (CH ₄ , CO ₂) |
| Automatización del procesador. Ajuste de la entrada de agua a WGS y de O ₂ a COPROX en cantidades estequiométricas. Módulo de análisis y pretratamiento de la muestra. | Asea Brown Boveri S.A. (ABB) | Módulo de análisis Uras 26 para medir concentraciones de CO de 0-2% Vol / 0-50% Vol y 0-100ppm. |
| Control del proceso. Módulo de análisis. | Asea Brown Boveri S.A. (ABB) | Advance Optima AO2000 (CH ₄ , H ₂) |

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La instalación de las distintas etapas que componen la planta piloto PEMFC finalizó en 2011 y se realizó la puesta en marcha, alimentada con biogás de EDAR, trabajando un total de 385 h.

Han surgido problemas de operación asociados a equipos comerciales, como los analizadores de control de proceso, que han impedido alimentar las PEMFC con gas de reformado.

4. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares muestran que el funcionamiento de la planta es factible, aunque el proceso es energéticamente costoso y se encuentra en una fase temprana de desarrollo.

Es necesario seguir trabajando en la optimización del sistema, implicado a fabricantes de

pilas de combustible, productores de biogás y centros de investigación con el objeto de desarrollar catalizadores menos sensibles y pilas de mayor de capacidad que admitan gas de reformado como alimentación.

Agradecimientos

Este estudio ha sido posible gracias a la financiación del programa LIFE+(BIOCELL Project LIFE07 ENV/E/000847, www.life-biocell.eu).

Bibliografía

- [1] Al Seadi, T. et al. 2008 Biogas handbook. Disponible en la red: www.lemvigbiogas.com. Última consulta: 23/07/2012
- [2] M. Pérez Martínez, M^a J. Cuesta Santianes, S. Núñez Crespí, J. A. Cabrera Jiménez en *Utilización de biogás en pilas de combustible, 2008*. Disponible en la red: www.ciemat.es. Última consulta: 11/07/2012.
- [3] Y. Kalogo y H. Monteith en *State of science report: Energy and resource recovery from sludge*, Global Water Research Coalition, 2008. Disponible en la red: www.iwahq.org. Última consulta: 12/07/2012.
- [4] Muradov, N., Smith, F., T-Raissi, A. 2008. Hydrogen production by catalytic processing of renewable methane-rich gases. *International Journal of hydrogen energy*, 33,2023-2035.
- [5] Zhang, Z., Xu, G., Chen, X., Honda, K., Yoshida, T. 2004. Process development of hydrogenous gas production for PEFC from biogas. *Fuel Processing Technology* 85, 1213-1229.
- [6] Jiménez, S., Soler, J., Valenzuela, R.X., Daza, L. 2005. Assessment of the performance of a PEMFC in the presence of CO. *Journal of Power Sources* 151, 69-73.

OPERACIÓN DE UN PROCESADOR DE COMBUSTIBLE

T. González Ayuso^{1,2}, A.J. Martín¹, J.L. Serrano¹, L. Daza³

¹Ciemat, Avda. Complutense 40, 28040 Madrid

²Olea Madrid SL, Utrech 3, PIT Európolis, 28232 Las Rozas de Madrid

³Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (CSIC), C/Marie Curie 2, Campus Cantoblanco, 28049 Madrid

