

## **AVANCES EN MICROGENERACIÓN ELÉCTRICA: PILAS DE COMBUSTIBLE**

**José Ignacio San Martín Díaz  
Inmaculada Zamora Belver  
José Javier San Martín Díaz  
Victor Aperribay Maiztegui**

**Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Eibar  
Universidad del País Vasco**

### **RESUMEN**

Las aplicaciones de Generación Distribuida se basan en instalaciones modulares diseñadas según las necesidades de energía, ubicadas cerca del punto de consumo. Dentro de este contexto, las Pilas de Combustible para generación de energía eléctrica pueden funcionar conectadas a la red, como aplicaciones distribuidas o como sistemas auxiliares, para garantizar la calidad del suministro eléctrico. También pueden funcionar de forma aislada, para aplicaciones no conectadas a la red de distribución, en áreas donde no es posible, o no resulta rentable, la instalación de tendidos eléctricos. Por otra parte, el calor producido durante su operación, puede ser utilizado para disponer de agua caliente o calefacción.

Las tecnologías de las Pilas de Combustible utilizadas en las aplicaciones estacionarias dependen del tamaño de la aplicación. Se distinguen dos áreas: estacionarias de grandes dimensiones y estacionarias de pequeñas dimensiones. En relación con las aplicaciones estacionarias de grandes dimensiones, la tecnología PAFC sigue ocupando en la actualidad una buena posición, mientras que la tecnología MCFC, ha cedido terreno. Simultáneamente, se han conseguido avances notables con las tecnologías PEMFC y SOFC. Estas dos últimas tecnologías también son las que destacan en aplicaciones estacionarias de reducidas dimensiones, utilizándose ambas tecnologías como dispositivos activos en el diseño de micro-redes eléctricas aisladas o interconectadas.

En este contexto, esta comunicación presenta una revisión de las distintas aplicaciones que actualmente se formulan con las modalidades de Pilas de Combustible más utilizadas en generación estacionaria y los datos más relevantes de las mismas.

### **PALABRAS-CLAVE**

Pilas de Combustible, Generación Distribuida, Trigeneración, Micro-redes eléctricas, Eficiencias, Hidrógeno.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las pilas de combustible, junto con plantas fotovoltaicas, pequeños aerogeneradores, microturbinas de gas y dispositivos periféricos de almacenamiento de energía, se encuadran en el grupo de tecnologías emergentes que se contemplan para la configuración de las futuras micro-redes eléctricas [1-2]. Esta modalidad de generación distribuida, pretende satisfacer las necesidades de energía eléctrica y térmica de las aplicaciones estacionarias, a todos los niveles, incluyendo la residencial, comercial e industrial.

En este contexto, se puede advertir que la G.D. se puede agrupar y organizar, de una forma más eficaz, constituyendo pequeñas micro-redes. Desde el punto de vista de la red de distribución, la ventaja principal de una micro-red es que pueda ser considerada como una entidad controlada del sistema eléctrico, la cual puede ser operada como una simple carga agregada.

En este escenario, una de las tecnologías que destacan por su elevada eficiencia y bajas emisiones son las pilas de combustible. Estos dispositivos transforman, de forma continua, la energía química de un combustible y un oxidante directamente en energía eléctrica, térmica y agua, no estando condicionadas por el ciclo de Carnot. La pila de combustible más sencilla consiste, esencialmente, en dos electrodos separados por un electrolito.

En dicha pila, las reacciones electroquímicas son exotérmicas, lo que permite la posibilidad de utilización de procesos de poligeneración energética. La producción simultánea de energía eléctrica en la pila y el aprovechamiento del calor generado, bien para obtener más energía eléctrica en una microturbina de gas, o para suplir las necesidades térmicas (calor y frío) de la instalación donde esté ubicada la pila, permite obtener una mayor eficiencia global (1).

$$\eta_{Total} = \frac{Q + E}{Q_o} \quad (1)$$

Donde  $Q$  es la energía utilizada en forma de calor,  $E$ , es la energía eléctrica producida en la pila de combustible y  $Q_o$ , la energía disponible en el combustible utilizado. Esta opción es muy utilizada en aplicaciones estacionarias de las pilas de combustible en unidades de generación de energía de potencia media y elevada. A los sistemas basados en la producción combinada de energía eléctrica y calorífica, se les puede incorporar la opción de generación de frío, mediante máquinas de absorción de doble efecto, proceso que es conocido como Trigeneración.

