

## **Celdas de Combustible: componentes, operación y aplicaciones**

Fuel Cells: components, operation and applications

Gonzalo Martínez-Barrera <sup>a</sup>, Miguel Martínez-López <sup>b\*</sup>, Antonio Téllez-López <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química, Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), Km. 12 de la carretera Toluca-Atzacmulco, San Cayetano 50200, Toluca, Estado de México, México.

<sup>b</sup> Universidad Politécnica del Valle de Toluca, División de Ingeniería Industrial e Ingeniería en Energía, Carretera Toluca-Almoloya de Juárez km. 5.6, Santiaguito Tlalcilcali 50904, Almoloya de Juárez, Estado de México, México.

Correspondencia para autor: Miguel Martínez-López  
Universidad Politécnica del Valle de Toluca  
Correo electrónico: [miguel.martinez@upvt.edu.mx](mailto:miguel.martinez@upvt.edu.mx)

## Resumen

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de combustibles directamente en energía eléctrica mediante una reacción de óxido-reducción. El combustible y agente oxidante más comunes son el hidrógeno y el oxígeno, respectivamente. Los componentes principales de una celda de combustible son el electrolito, electrodos (ánodo y cátodo) y el circuito externo. Las temperaturas de operación van desde 15 hasta 1000 °C. Las aplicaciones dependen de varios factores como el electrolito, combustible, temperatura de operación y catalizadores. Entre las principales aplicaciones de las celdas de combustible está suministrar energía a dispositivos móviles y edificios, así como en la industria aeroespacial. Las principales ventajas de estos dispositivos son las altas eficiencias y bajas emisiones de CO<sub>2</sub>, esto convierte a las celdas de combustible en una opción atractiva para el desarrollo sustentable.

**Palabras clave: celdas de combustible, hidrógeno, temperaturas de operación, aplicaciones, desarrollo sustentable.**

## Abstract

Fuel cells are electrochemical devices that convert chemical energy from fuels directly into electrical energy through an oxidation-reduction reaction. The most common fuel and oxidizing agent are hydrogen and oxygen, respectively. The main components of a fuel cell are the electrolyte, electrodes (anode and cathode) and the external circuit. The operating temperatures range from 15 to 1000°C. Applications depend on several factors such as electrolyte, fuel, operating temperature and catalysts. Among the main applications of fuel cells are powering mobile devices and buildings, as well as in the aerospace industry. The main

advantages of these devices are high efficiencies and low CO<sub>2</sub> emissions, making fuel cells an attractive option for sustainable development.

**Keywords: fuel cells, hydrogen, operating temperatures, applications, sustainable development.**

## Introducción

Las tecnologías y fuentes de energía para la producción de electricidad han cambiado considerablemente en los últimos cien años. En la actualidad la mayor parte de la electricidad es producida mediante turbinas de vapor que usan combustibles fósiles (gas natural y carbón). En menor porcentaje se usan turbinas de gas, turbinas hidráulicas, turbinas eólicas y paneles solares. Respecto a las fuentes de energía, los combustibles fósiles son los más usados, seguido de la energía nuclear y energías renovables.

Con el fin de suministrar energía eléctrica de manera segura, fiable y respetuosa del medio ambiente, se han buscado tecnologías nuevas que sean capaces de superar los desafíos sociales, políticos y, principalmente, económicos. Entre estas tecnologías se encuentra la energía solar fotovoltaica, energía eólica, energía solar fototérmica, etc., pero no son las únicas, también podemos encontrar a las celdas de combustible, a menudo llamadas pilas de combustible.

Una celda de combustible es un dispositivo que utiliza la energía química de combustibles como el hidrógeno y el metanol para producir energía eléctrica de manera limpia y con eficiencias superiores a las tecnologías convencionales basadas en la combustión. Las emisiones contaminantes de estas celdas son mucho menores en comparación con motores de combustión, o prácticamente nulas si se usa hidrógeno como combustible.

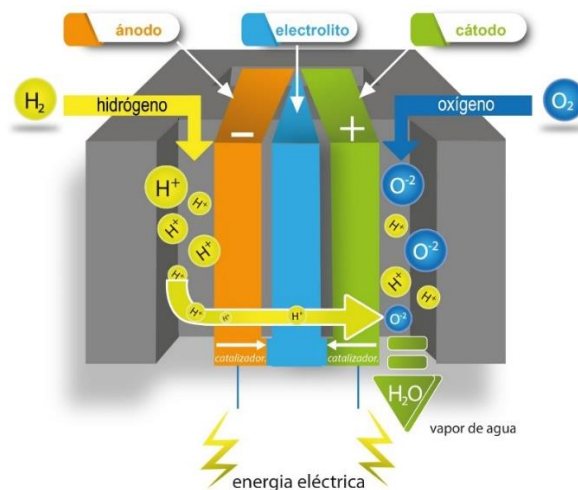
Las escalas de esta tecnología son muy variadas ya que las celdas pueden ser pequeñas para alimentar dispositivos portátiles o de mayor tamaño y capacidad para proporcionar energía en centrales eléctricas. Estos dispositivos son usados en diversas áreas, entre ellas, en la industria del transporte, para proporcionar energía a edificios comerciales y residenciales o como sistemas de almacenamiento de energía, entre otros.

### **1. Celdas de combustibles**

El desarrollo de las celdas de combustible se remonta a 1839 cuando William Grove creó una “batería voltaica gaseosa”. Este dispositivo tenía dos electrodos de platino insertados en un vaso de precipitado con una solución de ácido sulfúrico. En un electrodo colocó un tubo con oxígeno y en el otro electrodo un tubo con hidrógeno. Grove observó que los gases se consumían y al mismo tiempo se producía una corriente eléctrica. En 1889 Charles Langer y Ludwing Mod modificaron el dispositivo de Grove utilizando un monoconductor poroso con el fin de resolver el problema de la invasión de electrodos. A partir de este estudio se comenzó a usar el término “celda de combustible”. En 1939 Francis Thomas Bacon construyó la primera celda con aplicación práctica. Este dispositivo tenía un electrolito alcalino y electrodos de níquel y fue utilizada en submarinos de la segunda guerra mundial y en naves espaciales de la NASA para la misión Apolo (Breeze, 2017, 2019).