RESUMEN: Se ha llevado a cabo el diseño, construcción, instalación y puesta en marcha de un procesador de combustible que convierte el biogás de una depuradora en una corriente rica en hidrógeno apta para alimentar una pila de combustible de baja temperatura. El diseño del proceso se ha realizado condicionando su funcionamiento a una alta eficiencia global. En el proceso no hay más que un pequeño aporte energético externo, debido al consumo eléctrico de instrumento; el calor necesario para el proceso de reformado se genera por combustión a partir de los gases residuales o de los gases alimentados si fuera necesario. El proceso incluye, además de la combustión, etapas de reformado de biogás, conversión de agua (WGS) y oxidación selectiva de CO (COPROX). Se han empleado nuevos catalizadores desarrollados en el Instituto de Catálisis y Petroleoquímica para cada una de las etapas. Por último, el procesador integra dos pilas de combustible de baja temperatura para generación de electricidad. Durante la puesta en marcha y operación intermitentemente se ha comprobado el funcionamiento de cada una de las etapas, detectando posibles mejoras que se plasmarán en un próximo diseño. Debido a que el quemador se alimenta con biogás o con los gases de salida de la pila de combustible, se ha modificado el control para optimizar la utilización de los gases. En el reformador se ha operado a 700 °C y 3 bar de presión, mínima temperatura que permite la operación con conversiones cercanas a las termodinámicas (60%) y a la que no se presentan reacciones secundarias y presión requerida por el procesador. En la etapa de WGS se consiguen conversiones del 98 % operando a 400-450 °C. La oxidación selectiva de CO se lleva a cabo a 220 °C con alta selectividad y conversión, obteniéndose una corriente con menos de 50 ppm de CO.

ABSTRACT: It has been working in the design, construction, installation and start up of a fuel processor that converts the biogas of a sewage treatment plant in a suitable current rich in hydrogen to power a low-temperature fuel cell. The design of the process have been conditioning operate with a high overall efficiency. In the process there are only small contributions of external energy, due to the power consumption of instruments, and the heat needed for the reformed process is generated by combustion from the waste gases or gas powered if necessary. The process includes in addition to combustion, stages of reforming of biogas, water gas shift (WGS) and preferential oxidation of CO (COProx). New catalysts developed in the Institute of catalysis for each of the stages have been used. Finally the processor integrates two low-temperature power generation fuel cells. The plant has been started up and operated intermittently, the operation of each of the stages, detecting possible improvements that appear on a next processor. Since the burner is powered with biogas or fuel cell exhaust, gas control has changed to optimize the use of the gas. In the dry reforming it has operated at 700 °C and a pressure of 3 bar, minimum temperature that enables operation with conversions close to the thermodynamic (60%) and which do not occur secondary reactions and pressure required by the processor. The reaction of WGS get conversions of 98% operating at 400 - 450 °C. Preferential oxidation of CO is carried out at 220 °C with high selectivity and conversion, obtaining a gas flow with less than 50 ppm of CO that can be feed to the PEMFC.

Palabras clave: biogás, PEMFC, generación de hidrógeno, procesador de combustible.

Keywords: biogas, PEMFC, hydrogen generation, fuel processor.

1. INTRODUCCIÓN

Los distintos tipos de pilas de combustible están siendo aplicadas cada vez más a la generación eléctrica empleando diferentes combustibles. Uno de los combustibles que pueden ser empleados para esta generación es el biogás, que se produce en grandes cantidades en depuradoras y en vertederos. El biogás así obtenido suele tener en su composición una relación CH₄:CO₂ entre 0,6:0,4 y 0,7:0,3, que

puede utilizarse en un procesador de combustible para producción de hidrógeno. Si se pretende utilizar una pila de combustible polimérica para generación de electricidad, debe asegurarse la eliminación de monóxido de carbono a niveles inferiores a 50 ppm en la corriente gaseosa proveniente del procesador.

El objetivo de este trabajo es el de aprovechar este biogás utilizándolo como combustible para generar energía eléctrica mediante un sistema de pila de combustible. El sistema está compuesto por un

procesador de biogás, que incluye las etapas de reformado, water gas shift (WGS) y oxidación selectiva de CO (COPROX), con catalizadores de desarrollo propio, y una pila de combustible polimérica.

2. DISEÑO DEL SISTEMA

Para el diseño se ha partido de unas pocas condiciones de partida [1,2] que se comentan brevemente. El sistema consta de un procesador de combustible, para transformar el biogás en hidrógeno, y una pila de combustible de baja temperatura (PEMFC) para generación de electricidad. En las Fig. 1-2 se presenta el esquema y equipo desarrollado.