## 2. TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE

Estos dispositivos, pueden clasificarse en base a dos aspectos fundamentales: la temperatura de funcionamiento y el material del electrolito. En relación con el primer aspecto, se consideran de baja temperatura las modalidades poliméricas, alcalinas, de metanol directo y las de ácido fosfórico; y de temperatura elevada, las de carbonatos fundidos y óxidos sólidos. Considerando las aplicaciones estacionarias, fundamentalmente se emplean las cuatro tecnologías cuyas características se indican en los siguientes subapartados, [3].

### 2.1 Pilas de combustible de membrana polimérica (PEMFC)

La pila básica consiste en una membrana conductora de protones situada entre dos electrodos porosos, recubiertos con platino. El reverso de los electrodos, se recubre con un producto hidrofóbico que permite la difusión del gas hasta la superficie del catalizador. Opera a una temperatura del orden de 80 °C, lo cual permite que arranquen rápidamente, al necesitar menos tiempo de calentamiento. Presentan una densidad

de potencia elevada y, además, responden rápidamente a las variaciones en la demanda. Pueden operar, además de con hidrógeno puro, con hidrocarburos reformados, sin necesidad de eliminar el  $\text{CO}_2$ . Si la PEMFC se alimenta con hidrógeno procedente de un reformador, como contiene pequeñas cantidades de CO, es necesario utilizar PtRu en el ánodo, para prevenir el envenenamiento con CO. El catalizador PtRu, tolera concentraciones de hasta 100 p.p.m. El principal inconveniente es la necesidad de operar en presencia de un catalizador de metales nobles. Por debajo de 150 °C, las impurezas de monóxido de carbono presentes en el hidrógeno, se adhieren al catalizador, e impiden que se produzca la adsorción de hidrógeno. Estas pilas han logrado una vida útil en el entorno de 50.000 horas y el mantenimiento es mínimo.

## 2.2 Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC)

En este tipo de pila, el electrolito utilizado es el ácido fosfórico,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , concentrado (95-98%). Este electrolito no se ve afectado por el CO,  $\text{CO}_2$  y otras impurezas. Los electrodos de las PAFC están constituidos por la capa catalítica, donde tiene lugar la reacción y el sustrato del que depende ésta. La capa catalítica dispone de un soporte estructural (carbono), en el que se dispersa un catalizador (platino) y de un material hidrofóbico. Operan a temperaturas del orden de 150-200 °C, y no necesitan como combustible hidrógeno tan puro. Las PAFC producen menos energía que otras pilas, a igualdad de peso y volumen, resultando ser más costosas. Su tiempo de respuesta es superior a las PEMFC y necesitan mantenimiento para reponer pérdidas del electrolito. Se han instalado un número elevado de unidades estacionarias para apoyar a la red eléctrica y pueden proporcionar potencias del orden de 200 kW.

## 2.3 Pilas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC)

Estas pilas utilizan como electrolito una solución líquida de carbonato de litio o carbonato de potasio. El ánodo está constituido por polvo de níquel sinterizado (poroso) al que se le suele añadir una pequeña cantidad de cromo. El cátodo está constituido por óxido de níquel con una pequeña cantidad de litio. Operan a temperaturas del orden de 650 °C, y pueden utilizar distintos combustibles como el monóxido de carbono, gas natural, propano, etc. Estas elevadas temperaturas incrementan la eficiencia y permiten la utilización de catalizadores más económicos. Sin embargo, requieren la utilización de materiales de propiedades superiores para hacer frente a la corrosión. Se puede conseguir una vida útil de alrededor de 40.000 horas, si funciona a presión atmosférica. Si se eleva la presión a 10 bar, la vida útil se reduce hasta 5.000-10.000 horas.