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química directamente en energía eléctrica mediante una reacción de oxidación-reducción (redox) entre un gas oxidante (oxígeno) y un combustible, generalmente hidrógeno. En la actualidad existen diferentes celdas de combustible para una gran variedad de aplicaciones, la diferencia entre estas radica en el tipo de electrolito, combustible y electrodos que usan. Entre las más comunes están la

celda de combustible alcalina, celda combustible de ácido fosfórico, celda de combustible de óxido de sólido, celda de combustible de carbonatos fundidos, celda de combustible de membrana de intercambio protónico y de metanol directo. Independientemente del tipo de electrolito y combustible que usen, una celda de combustible consta de cuatro componentes principales: electrolito (líquido o sólido), ánodo, cátodo y un circuito externo (Figura 1) (Campanari y Guandalini, 2020; Lindorfer y col., 2020).



**Figura 1.** Partes de una celda de combustible.

**Fuente:** elaboración propia.

En una celda el combustible se alimenta continuamente al ánodo y el gas oxidante (generalmente oxígeno del aire) al cátodo. Las reacciones electroquímicas se llevan a cabo en los electrodos produciendo una corriente eléctrica a través del electrolito.

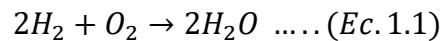
Las funciones de cada componente son las siguientes:

- Electrolito: transporta las especies iónicas producidas en el cátodo o ánodo y sirve como barrera para evitar que el combustible y el gas oxidante se

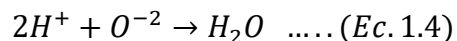
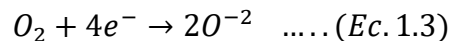
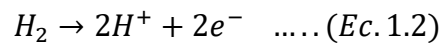
mezclen. Además, actúa como barrera para evitar un cortocircuito entre el ánodo y cátodo.

- **Ánodo:** proporciona las condiciones para que el hidrógeno se oxide y que sus electrones lleguen al interconector. Deben ser materiales porosos, delgados y con alta conductividad eléctrica.
- **Cátodo:** en este electrodo el oxígeno se reduce con los electrones del circuito externo y reacciona con el ion de hidrógeno formando agua. También debe ser un material con alta conductividad eléctrica, poroso y delgado.
- **Circuito externo:** su función es transferir electrones del ánodo al cátodo.

La reacción general que ocurre en la celda de combustible es:



En esta reacción el hidrógeno reacciona con el oxígeno para producir agua. Esta reacción es exotérmica, es decir, libera energía (Ec. 1.1). Para su estudio, esta reacción se divide en tres reacciones parciales o semirreacciones:



Si esta reacción se llevara a cabo en un tubo de ensayo se produciría calor, pero en una celda de combustible la mayor parte de la energía liberada es en forma de energía eléctrica (Breeze, 2019; Campanari y Guandalini, 2020; Lindorfer y col., 2020).

A temperatura ambiente, el hidrógeno y oxígeno se encuentran en forma molecular ( $H_2$  y  $O_2$ ), por lo que estas moléculas deben dissociarse antes de reaccionar para

formar agua. Para que se lleve a cabo esta disociación es necesario aplicar energía suficiente para romper los enlaces químicos que mantienen unidas a las moléculas; esta energía es llamada energía de activación. Existen varios métodos para la disociación de las moléculas de hidrógeno y oxígeno, entre ellos, elevar su temperatura a más de 800 °C o mediante una llama o chispa, las cuales deben tener la energía suficiente para disociar estas moléculas e iniciar la reacción. Algunas celdas de combustible operan a altas temperaturas (750-1000 °C) para lograr la disociación molecular (Breeze, 2019).

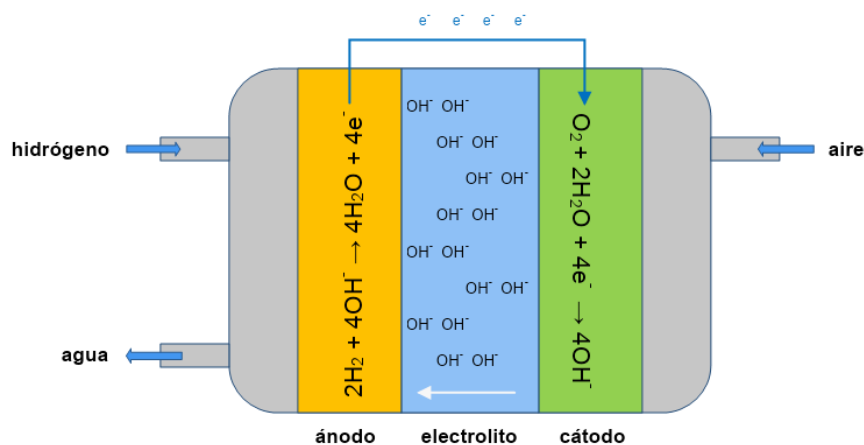
Otra forma de disociar las moléculas de hidrógeno y oxígeno es mediante catalizadores los cuales son materiales capaces de iniciar o acelerar una reacción química sin consumirse durante dicha reacción. En las celdas de combustible el mejor catalizador es el platino (Pt) soportado en otro material, generalmente carbón, lo cual permite temperaturas de operación menores a 100 °C. Un inconveniente de este catalizador es su elevado costo y que puede ser envenenado por las impurezas de los reactivos gaseosos como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO) (Campanari y Guandalini, 2020; Sundén, 2019).

