

# Pilas de Combustible de Óxidos Sólidos para Generación Distribuida de Electricidad

**Título:** Pilas de Combustible de Óxidos Sólidos para Generación Distribuida de Electricidad. **Target:** Bachillerato de Ciencias y/o Tecnológico. Ciclos Formativos de Grado Superior. Universitario de Carreras Científico-Técnicas.. **Asignatura:** Energías Renovables. **Autor:** Juan José Graña Magariños, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos; Licenciado en Ciencias Ambientales; Arquitecto Técnico, Doctorando en Ingeniería del Medioambiente.

## 1.- INTRODUCCIÓN

La generación distribuida de electricidad está cobrando día a día más importancia. Este hecho, unido a que las Pilas de Óxidos Sólidos (SOFC) pueden emplear diversos tipos de combustibles, las convierten en una tecnología perfecta para esta aplicación.

A día de hoy, estas se suelen emplear en la generación estacionaria de electricidad. Se aplican comúnmente en plantas relativamente grandes para cogenerar electricidad y energía térmica debido a su elevada temperatura de funcionamiento, donde se pueden alcanzar eficiencias superiores al 60%.

## 2.- CARACTERÍSTICAS GENERALES Y FUNCIONAMIENTO DE LA PILA DE ÓXIDOS SÓLIDOS (SOFC)

Una Pila de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC) se compone de cuatro capas, tres de las cuales están fabricadas en material cerámico. Una célula de combustible de óxidos sólidos está compuesta por estas cuatro capas apiladas, de unos pocos milímetros de espesor. Al conectar cientos de estas capas en serie se forma la Pila de Óxidos Sólidos (SOFC).

Las capas cerámicas presentes en este tipo de pilas no se activan eléctricamente ni iónicamente hasta que llegan a una determinada temperatura, lo que provoca que este tipo de pilas operen a unas elevadas temperaturas (de 600°C a 1000°C).

En la figura siguiente se puede ver el esquema de funcionamiento de una Pila de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC):

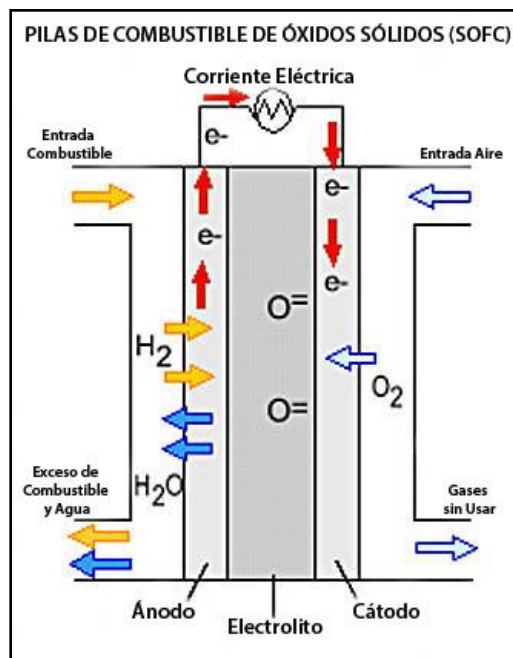


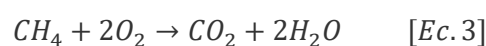
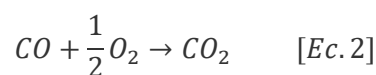
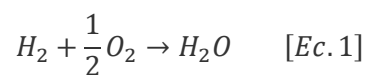
Figura 1.: Esquema de Funcionamiento de la Pila de Óxidos Sólidos (SOFC).

Fuente: elaborada a partir de referencia [www.fuelcellmarkets.com].

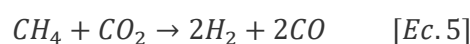
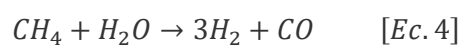
En este tipo de pilas de combustible la reducción del oxígeno a sus iones tiene lugar en el cátodo. Estos iones pueden viajar a través del electrolito de óxido sólido hacia el ánodo, en el cual se oxida electroquímicamente el combustible. En esta reacción de oxidación se genera agua así como dos electrones, los cuales fluyen a través del circuito externo del que se podrá extraer electricidad.