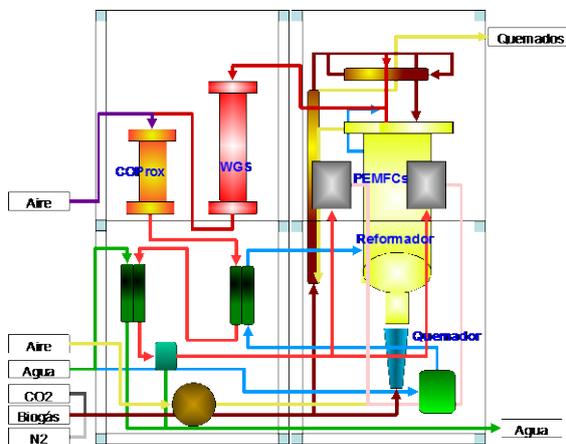


Fig. 1. Esquema del procesador con las diferentes etapas.



Fig. 2. Vista del procesador en las pruebas iniciales de operación.

El procesador consta de tres etapas catalíticas (reformado seco, WGS y COPROX) en las que se emplean catalizadores desarrollados en el Instituto de Catálisis [3]. A partir de los datos de actividad catalítica se ha definido el tamaño de cada uno de los reactores.

Se ha establecido como única fuente de calor el producido en el quemador para proporcionar al reformador la temperatura de operación necesaria.

Debido al aporte de calor mediante un quemador, se diseñó el reactor en forma de corona circular con aporte de calor tanto por el interior como por el exterior y flujo de gases en sentido vertical ascendente.

En los reactores de WGS y COPROX, para minimizar el efecto de la alta concentración de vapor de agua y su posible condensación, los gases fluyen en sentido descendente.

3. PROCESADOR

3.1. Etapa de Reformado

La reacción principal de este proceso es la de reformado seco:



Se ha trabajado a 3 bar de presión de entrada para eliminar los problemas que pudieran surgir por pérdidas de carga en éste o en alguno de los otros reactores del procesador.

Se ha minimizado la temperatura del proceso, seleccionando 700°C como mínima temperatura de proceso para disminuir el consumo energético sin que se produzca formación de carbón.

Las variables de operación representativas se recogen en la tabla 1.

Tabla 1. Datos de la reacción de reformado.

| | Teórico | Experimental | Máximo |
|---------------------------|---------|--------------|--------|
| T (°C) | 750 | 735 | 735 |
| p (bar) | 3 | 3 | 3 |
| Q (kg/h) | 5,1 | 2,0 | 2,0 |
| $x_i \text{ CH}_4$ | 0,08 | 0,22 | 0,35 |
| $x_i \text{ CO}_2$ | 0,06 | 0,17 | 0,77 |
| $x_i \text{ H}_2$ | 0,37 | 0,29 | 0,06 |
| $x_i \text{ CO}$ | 0,44 | 0,42 | 1,26 |
| $x_i \text{ H}_2\text{O}$ | 0,08 | --- | 0,06 |
| Conversión (%) | 65 | 40 | 70 |

El principal problema en la reacción de reformado ha sido la deposición de carbón. Inicialmente se eliminó seleccionando el material del reactor, pero cualquier disminución por debajo de 700 °C con los gases de reacción conduce a la deposición rápida de carbón y la desactivación del material.

3.2. Etapa de WGS

La reacción de WGS viene dada por el equilibrio:



Se ha trabajado entre 350 y 400 °C. Las variables de operación representativas se recogen en

la tabla 2. La temperatura del lecho catalítico condiciona la conversión final. Los resultados obtenidos en condiciones de operación son prácticamente iguales a los de diseño, con una conversión superior al 98%.

Tabla 2. Datos de la reacción de WGS.

| | Teórico | Experimental |
|---------------------------------|---------|--------------|
| T (°C) | 400 | 380 |
| p (bar) | 2,5 | 2,5 |
| Q (kg/h) | 5,13 | 6,55 |
| x _i CH ₄ | 0,03 | 0,15 |
| x _i CO ₂ | 0,15 | 0,39 |
| x _i H ₂ | 0,24 | 0,46 |
| x _i CO | 0,003 | 0,009 |
| x _i H ₂ O | 0,58 | --- |
| Conversión (%) | 98 | 98 |

3.3. Etapa COPROX

La reacción de oxidación selectiva de CO es la que se recoge a continuación:



En esta etapa pueden tener lugar otras reacciones como:



Las condiciones de operación se han recogido en la tabla 3.