Como se mencionó anteriormente, en una celda de combustible la mayor parte de la energía liberada durante la reacción entre el hidrógeno y oxígeno es en forma de energía eléctrica. Si esta reacción se lleva a cabo a temperatura ambiente y presión atmosférica, la máxima eficiencia teórica de conversión de energía química en electricidad sería del 83%. Esta eficiencia es ideal, por lo que ninguna celda de combustible podría alcanzarla. Tanto la presión como la temperatura modifican la eficiencia de una celda; un incremento en la presión mejoraría dichas eficiencia, mientras el incremento de la temperatura tiene un efecto contrario. En la práctica, la eficiencia de las celdas de combustible está entre el 20 y 60% (Lindorfer y col., 2020; Pramuanjaroenkij y Kakaç, 2023; Sundén, 2019).

## 2. Tipos de celdas de combustible

### 2.1 Celda de Combustible Alcalina (CCA)

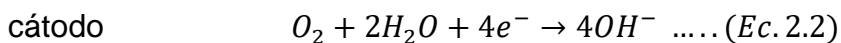
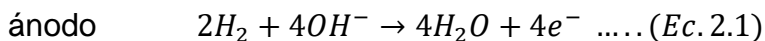
La celda de combustible alcalina usa como electrolito una solución concentrada de hidróxido de potasio. Por lo general, la concentración de esta solución es del 30-40% y está soportado en una matriz, normalmente un sólido poroso. El hidrógeno gaseoso es inyectado en el ánodo, mientras que el oxígeno en el cátodo (Figura 2) (Ferriday y Middleton, 2022).



**Figura 2.** Celda de combustible alcalina.

**Fuente:** elaboración propia.

Como catalizadores se pueden usar diferentes materiales como óxidos metálicos o materiales nanoestructurados como nanopartículas de platino soportado en carbón. En la CCA, el portador de carga es el ion  $OH^-$ , las reacciones en los electrodos son las siguientes:





Una característica importante de la CCA en la que se debe prestar atención es que el electrolito de hidróxido de potasio contribuye a la formación de carbonatos ( $CO_2 + 2OH^+ \rightarrow (CO_3)^{-2} + H_2O$ ) los cuales forman precipitados que impiden el funcionamiento correcto de la celda. Para eliminar este problema se debe eliminar el dióxido de carbono del aire que se inyecta en el cátodo (Ferriday y Middleton, 2021).

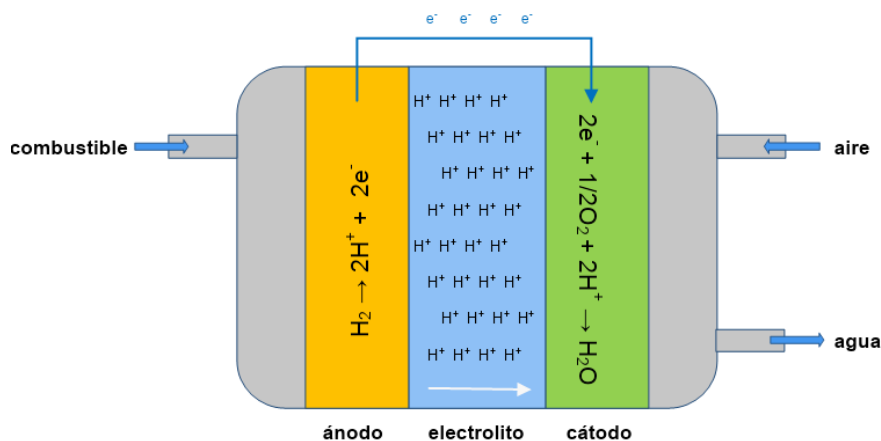
Esta celda utiliza metales de transición como electrodos, su temperatura de operación es de 50 a 260 °C y alcanzan eficiencias de 50 a 60%. Entre las principales ventajas de esta celda está la amplia gama de catalizadores que se pueden usar, bajas temperaturas de operación y altas eficiencias. Como principal desventaja son los requerimientos de hidrógeno y oxígeno con alta pureza, esto se ve reflejado en el tamaño y costo del sistema (Breeze, 2019; Ferriday y Middleton, 2021).

La celda de combustible alcalina fue una de las primeras celdas modernas. Una de sus primeras aplicaciones fue durante la Segunda Guerra Mundial para suministrar energía a los submarinos de la Marina Real y años después para suministrar energía y agua potable a la nave espacial Apollo y Shuttle Orbiter. Su aplicación terrestre se ha visto limitada por su sensibilidad al  $CO_2$ , sus altos costos y corta vida útil (2600-5000 horas), aunque ya se han propuesto para su uso en vehículos (tractores, camiones y taxis) (Breeze, 2019; Ferriday y Middleton, 2021, 2022).

## **2.2 Celda de Combustible de Ácido Fosfórico (CCAF)**

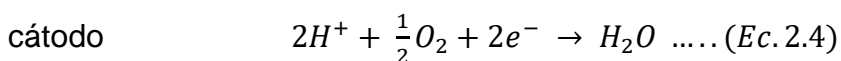
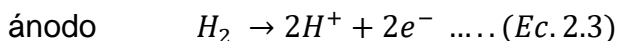
Este dispositivo usa ácido fosfórico puro ( $H_3PO_4$ ) como electrolito, el cual está soportado en una matriz de carburo de silicio manteniéndose en el interior de los

poros mediante acción capilar. Debido al estado líquido del electrolito, se debe tener cuidado para controlar su evaporación o migración para que la celda pueda operar correctamente. El portador de carga en este tipo de celdas es el ion  $H^+$  y opera generalmente entre 150 y 220 °C; sus electrodos son de materiales compuestos a base de platino o de papel carbón poroso recubierto con una capa fina de platino o una aleación de platino. Como combustible utiliza hidrogeno y como oxidante el oxígeno del aire. Su eficiencia es de 40 a 50%. La CCAF funciona normalmente a presión atmosférica, aunque es posible operar a mayores presiones para incrementar su eficiencia (Fuller y Gallagher, 2008; Oka, 2009).