En las Pilas de Combustible de Óxidos Sólidos se dan numerosas reacciones químicas de las cuales pocas son significativas. En ellas, se pueden distinguir cuatro tipos: reacciones de conversión, reacciones de descomposición, reacciones de desplazamiento y reacciones de disociación. Estas se pueden ver a continuación:

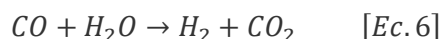
1) Reacciones de conversión:



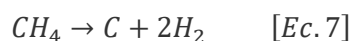
2) Reacciones de descomposición:



3) Reacciones de desplazamiento:



4) Reacciones de disociación:



Como se puede ver en las reacciones anteriormente expuestas, las reacciones de conversión están relacionadas con la producción de energía eléctrica, partiendo del combustible aportado a la Pila de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC). Este puede ser hidrógeno, metano o monóxido de carbono.

En cuanto a las reacciones de descomposición, producen el reformado del metano aumentando de ese modo la concentración de hidrógeno. Las reacciones de desplazamiento actúan de manera similar a las anteriores, logrando un aumento de la concentración de hidrógeno a partir del monóxido de carbono de partida.

Es importante destacar que las reacciones de disociación deben ser evitadas debido a que el carbono que se forma en ellas se deposita sobre el catalizador, bloqueándolo y dejándolo inservible. Para conseguir evitar este problema se suele enriquecer el combustible con vapor de agua favoreciendo que se produzcan las reacciones de descomposición y desplazamiento, siendo de este modo una fracción muy pequeña de metano o de monóxido de carbono la que se disocia.

Por otra parte, la reacción de conversión del hidrógeno es fuertemente exotérmica, lo que favorece a la reacción de descomposición del metano debido al calor generado. Si este proceso se produce en el interior de la Pila de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC) se conoce como reformado interno.

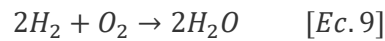
El reformado interno puede ser directo o indirecto. Esto depende de si el contacto térmico existente entre la zona de procesado de combustible y la zona de intercambio electroquímico está acompañado de un intercambio de masa o si hay separación física entre las zonas mediante una placa metálica.

El reformado interno directo es el más usado. Este tiene lugar en el ánodo y da como resultado una pila de combustible más sencilla, con una distribución de temperaturas en el interior más uniforme provocando una mejora en el comportamiento global del equipo.

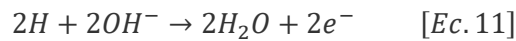
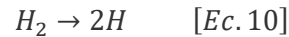
En las Pilas de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC) se necesita calentar el combustible a una temperatura adecuada antes de su introducción al sistema. Dicho proceso se realiza en una etapa previa mediante sistemas de recuperación de calor que aprovechan los gases de escape de la pila. Mediante este proceso se genera un sistema térmicamente auto mantenido siendo para ello necesario, además de bombas y reguladores que controlen el gas que pasa por los intercambiadores de calor y la pila, calentadores que aumenten la temperatura de la Pila de Óxidos Sólidos (SOFC) lo suficiente para iniciar su funcionamiento.

### 2.1.- Reacciones Electrolíticas en la Pila de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC)

En este tipo de pilas de combustible el hidrógeno se oxida siguiendo la siguiente reacción:



En el ánodo (material catalíticamente activo) se oxida el hidrógeno cediendo electrones. Estos circulan por el circuito externo hacia el cátodo. Las reacciones anódicas se pueden ver a continuación:



Debido a los electrones cedidos en el ánodo, en el cátodo se reduce el oxígeno. La reacción catódica se puede ver a continuación:

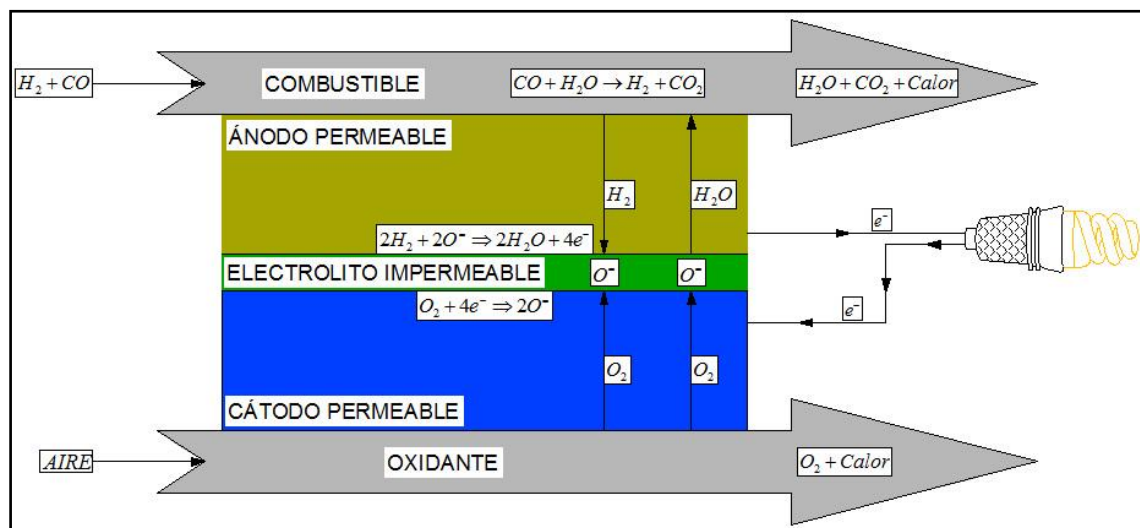
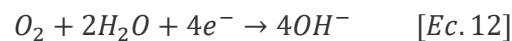