Se ha optado por alimentar la corriente proveniente de WGS sin eliminar el agua de esta reacción. El agua provoca algún problema por condensaciones, pero también permite un mejor control de la temperatura del reactor de COPROX al disipar mejor el calor de la reacción.

Debido a que no hay aporte energético externo el problema que se ha planteado ha sido la condensación inicial de agua y el alargamiento en el tiempo de arrancada para alcanzar la temperatura de operación. Una vez en condiciones de operación la reacción permite obtener una corriente con 30 – 50 ppm de CO con la que se puede alimentar las PEMFC.

Tabla 3. Datos de la reacción de COPROX

| | Teórico | Experimental |
|---------------------------------|---------|--------------|
| T (°C) | 220 | 180 |
| p (bar) | 2 | 2 – 3 |
| Q (kg/h) | 17,19 | 6,82 |
| x _i CH ₄ | 0,02 | 0,14 |
| x _i CO ₂ | 0,15 | 0,39 |
| x _i H ₂ | 0,24 | 0,45 |
| x _i CO | <10 ppm | 35 ppm |
| x _i H ₂ O | 0,57 | --- |
| Conversión (%) | >99,9 | >99 |

3.4. Quemador

Se ha empleado un quemador atmosférico que permite la combustión de distintas mezclas de gases, con el adecuado control de alimentación. Un sensor de llama indica la bondad de la oxidación y permite mantener una proporción aire:combustible adecuada a cada composición alimentada.

La planta está diseñada de tal forma que todo el combustible se une como alimentación del quemador. En la tabla 4 se recogen los datos esperados a partir del balance de planta y los datos de operación.

Tabla 4. Composición de la alimentación del quemador

| | Esperado | Operación |
|---------------------------------|----------|-----------|
| T (°C) | 25 | 180 |
| p (bar) | 0,15 | 0,15 |
| Q (kg/h) | 7,72 | 17,19 |
| x _i CH ₄ | 0,06 | 0,22 |
| x _i CO ₂ | 0,39 | --- |
| x _i H ₂ | 0,47 | 0,26 |
| x _i CO | <10 ppm | --- |
| x _i H ₂ O | 0,05 | --- |
| Quemado (%) | >99,9 | >99,9 |

Durante la operación del procesador el quemador ha dado muchos problemas de funcionamiento debido a la pobre mezcla de combustible. Los mejores resultados se han conseguido con un control directo de la soplante de aire en función de la lectura del detector de llama.

También se ha demostrado que es quemador es muy sensible a la humedad del combustible alimentado.

4. PILA DE COMBUSTIBLE

Las dos PEMFC integradas en el reactor son MESDEA de 1500 W cada una. Estas pilas de combustible funcionan, según el fabricante, con hidrógeno puro y ánodo cerrado. Previo a su integración en la planta se alimentaron con hidrógeno puro y con una mezcla de hidrógeno y CO₂ con ánodo abierto para simular las condiciones de operación con los gases del proceso. En la Fig. 3 se presenta la curva de polarización.

Las PEMFC trabajan con una pérdida de carga de 0,6 bar. Al tener que alimentar una mezcla con 50% de gases inertes, el caudal de hidrógeno que pasa a través de la pila de combustible y la potencia se reducen un 50 % (Fig. 4).

El caudal que llega a las pilas de combustible en operación es muy superior al que puede pasar a su través, por ello la utilización global es muy pequeña. En la tabla 5 se recogen los datos esperados y los datos de operación de las pilas de combustible.

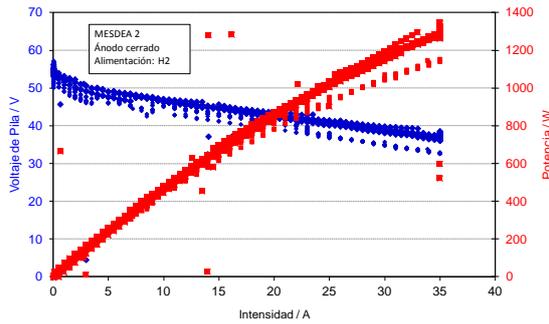


Fig. 3. Curva I-V de una de las PEMFC.