**Figura 3.** Celda de combustible de ácido fosfórico.

**Fuente:** elaboración propia.



El hidrógeno es disociado en el ánodo (Figura 3), produciéndose iones  $H^+$  y liberando electrones (Ec. 2.3). Estos electrones fluyen mediante el circuito externo hasta el cátodo y reaccionan con las moléculas de oxígeno presente en el aire

produciéndose iones  $O^{2-}$ . Los iones  $H^+$  viajan a través del electrolito y reaccionan con los iones de oxígeno para formar agua la cual debe ser eliminada eficazmente para evitar que entre en contacto con el electrolito (Campanari y Guandalini, 2020; Lindorfer y col., 2020).

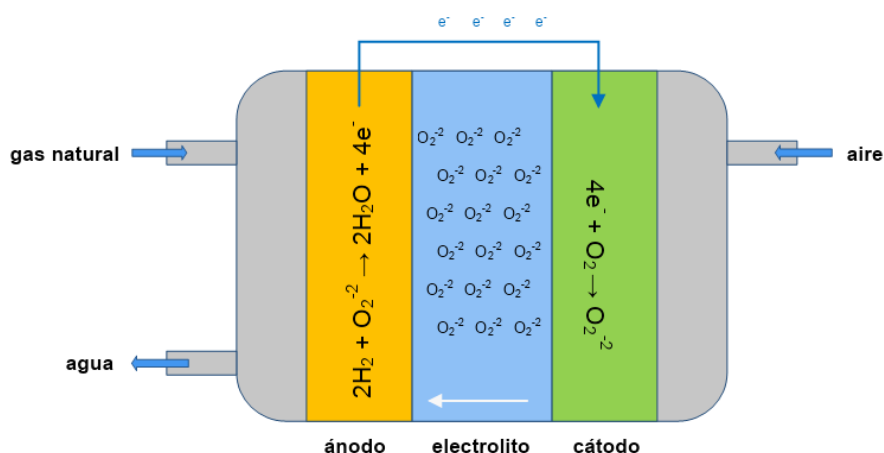
La celda de ácido fosfórico requiere de calentarse hasta su temperatura de operación antes de ser usada, posteriormente la reacción exotérmica mantiene la temperatura requerida. Entre sus ventajas está su menor sensibilidad al  $CO$ , temperaturas de operación bajas y que el calor residual se puede usar en aplicaciones de cogeneración comercial e industrial. Como principales desventajas son el uso de catalizadores costosos (platino) y que el ácido fosfórico es altamente corrosivo por lo que la construcción de la celda requiere de materiales costosos. Además, se debe tener especial cuidado en la temperatura de operación de la celda ya que a temperaturas superiores a  $200\text{ }^{\circ}C$  el electrolito comienza a descomponerse incrementando su reactividad, principalmente con los componentes de carbono de la celda (Campanari y Guandalini, 2020; Fuller y Gallagher, 2008).

Las CCAF están comercialmente disponibles y sus aplicaciones son muy variadas. Se han usado principalmente para suministrar electricidad, agua caliente y calefacción en hospitales, centros comerciales, oficinas y como respaldo de energía. Las capacidades han alcanzado hasta 400 kW y una vida útil de hasta 40 mil horas, lo que proporciona un gran potencial operativo (Bhosale y col., 2022; Lindorfer y col., 2020).

### **2.3 Celda de Combustible de Óxido Sólido (CCOS)**

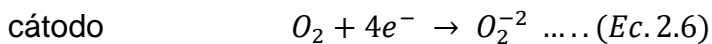
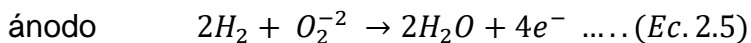
Esta celda de combustible tiene un electrolito sólido generalmente formado por zirconio estabilizado con itria. Este proceso es posible sólo a altas temperaturas por lo que la operación de esta celda es de  $500$  a  $1000\text{ }^{\circ}C$ . El electrolito sólido tiene

espesores de entre 10 y 100  $\mu\text{m}$ . En una CCOS, el hidrógeno se oxida en el ánodo y se producen iones  $\text{H}^+$ , liberándose electrones (Ec. 2.5). En este electrodo también se forma vapor de agua debido a la reacción entre los iones de hidrógeno y oxígeno (Figura 4). El oxígeno se reduce en el cátodo con los electrones liberados en el ánodo, produciéndose iones  $\text{O}^{2-}$  los cuales viajan a través del electrolito hasta el ánodo (Skabelund y Milcarek, 2022; Sundén, 2019).



**Figura 4.** Celda de combustible de óxido sólido.

**Fuente:** elaboración propia.



Debido a que opera a altas temperaturas, esta celda no requiere de catalizadores costosos para facilitar la disociación del hidrógeno y oxígeno molecular en los electrodos. Por lo general, el ánodo es de cobalto metálico en una matriz cerámica ( $\text{CO-ZrO}_2$ ) o níquel metálico también en una matriz cerámica ( $\text{Ni-ZrO}_2$ ). Por otro lado, el cátodo debe tener una alta conductividad eléctrica (por ejemplo, magnetita de lantano dopada con estroncio), debe ser poroso y soportar las altas temperaturas de operación. Este dispositivo es capaz de utilizar hidrógeno o gas natural como

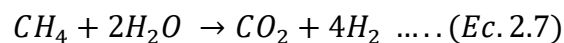
combustible. La eficiencia del CCOS es de 50 a 60% y el conductor de carga es el ion  $O^{-2}$  (Campanari y Guandalini, 2020; Lindorfer y col., 2020).