Figura 2.: Reacciones Electroquímicas en la Pila de Óxidos Sólidos (SOFC).

Fuente: elaboración propia.

## 2.2.- Configuración Geométrica de las Pilas SOFC

Las Pilas de Óxidos Sólidos (SOFC) carecen de componentes líquidos, con lo que pueden ser fabricadas en diferentes formas geométricas con objeto de aumentar su compacidad y mejorar su comportamiento. Las dos configuraciones más ampliamente usadas son la plana y la tubular.

- 1) Configuración plana: esta estructura presenta como ventaja principal que la conexión en serie entre las celdas es interna, produciendo unas menores pérdidas que otras configuraciones. La principal desventaja se debe a la elevada complejidad del sellado del gas por compresión de los elementos que forman la celda de combustible, lo que suele provocar una degradación de las superficies de contacto.
- 2) Configuración tubular: esta estructura presenta como desventaja que la conexión en serie entre las celdas es externa, lo que provoca unas pérdidas mayores que la configuración plana. Por otro lado, la ventaja principal de esta configuración radica en el mejor sellado del gas garantizando su

estanqueidad. Este tipo de sistemas están compuestos por dos cilindros huecos cuyas paredes están formadas por los dos electrodos con el electrolito entre ellos. Esto garantiza la estanqueidad de los conductos por donde circula el gas. Posteriormente estos elementos se agrupan mediante conexiones externas.

### 2.3.- Materiales Utilizados en las Pilas SOFC

Las Pilas de Óxidos Sólidos (SOFC) constan de dos electrodos porosos que se encuentran separados por un electrolito donde se realiza la conducción de iones de oxígeno.

Normalmente en este tipo de sistemas se emplea como electrolito un óxido metálico. La temperatura de funcionamiento ronda los 1000°C lo que provoca que los iones de  $O^-$  transporten las cargas del cátodo al ánodo. En la actualidad se suele emplear como electrolito el óxido de zirconio ( $ZrO_2$ ) estabilizado mediante óxido de itrio ( $Y_2O_3$ ). La conductividad de este material alcanza valores aceptables a partir de temperaturas superiores a los 800°C aunque a 1000°C es en torno a cinco veces superior, siendo aun así bastante inferior a la de los electrodos.

El óxido de itrio ( $Y_2O_3$ ) es un material no poroso por lo que no permite que entren en contacto las corrientes de combustible y de oxidante. Además, tiene un buen comportamiento electroquímico aunque posee una resistencia mecánica baja, siendo por estos motivos el material más apropiado y empleado en la actualidad.

En cuanto a los electrodos, estos están formados por materiales cerámicos que resisten la acción del oxígeno y son buenos conductores. En el ánodo se suele emplear el níquel y el óxido de zirconio mientras que en el cátodo se emplea el permanganato de lantano ( $LaMnO_3$ ) dopado con estroncio (Sr).

### 3.- GENERACIÓN DISTRIBUIDA DE ELECTRICIDAD MEDIANTE UNA PLANTA SOFC

Las Pilas de Óxidos Sólidos (SOFC) se pueden emplear en una amplia gama de aplicaciones de generación de energía eléctrica. Estas pueden ir desde dispositivos portátiles o sistemas de generación eléctrica de baja potencia hasta centrales eléctricas para la generación distribuida de electricidad (GD).

El rendimiento de este tipo de pilas de combustible es sensible a su temperatura de operación debido a la relación existente entre esta y la conducción de iones. Además, debido a que la energía térmica generada en las Pilas de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC) es proporcional a la intensidad, la energía eléctrica extraída de la misma guarda una relación directa con el rendimiento. En este tipo de pilas el calor residual puede ser aprovechado mediante su integración con algún tipo de máquina o instalación térmica, permitiendo alcanzar un rendimiento global mayor, alcanzando de ese modo una eficacia total superior al 80%.