## 2.4 Pilas de combustible de óxidos sólidos (SOFC)

La pieza central de esta pila es un electrolito constituido por un óxido sólido no poroso, como el óxido de itrio,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , estabilizado con óxido de zirconio,  $\text{ZrO}_2$ . El ánodo es de zirconio/níquel poroso y el cátodo es un mangato de lantano, dopado con magnesio. Estas pilas operan a temperaturas muy elevadas, en el entorno de 1.000 °C, que permiten que no sea necesario utilizar metales nobles como catalizadores, reduciendo el coste. Estas pilas también pueden emplear como combustible monóxido de carbono y metano. Presentan unas tensiones de 0,6 V por elemento y densidades cercanas a los 0,25 A/cm<sup>2</sup>. En relación a su vida útil, Westinghouse presenta un prototipo de SOFC que ha trabajado, sin interrupción, durante más de 69.000 horas, muy por encima del mínimo de 50.000 horas (alrededor de 6 años), que se considera necesario para asegurar el éxito comercial de un sistema de este tipo.

## 2.5 Resumen de las tecnologías de las pila de combustible

En la tabla 1, se indican aquellos aspectos más destacados que afectan a las cuatro tecnologías de pilas de combustible comentadas.

Tabla 1. Aspectos relevantes de las pilas de combustible estacionarias

|                                           | PEMFC                               | PAFC                                | MCFC                                    | SOFC                     |
|-------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------|
| Electrolito                               | Membrana Intercambio Protónico      | Ácido fosfórico                     | Carbonato fundido                       | Óxidos metálicos sólidos |
| Temperatura (°C)                          | 80                                  | 150 – 200                           | 650                                     | 1000                     |
| Reformado                                 | Externo                             | Externo                             | Externo / Interno                       | Externo / Interno        |
| Oxidante                                  | O <sub>2</sub> / Aire               | O <sub>2</sub> / Aire               | CO <sub>2</sub> / O <sub>2</sub> / Aire | O <sub>2</sub> / Aire    |
| Eficiencia (sin cogeneración)             | 30 – 45%                            | 40 – 45%                            | 45 – 60%                                | 45 – 60%                 |
| Eficiencia máxima (con cogeneración)      | 75%                                 | 85%                                 | 85%                                     | 85%                      |
| Rango de potencia                         | 0,1 – 500 kW                        | 5 – 200 kW                          | 800 – 2.000 kW                          | 2,5 – 100.000 kW         |
| Aplicaciones del calor radiado            | Calefacción o calentamiento de agua | Calefacción o calentamiento de agua | Vapor de alta presión                   | Agua caliente o vapor    |
| Tiempo de arranque                        | segundos - minutos                  | 1 – 4 horas                         | 5 – 10 horas                            | 30 – 50 minutos          |
| Densidad de potencia (kW/m <sup>2</sup> ) | 3,0 – 7,0                           | 1,0 – 2,5                           | 1,0 – 3,0                               | 2,0 – 20                 |
| Catalizador                               | Pt, Pt/Ru                           | Pt                                  | Ni                                      | Ni, Perovskitas          |

### 3. PILAS DE COMBUSTIBLE EN GENERACIÓN DISTRIBUIDA: MICRO-REDES

En las aplicaciones estacionarias en general, y en el concepto de micro-red eléctrica en particular, debe distinguirse entre los sistemas que operan de forma continua, aquellos que funcionan con programa y las unidades generadoras de puntas. Respecto a las pilas de combustible, aunque estas tecnologías son frecuentemente comparadas con simples baterías, el tiempo de respuesta de algunas modalidades se encuentra típicamente en el rango de varios segundos y no en micro o milisegundos, al presentar procesos relativamente complejos que contemplan bombas, electroválvulas, reguladores de presión, intercambiadores de calor, etc. Este aspecto enfoca la utilización de las distintas modalidades de pilas de combustible a diferentes aplicaciones prácticas.

En este sentido, la modalidad PAFC tiene un tiempo de encendido que puede oscilar entre 1 y 4 horas; las MCFC pueden necesitar entre 5 y 10 horas; la modalidad SOFC, entre 30 a 50 minutos y las PEMFC menos de 1 minuto. Considerando lo anterior, la zona inferior de la Curva de Carga correspondiente a una micro-red, debe estar cubierta por unidades generadoras de base, que funcionan de forma continua y a potencia esencialmente constante. En esta zona, están llamadas a representar un papel fundamental, las tecnologías con tiempos de respuesta más elevados, como pueden ser las MCFC, AFC y SOFC, además de la PEMFC. En la zona estructurada para funcionamiento con programa, también pueden utilizarse estas cuatro tecnologías. Como unidades generadoras de punta, se pueden utilizar los modelos PEMFC, debido al reducido tiempo de puesta en marcha que presentan.