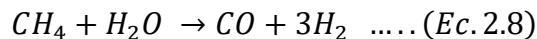
Entre las principales ventajas de esta celda están sus diferentes formas (tubular, plana o monolítica), costos de construcción menores respecto a otras celdas y que el calor residual puede ser utilizado en ciclos de cogeneración, además su funcionamiento es silencioso. Como desventajas están sus altos costos de producción, la expansión térmica de los materiales debido a las altas temperaturas de operación y la corrosión de los materiales metálicos. Por otro lado, si se usa gas natural como combustible, el sulfuro de hidrógeno presente en este gas entra en contacto con el ánodo provocando el envenenamiento de este electrodo, esto disminuye la eficiencia y durabilidad de la celda (Breeze, 2019; Sundén, 2019).

Las aplicaciones de estas celdas son variadas, pero destaca la generación de energía estacionaria en ciclos combinados y sistemas portátiles. Además, esta celda puede ser integrada con turbinas de gas. Las capacidades de estas unidades van de 20 W hasta varios megavatios (MW). Su vida útil es de hasta 60 mil horas (Sørensen y Spazzafumo, 2018; Sundén, 2019).

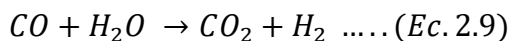
#### **2.4 Celda de Combustible de Carbonatos Fundidos (CCCF)**

Esta celda es alimentada con gas natural el cual es sometido a un proceso de reformado con vapor de agua en el interior de la celda para producir hidrógeno. Este proceso es posible debido a la temperatura de operación de la celda (600-700 °C). Durante el proceso de reformado se puede producir hidrógeno y dióxido de carbono (Ec. 2.7) o hidrógeno y monóxido de carbono (Ec. 2.8):

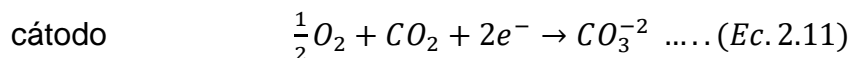
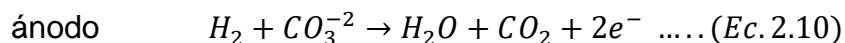




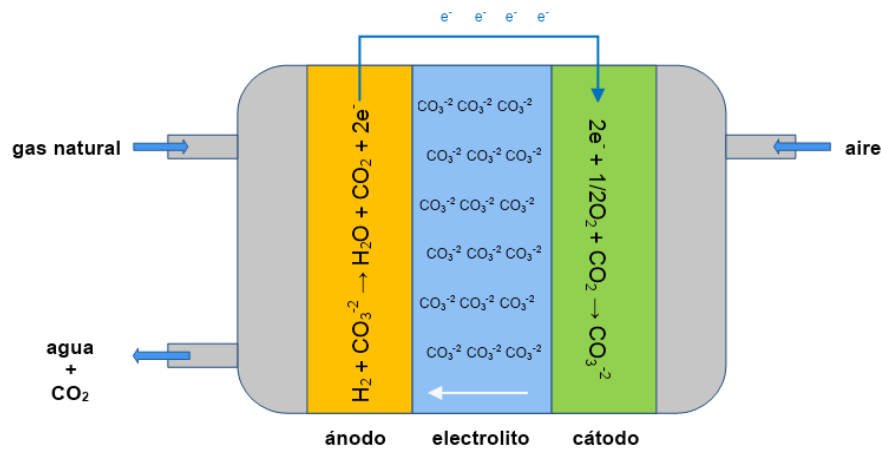
El monóxido de carbono producido (Ec. 2.9) reacciona con vapor de agua produciendo más hidrógeno y dióxido de carbono:



El electrolito de las CCCF es una mezcla de carbonatos de metales alcalinos los cuales son sólidos a temperatura ambiente. Estos carbonatos se funden por la alta temperatura de operación de esta celda y son capaces de conducir iones carbonato ( $CO_3^{-2}$ ). Estos iones son contenidos en una matriz sólida, normalmente de óxido de litio o aluminio. Este tipo de dispositivos son los más complejos de todas las celdas. Las reacciones son las siguientes:



En el ánodo (Ec. 2.10) el hidrógeno reacciona con el ion carbonato para formar agua y dióxido de carbono, liberando dos electrones (Figura 5). En el cátodo reacciona el oxígeno y dióxido de carbono presentes en el aire inyectado con los electrones liberados en el ánodo y que llegan a través del circuito externo (Ec. 2.11). Como producto se obtiene el ion carbonato ( $CO_3^{-2}$ ), el cual se difundirá en el electrolito hasta llegar al ánodo (Breeze, 2019; Sundén, 2019).



**Figura 5.** Celda de combustible de carbonatos fundidos.

**Fuente:** elaboración propia.

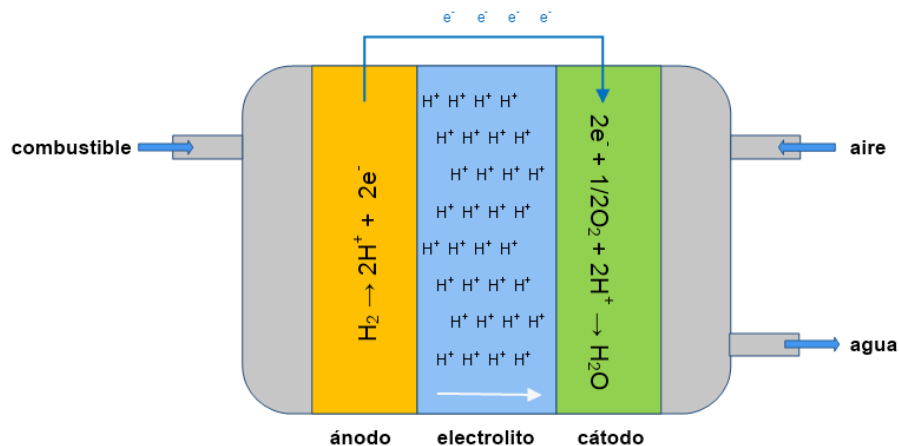
Esta celda no requiere de catalizadores costosos como el platino debido a su alta temperatura de operación por lo que se utilizan electrodos de níquel. El ánodo es generalmente de una aleación de níquel metálico y el cátodo de óxido de níquel. (Nguyen, 1988; Sundén, 2019).