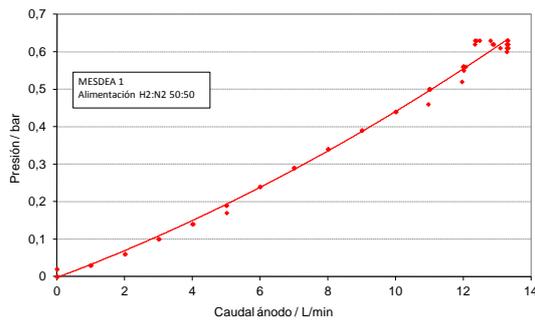


Fig. 4. Variación de la pérdida de carga con el caudal alimentado.

Tabla 5. Datos de la reacción en la PEMFC

| | Teórico | Experimental |
|------------------------|---------|--------------|
| Potencia (W) | 2850 | 1150 |
| T (°C) | 45 | 55 |
| p (bar) | 0,8 | 0,8 |
| Q (kg/h) | 7,64 | 5,92 |
| x_i CH ₄ | 0,10 | 0,17* |
| x_i CO ₂ | 0,50 | 0,46* |
| x_i H ₂ | 0,30 | 0,29* |
| x_i CO | <10 ppm | <40 ppm* |
| x_i H ₂ O | 0,07 | --- |
| Conversión | 60 | 45 |

* Calculados a partir de la composición de entrada

6. CONCLUSIONES

Se ha diseñado, construido y puesto en marcha un procesador de combustible que permite obtener una corriente rica en hidrógeno a partir del biogás generado en una depuradora.

La utilización de un acero sin níquel como material de construcción ha permitido operar sin observar deposición de carbón cuando se trabaja por encima de 700 °C. Sólo en momentos puntuales se han obtenido valores de conversión del orden de los de diseño. La conversión obtenida ha sido inferior a

la esperada, por lo que hay que poner especial cuidado en el control de la alimentación en función de la temperatura del lecho catalítico.

Es necesario acumular horas de operación en distintas condiciones para llegar a conclusiones definitivas sobre la vida del catalizador. En ensayos de laboratorio el catalizador dió mayor conversión y mayores expectativas de vida.

La etapa de WGS ha funcionado correctamente. Sólo ha dado problemas en la puesta en marcha debido a la condensación de la gran cantidad de agua de reacción.

La etapa de oxidación selectiva de CO ha funcionado bien en condiciones de operación. En las paradas, el agua de la reacción anterior ha provocado condensaciones forzando a mayores tiempos de recuperación debido a la necesidad de evaporar el agua condensada.

Es conveniente buscar pilas de combustible que permitan operar con gases de reformado. Las empleadas están diseñadas para operar con hidrógeno puro y el rendimiento con los gases del procesador ha sido muy bajo.

El quemador funciona en condiciones muy forzadas debido al alto contenido en CO₂ en los gases que lo alimentan. Es necesario derivar parte del biogás de entrada para enriquecer la mezcla.

Es necesario optimizar la relación entre caudal de entrada a la planta y potencia de las pilas de combustible para mejorar los rendimientos globales del proceso.

Agradecimientos

Destacar el apoyo del Proyecto Biocell-Life 07 ENV/E/000847 y a EMUASA que ha financiado parcialmente el trabajo y al Proyecto DIVERCEL de La Comunidad de Madrid.

Bibliografía

- [1] A.J. Martín, T. González, L. Daza. Analysis of a Biogas Processing Plant coupled with a Low Temperature Fuel Cell. FCS 2011.
- [2] A.J.Martín, T. González Ayuso, J. Mielgo, J.L. Serrano, L. Daza. Operation of a biogas processing plant for electrical energy generation based on dry reforming and low temperature fuel cells. EFCS Roma 2011.
- [3] Proyecto Biocell-Life 07 ENV/E/000847.