En ocasiones, las pilas PEMFC pueden ir acompañadas de microturbinas de gas. Las microturbinas, para el arranque y seguimiento de carga, requieren tiempos de entre 2 – 5 minutos, para alimentar de un 20 – 100% de carga, respectivamente. Para la parada, requieren tiempos de 5 – 8 minutos, aunque en 20 segundos pueden reducir el 90% de la carga total. Así mismo, pueden participar en las diferentes zonas de la Curva de Carga, distintas tecnologías renovables y dispositivos para el almacenamiento de energía. En este contexto, es suficientemente elocuente, la micro-red interconectada del pabellón del Japón en la Expo de 2.005 en Aichi. Esta micro-red interconectada utiliza las modalidades PAFC, MCFC y SOFC, así como plantas fotovoltaicas y baterías avanzadas. Además, las pilas de combustible también pueden funcionar como sistemas híbridos, los cuales son sistemas de generación en los que una modalidad de pila de alta temperatura, se combina con otra tecnología de generación. En este sentido, actualmente se está investigando la combinación de las pilas SOFC o MCFC con microturbinas de gas, que permiten elevar la eficiencia global del sistema y reducir las emisiones contaminantes.

En la figura 5, se muestra el diagrama correspondiente al sistema híbrido obtenido cuando se combina una pila MCFC con una microturbina de gas [4]. Los valores numéricos de la figura 5, sirven para indicar un típico ejemplo de cálculo de ciclo, con resultados basados en condiciones de diseño seguras. Este análisis muestra unos resultados en eficiencia eléctrica de aproximadamente el 55% (LHV), para esta tecnología. Investigaciones actuales prevén eficiencias superiores al 60%.

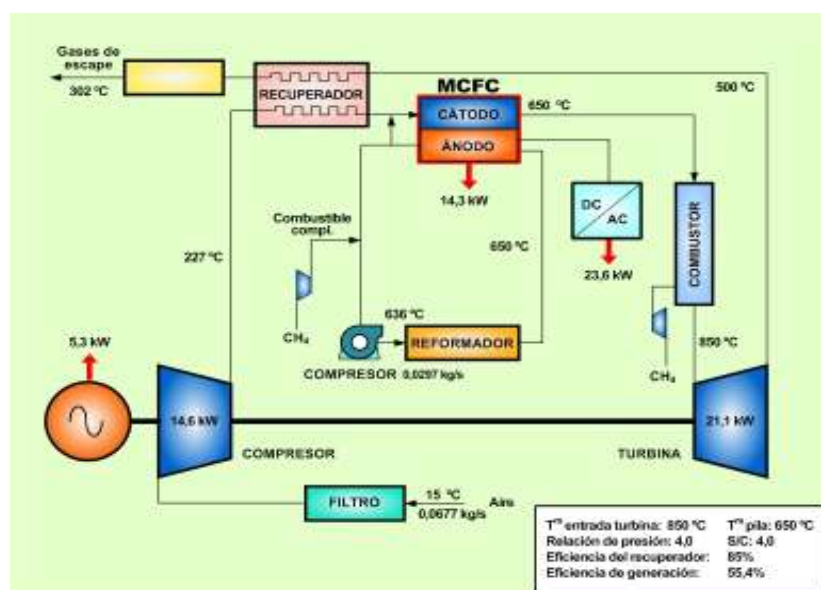


Fig. 5. Diagrama del sistema híbrido MCFC –  $\mu$ TG

La figura 6, muestra el diagrama de bloques correspondiente a una planta con PEMFC, que está conectada a la red general, utilizando convertidores Boost DC-DC y un inversor trifásico, con modulación de anchura de pulsos (PWM) [5]. El dispositivo de almacenamiento de energía en el bus de c.c. se utiliza para adecuar el funcionamiento del sistema de pila de combustible, en condiciones de perturbaciones transitorias, como puede ser el arranque de un motor.