La eficiencia de esta celda es menor al 60%, pero puede incrementarse si el calor generado se utiliza en un ciclo combinado, alcanzando eficiencias del 85%. Sus principales ventajas son que puede usar diferentes combustibles como hidrógeno y gas natural y que el calor residual se puede usar para producir más electricidad mediante una turbina de gas o microturbina, lo que aumenta la eficiencia total del sistema. Además, el vapor de agua a alta temperatura producido puede ser destinado a procesos industriales. Sus desventajas son el electrolito corrosivo, lo que implica el uso de materiales resistentes, tiempos de arranque lentos y las altas temperaturas son un problema para la estabilidad térmica de los materiales. Para sus diferentes aplicaciones, principalmente estacionarias, industriales y marinas, se

han desarrollado celdas de 100 kW-2.8 MW (Breeze, 2019; Campanari y Guandalini, 2020).

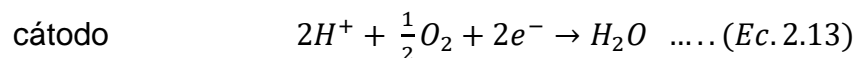
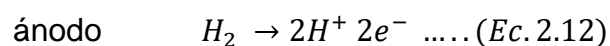
## 2.5 Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (CCMIP)

El electrolito de esta celda es generalmente de sulfonato de poliperfluorocarbono (50-175  $\mu\text{m}$  de espesor) que en su estado normal no es conductora, pero si se satura con agua los grupos ácidos adheridos a la membrana liberan protones, lo que permite conducir iones de hidrógeno. En una CCMIP (Figura 6) el hidrógeno se oxida en el ánodo liberando electrones (Ec. 2.12) los cuales fluyen hasta el cátodo mediante el circuito externo. Una vez en el cátodo, los electrones reaccionan con el oxígeno del aire y luego con el ion  $\text{H}^+$  producidos en el ánodo para formar agua (Ec. 2.13) (Fan y col., 2021; Lindorfer y col., 2020).



**Figura 6.** Celda de combustible de intercambio de protones.

**Fuente:** elaboración propia.





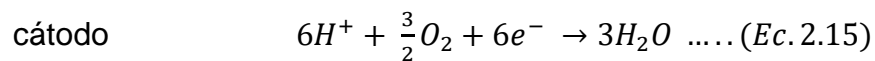
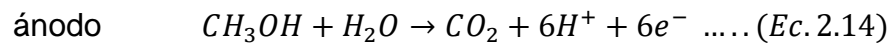
La temperatura de operación es menor a 100 °C y alcanza eficiencias de 40-50%. La eficiencia de esta celda podría mejorarse si la temperatura de operación se incrementa, esto también reduciría la sensibilidad al envenenamiento del catalizador. Los electrodos de la CCMIP son de platino soportado en carbón; utiliza hidrógeno como combustible y el oxígeno lo obtiene del aire. Es importante eliminar el CO y compuestos de azufre de las corrientes de gases para evitar el envenenamiento del catalizador. Entre sus ventajas está la resistencia de su electrolito sólido, baja temperatura de operación y arranque rápido, además no tiene componentes corrosivos. Como principales desventajas está el uso de catalizadores costosos (platino) y sensibles al envenenamiento y que sólo usa hidrógeno como combustible (Breeze, 2019; Sundén, 2019).

Sus principales aplicaciones son para uso doméstico, comercial, estacionarias y de transporte. Su bajo peso y eficiencia relativamente alta la convierte en una opción para la industria automotriz. Su vida útil varía entre 10 y 40 mil horas, mientras que sus capacidades son de 10 kW-1 MW. Estas celdas de combustible son usadas por la NASA para en su programa espacial Gemini (Campanari y Guandalini, 2020; Fan y col., 2021).

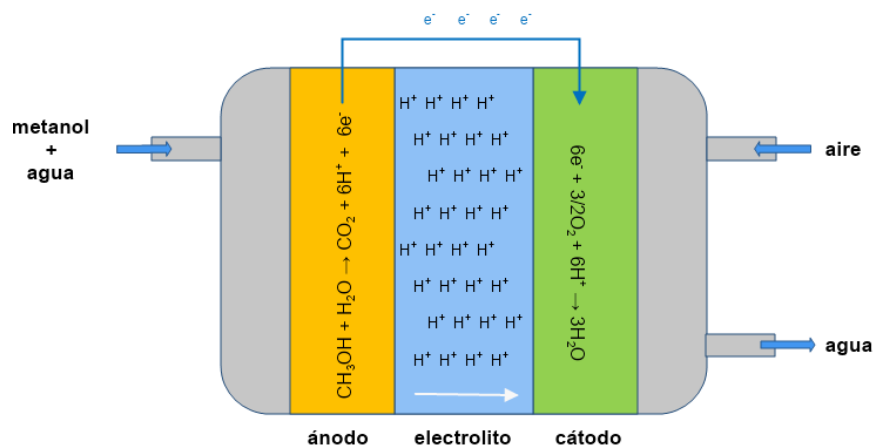
## **2.6 Celdas de Combustible de Metanol Directo (CCMD)**