Desde el punto de vista ambiental constituye una tecnología muy a tener en cuenta de cara al futuro, ya que además de la elevada eficiencia en la conversión de energía eléctrica, producen unas cantidades muy reducidas de emisiones, entre ellas compuestos derivados del nitrógeno y el oxígeno como los  $NO_x$ .

La elevada temperatura de operación de estos sistemas también tienen asociadas una serie de ventajas que se enumeran a continuación:

- 1) No se hace necesario emplear catalizadores, lo que redundaría en una disminución de costes de esta tecnología.

- 2) Se incrementa la tolerancia de las impurezas presentes en los combustibles provocando, eso sí, problemas de corrosión.
- 3) Se favorecen las reacciones de oxidación y reducción llevadas a cabo en el cátodo y en el ánodo.
- 4) Permite el procesado directo de combustibles en el propio ánodo, como por ejemplo el biogás, etc.

Una de las razones principales por las que este tipo de pilas de combustible resultan muy adecuadas para plantas de generación distribuida de electricidad es su elevada versatilidad en el uso de diferentes combustibles. Estas toleran el monóxido de carbono (CO), que se puede oxidar a alta temperatura a dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en presencia de agua para formar hidrógeno. Además, toleran también el propio dióxido de carbono e diferentes hidrocarburos. Eso sí, hay que tener en cuenta que determinadas sustancias contaminantes presentes en el combustible han de ser reducidas hasta concentraciones menores a 1 ppm como es el caso del ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), el sulfuro de carbonilo (COS) y los halogenuros. Estas pilas aceptan una cantidad de hasta un 0,5% en volumen de amoníaco (NH<sub>3</sub>).

### 3.1.- Estructura de una Planta de Pilas de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC)

Una planta de Pilas de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC) se compone de varios elementos. Algunos de los más importantes se comentan a continuación.

Los Sistemas Auxiliares se encargan de la preparación y suministro del combustible, la alimentación y los procesos complementarios de su funcionamiento, y la gestión de los gases de escape de la pila de combustible.

La Unidad de Acondicionamiento de Potencia se encarga de la conversión de la corriente continua generada en la pila de combustible en corriente alterna con las mismas condiciones que posee la red a la que está conectada (tensión, intensidad y frecuencia).

Las funciones de regulación y control de la planta recaen en dos sistemas diferenciados. Por una parte se tiene el Regulador de Interfaz de Red (RIR), este se ocupa de la interacción de la planta con la red eléctrica, estableciendo las órdenes de inyección de energía a la red en cada momento según la demanda de esta en las condiciones adecuadas (tensión, intensidad y frecuencia). El segundo sistema se denomina el Control de Planta, este transmite las instrucciones apropiadas a los Sistemas Auxiliares, a la Pila de Combustible y a la Unidad de Acondicionamiento de Potencia en función de las órdenes emitidas por el Regulador de Interfaz de Red.

### 3.2.- Proveedores y Modelos destacados en el Mercado

A día de hoy, el proveedor estadounidense Bloom Energy ubicado en California (Sunnyvale), es el líder mundial en la fabricación y desarrollo de las Pilas de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC) de alta eficiencia para generación de energía eléctrica.

Su producto estrella es el Bloom Energy Server (Bloom Box). Este acepta una gran variedad de combustibles, incluyendo hidrocarburos líquidos o gaseosos provenientes de fuentes biológicas para generar electricidad. El sistema Bloom Box puede soportar temperaturas de hasta 980°C, la cual es elevada comparada a los productos suministrados por otros proveedores.

En la actualidad los productos fabricados por esta compañía gozan de popularidad, debido fundamentalmente a que ha instalado sus productos en California para empresas como eBay, Google, Apple y Wal-Mart.

La compañía ha enviado sus primeros Bloom Energy Server (Bloom Box) a Google en el año 2008 siendo el primer cliente de la compañía. Desde entonces numerosos clientes han instalado sus productos, entre otras, alguna de las empresas más destacadas podrían ser eBay que ha instalado 500 kW en 5 unidades, Wal-Mart ha instalado 800 kW en enero de 2010, FedEx ha instalado 500 kW, Coca-Cola ha instalado 500 kW y Bank of America ha instalado 500 kW.

La compañía a día de hoy se dedica fundamentalmente a la producción de grandes sistemas de Pilas de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC) para la generación distribuida (GD) de electricidad. Sus sistemas tienen una elevada eficiencia y están formadas por stacks planos.