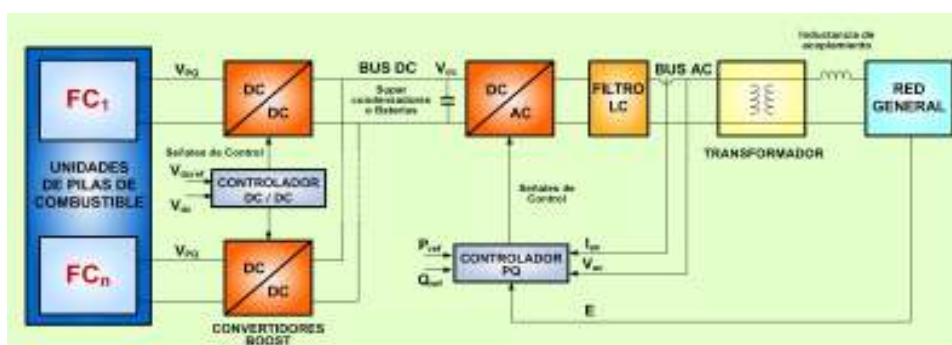


Fig. 6. Sistema de pila de combustible conectada a red

#### 4. DESARROLLO DE APLICACIONES ESTACIONARIAS DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE

Las pilas de combustible se consideran como una tecnología clave para proporcionar energía sostenible, dada su elevada eficiencia energética y su muy bajo impacto ambiental. A continuación se van a revisar algunas propuestas de aplicaciones estacionarias, de carácter práctico, que se desarrollan al amparo de diversas instituciones.

#### 4.1 Pila de combustible polimérica en sistema de Cogeneración

En este subapartado se presentan los valores de eficiencia obtenidos para una pila polimérica de 250 kW, que funciona en modo cogeneración y que incluye un refrigerador por absorción [6]. Los sistemas de absorción están diseñados para recuperar energías de bajo nivel térmico. Son fuentes ideales los gases de escape de las microturbinas de gas, el calor recuperado del circuito de refrigeración de un motor o gases residuales de las pilas. El sistema de cogeneración PEMFC, ha operado durante 5.026 horas, generando 624 MWh. En relación a la eficiencia eléctrica, se ha situado en torno al 34% (LHV) y su eficiencia térmica ronda el 42%, en consecuencia, su eficiencia global se sitúa en el 76%. También se ha evaluado el sistema de aire acondicionado, situando la temperatura en alrededor de 20 °C. En la figura 7, se aprecian los diferentes subsistemas asociados a la pila de combustible PEMFC, la cual está conectada a la red de suministro eléctrico y provee de aire acondicionado al edificio donde está ubicada.

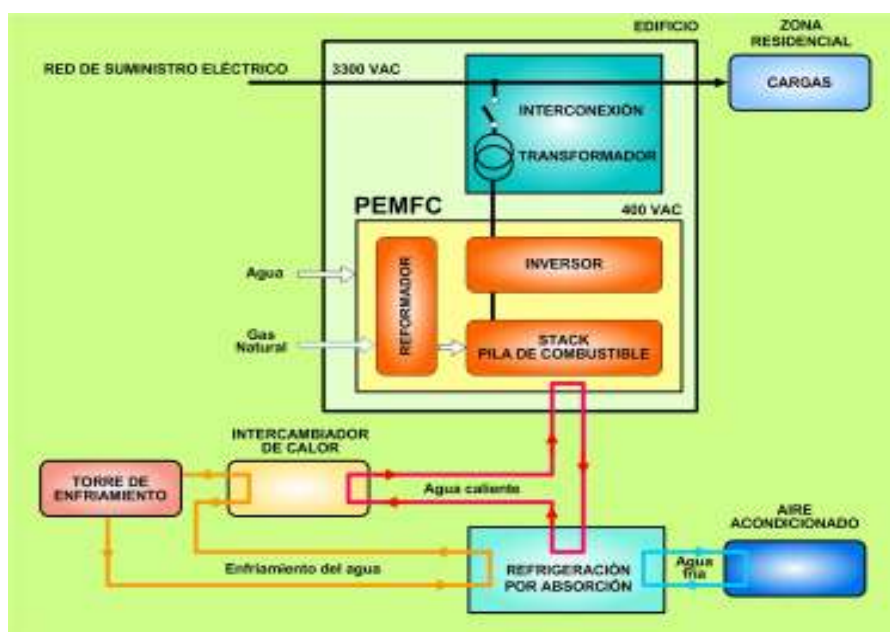


Fig. 7. Sistema de cogeneración de PEMFC de 250 kW

#### 4.2 Sistema de Trigeneración con MCFC

Este sistema permite la obtención de energía eléctrica, calor y frío. Mediante la utilización de equipos de absorción o compresión de la instalación de cogeneración, se puede emplear la energía térmica para la producción de frío, utilizable para climatización o procesos industriales. A continuación se muestran los resultados obtenidos con una pila de combustible tipo MCFC, que está funcionando en Cartagena (España), desde el año 2.002, [7], y cuyo diagrama de bloques se muestra en la figura 8.