La celda de combustible de metanol directo tiene como electrolito una membrana de polímero ácido similar a la membrana de las celdas de intercambio de protones. El ánodo está hecho de una mezcla de platino-rutenio y el cátodo es de platino, ambos soportados en carbono. Este dispositivo tiene cierta similitud con la celda de intercambio de protones, la diferencia radica en los reactivos usados; la CCMIP usa hidrógeno mientras que la CCMD, como su nombre lo indica, usa metanol líquido como combustible el cual es mezclado con agua para reaccionar directamente en

el electrodo. En el interior de la CCMD se lleva a cabo el reformado del metanol con agua produciéndose hidrógeno el cual se oxida en el ánodo liberando electrones. Los electrones liberados reaccionan en el cátodo con el oxígeno y lo ionizan. Los iones  $O^{2-}$  reaccionan con los iones  $H^+$  que viajan a través del electrolito y llegan al cátodo formando agua. Las reacciones son las siguientes:



En la Figura 7 se presenta el esquema de esta celda y las reacciones en el ánodo y cátodo (Breeze, 2019; Li y Faghri, 2013; Zuo y col., 2022).



**Figura 7.** Celda de combustible de metanol directo.

**Fuente:** elaboración propia.

La temperatura de operación de esta celda es generalmente menor a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  con eficiencias relativamente bajas (25 a 40 %), pero en ciclos combinados de calor y potencia, la eficiencia total del sistema puede alcanzar el 80 %. Sus principales ventajas son el uso de combustibles líquidos lo que se traduce en menores costos,

temperaturas de operación bajas y alta densidad de corriente eléctrica. Como desventajas está la liberación de CO<sub>2</sub> durante su operación y bajas eficiencias. Además, si el metanol atraviesa el electrolito y llega al cátodo, el catalizador de platino se contamina con el CO y CO<sub>2</sub> producidos por la oxidación del combustible (Campanari y Guandalini, 2020; Sundén, 2019).

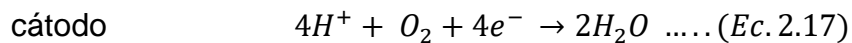
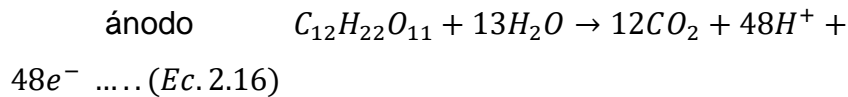
Las aplicaciones de esta celda son principalmente portátiles como computadoras y teléfonos móviles, aunque también ha llamado la atención de la industria automotriz. Su vida útil es relativamente baja (mil horas) con capacidades menores a 200 W (Breeze, 2019; Campanari y Guandalini, 2020).

## **2.7 Celda de Combustible Microbiana (CCM)**

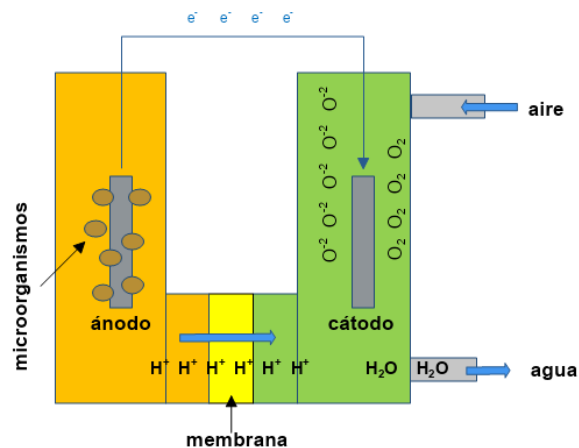
Una celda de combustible microbiana convierte la energía bioquímica en energía eléctrica mediante una reacción catalítica llevada a cabo por microorganismos (bacterias o levaduras). Las reacciones que ocurren en este tipo de celda son diferentes a una celda de combustible clásica debido al tipo de combustible que usa (compuesto orgánico). Los componentes básicos de una CCM son: a) cámara anódica anaeróbica, b) cámara catódica aeróbica, c) membrana de intercambio de protones y d) electrodos.

Las cámaras anódicas y catódicas son generalmente de vidrio o de polímero como el acrílico. El ánodo y cátodo de esta celda están hechos de materiales compuestos a base de carbono y metales como acero inoxidable, níquel, aluminio y cobre. El sistema de intercambio de protones es generalmente de Nafion (politetrafluoroetileno sulfonado), aunque ya se han probado puentes salinos, Ultrex, polietileno, alcohol polivinílico y materiales cerámicos (Agrahari y col., 2023).

En la cámara anaeróbica los microorganismos liberan electrones los cuales viajan del ánodo al cátodo a través de un circuito externo. Las reacciones de oxidación y reducción son las siguientes:



Los microorganismos que liberan electrones en el espacio extracelular durante el metabolismo son conocidos como exoelectrógenos. Algunos biocatalizadores (exoelectrógenos) utilizados en las CCM son *Geobacter sulfurreducens*, *Shewanella putrefaciens*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Rhodoferrax ferrireducens* y levaduras (Agrahari y col., 2023; Kouam Ida y Mandal, 2023; Santoro y col., 2017).



**Figura 8.** Celda de combustible microbiana.

**Fuente:** elaboración propia.

En esta celda el portador de carga es el ion H<sup>+</sup> (Figura 8) y sus temperaturas de operación son de 15 a 60 °C. Como reactivos usan oxígeno y biomasa, entre ellas, aguas residuales, lo que contribuye a disminuir el impacto ambiental de estos

residuos. Respecto a la eficiencia, es difícil establecer un rango ya que esta depende de la arquitectura de la celda, sustratos y microorganismos utilizados. Como ventajas está la amplia variedad de biomasa que puede ser usada como combustible y como principales desventajas es la baja eficiencia, variaciones de voltaje y densidad de corriente producidos por los cambios de pH, temperatura y flujo de combustible. Las principales aplicaciones son el tratamiento de aguas residuales y producción de energía eléctrica. Además, se han propuesto para aplicaciones móviles, aunque falta mucho para alcanzar este objetivo (Kouam Ida y Mandal, 2023; Meylani y col., 2023; Santoro y col., 2017).