En la actualidad la compañía cuenta con los siguientes productos en el mercado:

- 1) Bloom Energy Server ES-5400 con una capacidad de producción de 105 kW<sub>e</sub>.
- 2) Bloom Energy Server ES-5700 con una capacidad de producción de 210 kW<sub>e</sub>.
- 3) Módulo de alimentación ininterrumpida Bloom Energy Server UPM-570. Se trata de una adición modular al sistema Bloom Energy Server.

El corazón de estos sistemas se construye con pilas de combustible de 1 kW<sub>e</sub> empaquetados en una caja (Bloom) compuesta por 40 células de 25 W<sub>e</sub> cada una. Esta pila puede ser alimentada por gas natural o biogás logrando una eficiencia eléctrica superior al 50%.

Las características más destacadas de los sistemas ES-5400 y ES-5700 se pueden ver a continuación:

Tabla 1.: Características Técnicas del sistema Bloom Energy Server ES-5400.  
Fuente: elaborada a partir de datos publicados por el fabricante (Bloom Energy).

<b>Características Técnicas - Bloom Energy Server ES-5400</b>	
<i>Entrada</i>	
Combustibles	Gas Natural, Biogás
Presión de Entrada de Combustible	15 psi
Combustible Requerido a Potencia Nominal	0,661 MMBtu/h de Gas Natural
<i>Salida</i>	
Potencia de Salida (AC neta)	105 kW
Potencia Base de Salida (AC neta)	100 kW
Eficiencia Eléctrica (% PCI y AC neta)	> 50 %
<i>Peso y Dimensiones</i>	
Peso	11 toneladas
Tamaño	4,80 x 2,70 x 2,20 metros

Tabla 2.: Características Técnicas del sistema Bloom Energy Server ES-5700.  
Fuente: elaborada a partir de datos publicados por el fabricante (Bloom Energy).

<b>Características Técnicas - Bloom Energy Server ES-5700</b>	
<i>Entrada</i>	
Combustibles	Gas Natural, Biogás
Presión de Entrada de Combustible	15 psi
Combustible Requerido a Potencia Nominal	1,32 MMBtu/h de Gas Natural
<i>Salida</i>	
Potencia de Salida (AC neta)	210 kW
Potencia Base de Salida (AC neta)	200 kW
Eficiencia Eléctrica (% PCI y AC neta)	> 50 %
<i>Peso y Dimensiones</i>	
Peso	19,4 toneladas
Tamaño	8,10 x 2,70 x 2,20 metros

#### Bibliografía y webgrafía

- Peters R.; Riensche E. y Cremer P. (2000). "Pre-reforming of natural gas in solid oxide fuel-cell systems". Journal of Power Sources, vol. 86, pp. 432-441.
- Meusinger J.; Riensche E. y Stimming U. (1998). "Reforming of natural gas in solid oxide fuel cell systems". Journal of Power Sources, vol. 71, pp. 315-320.
- Dicks A. L. (1998). "Advances in catalysts for internal reforming in high temperature fuel cells". Journal of Power Sources, vol. 71, pp. 111-122.
- Sánchez D. et al. (2006). "Thermal and electrochemical modelling of internal reforming solid oxide fuel cells with tubular geometry". Journal of Power Sources, vol. 160, pp. 1074-1087.
- Jung H. Y. et al. (2006). "Fabrication and performance evaluation of 3-cell SOFC stack based on planar 10 cm x 10 cm anode-supported cells". Journal of Power Sources, vol. 159, pp. 478-483.
- Fuel Cell Handbook (Seventh Edition). (2004). U.S. Department of Energy.
- Moure C. (2002). "Pilas de Combustible de Óxido Sólido (SOFC). Materiales utilizados en la tecnología de las SOFC". Conferencias "Red de pilas de combustible" del CSIC. Madrid.
- "Tech pioneers who will change your life". (2009). Time Magazine.
- "Bloom Box: What is it and how does it work?". (2010). Christian Science Monitor.
- "Bloom Energy Server unveiled, Bloom Box not for the home just yet - Mobile Magazine". (2010). <http://www.Mobilemag.com>.
- "Industry leading companies choose Bloom Electrons for immediate cost savings and carbon reduction benefits". (2011). Bloom Energy.
- "NASA technology comes to earth". (2010). <http://www.bloomenergy.com>
- "Bloom Energy revealed on 60 minutes! : Greentech Media". (2010). <http://Greentechmedia.com>.
- "Be the solution | Customer Story: Walmart, FedEx, Coca-Cola & Bank of America". (2010). <http://www.bloomenergy.com>