La pila MCFC es la base de un sistema de trigeneración, con potencias generadas de 250 kW eléctricos y 170 kW térmicos. Ha sido sometida a múltiples ensayos para conocer su respuesta frente a diferentes problemas en la red eléctrica, distorsión en la red, cortes o microcortes, caídas de tensión, etc. La fiabilidad del equipo ha alcanzado un nivel del 95%. La energía eléctrica generada ( $2,5 \times 10^6$  kWh) se ha consumido en su totalidad en la nave industrial donde está ubicada la pila y la energía térmica ( $8,4 \times 10^5$  kWh) se ha utilizado para producir ACS y aire acondicionado. La eficiencia eléctrica del equipo en c.c. ha sido del 54%, y después de acondicionar la señal de c.c. a c.a., de 400 V, la eficiencia eléctrica ha superado el 47%. Esto, unido al aprovechamiento térmico de los gases de escape, eleva la eficiencia global de la instalación hasta, aproximadamente, el 82%.



Fig. 8. Diagrama de bloques de la pila MCFC Navantia – MTU

### 4.3 Sistema Eólico-Hidrógeno de Utsira

Es el primer proyecto de demostración, a escala completa, de integración de un sistema eólico con almacenamiento de energía en hidrógeno, el cual está ubicado en la isla noruega de Utsira. Esta instalación trata de probar la viabilidad de utilizar hidrógeno como solución a la integración de las energías renovables en sistemas autónomos aislados. En la figura 9, se aprecia la configuración de este proyecto, que debe suministrar energía eléctrica a 240 habitantes [8]. Este sistema está integrado por dos aerogeneradores de 600 kW; un electrolizador de 48 kW (produce 10 Nm<sup>3</sup>/h); un compresor de 5,5 kW; un tanque de almacenamiento a 200 bar de 2.400 Nm<sup>3</sup> de hidrógeno; un volante de inercia de 5 kWh de capacidad; una batería de 50 kWh; una máquina síncrona que opera como referencia de red, de 100 KVA; una pila de combustible de 10 kW y un motor de hidrógeno de 55 kW.

Los aerogeneradores producen energía eléctrica para suministrarla a los usuarios y el excedente se almacena en forma de hidrógeno. En los intervalos de baja actividad del aerogenerador, la pila de combustible y el motor de hidrógeno (MCI) convierten en energía eléctrica el hidrógeno almacenado.