## **Conclusiones**

Las políticas energéticas actuales deben modificarse para alcanzar una compatibilidad entre el consumo energético y la preservación del medio ambiente. Lo anterior es posible si se sustituyen o combinan las tecnologías convencionales de producción de energía con tecnologías sustentables. Una opción para alcanzar un sistema energético sostenible es el uso de celdas de combustible las cuales tienen capacidad de suministrar energía eléctrica a diferentes escalas.

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos capaces de proveer energía eléctrica de manera continua en tanto se suministre combustible y un agente oxidante. Sus aplicaciones dependen de diferentes variables como la temperatura de operación, tipo de combustible, electrolito y electrodos. Actualmente se usan en medios de transporte, industria automotriz, dispositivos portátiles y aplicaciones residenciales.

## **Referencias**

Agrahari, R., Agarwal, P., & Rani, R. (2023). Microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and bioelectricity generation. In C. M. Hussain, A. Kushwaha, R. N. Bharagava and L. Goswami (Ed.), *Bio-Based Materials and Waste for Energy Generation and Resource Management*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91149-8.00012-0>. Fecha de consulta: 18 de mayo de 2023.

Bhosale, A. C., Suseendiran, S. R., Ramya, R., Choudhury, S. R., & Rengaswamy, R. (2022). Phosphoric Acid Fuel Cells. In T. M. Letcher (Ed.), *Comprehensive Renewable Energy*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00006-6>. Fecha de consulta: 13 de enero de 2023.

Breeze, P. (2017). An Introduction to Fuel Cells. In P. Breeze (Ed.), *Fuel Cells*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101039-6.00001-7>. Fecha de consulta: 6 de febrero de 2023.

Breeze, P. (2019). Fuel Cells. In P. Breeze (Ed.), *Power Generation Technologies*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102631-1.00007-9>. Fecha de consulta: 9 de diciembre de 2022.

Campanari, S., & Guandalini, G. (2020). Fuel cells: opportunities and challenges. In A. Basile, G. Centi, M. De Falco y G. Iaquaniello (Ed.), *Studies in Surface Science and Catalysis*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64337-7.00018-5>. Fecha de consulta: 4 de enero de 2023.

Fan, L., Tu, Z., & Chan, S. H. (2021). Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review. *Energy Reports*. 7: 8421–8446. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.08.003>

Ferriday, T. B., & Middleton, P. H. (2021). Alkaline fuel cell technology - A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 46: 18489–18510.  
<https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.02.203>

Ferriday, T. B., & Middleton, P. H. (2022). Alkaline Fuel Cells, Theory and Applications. In T. M. Letcher (Ed.), *Comprehensive Renewable Energy*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00080-7> . Fecha de consulta: 25 de enero de 2023.

Fuller, T. F., & Gallagher, K. G. (2008). Phosphoric acid fuel cells. In M. Gasik (Ed.), *Materials for Fuel Cells*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1533/9781845694838.209>. Fecha de consulta: 20 de enero de 2023.

Kouam Ida, T., & Mandal, B. (2023). Microbial fuel cell design, application and performance: A review. *Materials Today: Proceedings*. 76: 88–94.  
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.10.131>

Li, X., & Faghri, A. (2013). Review and advances of direct methanol fuel cells (DMFCs) part I: Design, fabrication, and testing with high concentration methanol solutions. *Journal of Power Sources*. 226: 223–240  
<https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2012.10.061>

Lindorfer, J., Rosenfeld, D. C., & Böhm, H. (2020). Fuel Cells: Energy Conversion Technology. In T. M. Letcher (Ed.), *Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00023-2>. Fecha de consulta: 7 de enero de 2023.

Meylani, V., Surahman, E., Fudholi, A., Almalki, W. H., Ilyas, N., & Sayyed, R. Z. (2023). Biodiversity in microbial fuel cells: Review of a promising technology for wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 11: 109503. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.109503>

Nguyen, Q. M. (1988). Technological status of nickel oxide cathodes in molten carbonate fuel cells — A review. *Journal of Power Sources*. 24: 1–19. [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(88\)80085-5](https://doi.org/10.1016/0378-7753(88)80085-5)

Oka, Y. (2009). FUEL CELLS – PHOSPHORIC ACID FUEL CELLS | Cells and Stacks. In J. Garche (Ed.), *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00277-X>. Fecha de consulta: 9 de febrero de 2023.

Pramuanjaroenkij, A., & Kakaç, S. (2023). The fuel cell electric vehicles: The highlight review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 48: 9401–9425. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.11.103>

Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., & Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *Journal of Power Sources*. 356: 225–244. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2017.03.109>

Skabelund, B. B., & Milcarek, R. J. (2022). Review of thermal partial oxidation reforming with integrated solid oxide fuel cell power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 168: 112852. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112852>



Sørensen, B., & Spazzafumo, G. (2018). Fuel cell systems. In B. Sørensen (Ed.), *Hydrogen and Fuel Cells*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100708-2.00004-7>. Fecha de consulta: 9 de febrero de 2023.

Sundén, B. (2019). Fuel cell systems and applications. In B. Sundén (Ed.), *Hydrogen, Batteries and Fuel Cells*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816950-6.00011-7>. Fecha de consulta: 9 de febrero de 2023.

Zuo, Y., Sheng, W., Tao, W., & Li, Z. (2022). Direct methanol fuel cells system—A review of dual-role electrocatalysts for oxygen reduction and methanol oxidation. *Journal of Materials Science & Technology*. 114: 29–41. <https://doi.org/10.1016/J.JMST.2021.10.031>