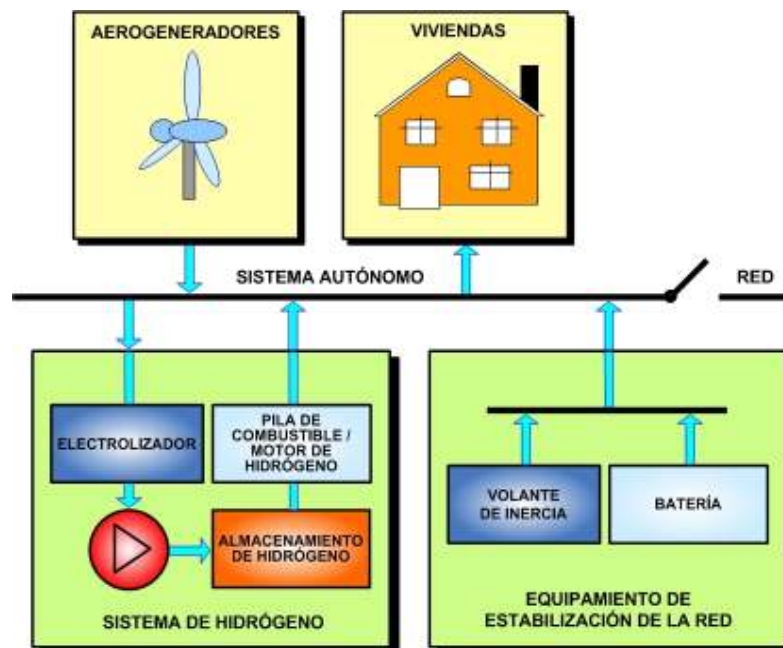


Fig. 9. Configuración de micro-red de la isla de Utsira

En relación a la posibilidad de utilización del hidrógeno en pilas de combustible o en motores de combustión interna, que son las dos modalidades contempladas en el proyecto Utsira, es interesante tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La pila de combustible, en aplicaciones estacionarias y móviles, es el dispositivo ideal para la extracción del potencial del hidrógeno.
- Hasta conseguir que las pilas de combustible ofrezcan fiabilidad y costes competitivos, puede ser adecuada la utilización de los MCI, alimentados con hidrógeno y realizando modificaciones sobre los mismos.
- En los MCI alimentados con hidrógeno, la eficiencia eléctrica para situaciones de carga parcial se reduce bastante, pero pueden llegar a presentar, con cogeneración, eficiencias globales del orden del 90%.
- El inconveniente inherente a los MCI, que puede limitar ostensiblemente su utilización, es que son ruidosos y transmiten vibraciones.

## 5. CONCLUSIONES

Los sistemas estacionarios de energía eléctrica y térmica, basados en pilas de combustible, constituyen una opción a la que se augura un brillante futuro. Esto se debe a las características asociadas a su elevada eficiencia, bajas emisiones, carácter modular, funcionamiento silencioso, flexibilidad en la utilización del combustible, etc. Por otra parte, facilitan así mismo la integración de las energías renovables en el sistema eléctrico. De las seis modalidades básicas existentes, las versiones PEMFC, PAFC, MCFC y SOFC, centran fundamentalmente la atención en el campo de las aplicaciones estacionarias a todos los niveles, incluyendo el doméstico (1 – 5 kW), residencial y comercial (10 – 50 kW) e industrial (250 kW – 1 MW). Los inconvenientes que afectan a estas tecnologías son, fundamentalmente, aquellos que están estrechamente relacionados con su fase experimental, elevado coste e integración de sistemas. En este sentido, las tecnologías del hidrógeno son emergentes y están en constante evolución, por lo que se prevé una significativa mejora en las eficiencias y fiabilidad de los dispositivos. Por otra parte, su futuro está muy unido al de las energías renovables.

## AGRADECIMIENTOS

Esta ponencia ha sido realizada por el equipo investigador del Proyecto ENE2006-15700-CO2-02/CON, al amparo del Ministerio de Educación y Ciencia, Vicerrectorado de Investigación y la Diputación Foral de Gipuzkoa.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Audring, G. Balzer, “Simulating Electrical Performance of Stationary Fuel Cells for Dispersed Generation”, 14<sup>th</sup> PSCC, Sevilla, June, 2002.
- [2] I. Zamora, J.I. San Martín, A.J. Mazón; J.J. San Martín, J.M<sup>a</sup>. Arrieta, V. Aperribay, S. Díaz “Desarrollo e Implantación de Microrredes Eléctricas”, XI ERIAC-CIGRÉ, Hernandarias, Paraguay, Mayo, 2005.
- [3] U.S. Dept of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy. Hydrogen, Fuel Cell & Infrastructure Technologies Program.
- [4] S. Kimijima, N. Kasagi, “Cycle Analysis of Micro Gas Turbine – Molten Carbonate Fuel Cell Hybrid System”, JSME International Journal, Vol. 48, No. 1, pp. 65-74, 2.005.
- [5] M. Hashem, C. Wang, S. Shaw, “Fuel-Cells: Promising Devices for DG”, IEEE Power and Energy Magazine.
- [6] N. Kato, K. Kudo, K. Uchimoto, T. Sakai, “Field Test Results for a 250 kW Class Polymer Electrolyte Fuel Cell Cogeneration System”, NTT Energy and Environment System Laboratories, Musashino R&D Center, Tokyo, Japan.
- [7] Navantia Fuel Cell Focus Centre, MTU HM-300, 2.005.
- [8] E.F. Hagen, D. Övrebö, I. Hexeberg “Hydrogen with Renewable Energy Systems”, Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC, Istanbul, Turkey, July, 2.005.
- [9] J.L.G. Fierro, M.A. Peña, M.V. Martínez, S. Rojas, J.L. Gómez, “Pilas de combustible: un mercado emergente de gran potencial”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 2.005.