



Programa de la asignatura:

Celdas de combustible

U1

Introducción a las celdas de combustible



DCSBA



ENERGIAS
RENOVABLES



Índice

Presentación de la unidad.....	3
Competencia específica	5
Propósitos	5
1.1. Clasificación de las celdas de combustible.....	6
1.1.1. Celdas de combustible de baja temperatura: PEMFC, DMFC, DEFC	8
1.1.2. Celdas de combustible de mediana temperatura: AFC, PAFC.....	10
1.1.3. Celdas de combustible de alta temperatura: MCFC, SOFC.....	11
1.2. Componentes de las celdas de combustible	15
1.2.1. Electrolitos	16
1.2.2. Electro-catalizadores	19
1.2.3. Placas monopolares, bipolares, y campo de flujos	20
1.3. Aplicaciones, ventajas y desventajas de las celdas de combustible.....	21
1.3.1. Principales ventajas y desventajas	22
1.3.2. Aplicaciones.....	24
Cierre de la unidad.....	25
Fuentes de consulta.....	26



Presentación de la unidad



Celdas de hidrógeno. Retomado de <http://www.inessman.com/>

En ingeniería en Energías Renovables (ER) se utilizan diferentes sistemas para generar, almacenar y convertir un tipo de energía a otro. Esta diversidad de elementos permite desarrollar de manera integral aplicaciones que sean autosuficientes y sostenibles desde el punto de vista energético. Por ejemplo, las celdas solares generan energía eléctrica a partir de la radiación solar que incide sobre ellas; los aerogeneradores o generadores eólicos aprovechan la energía cinética del viento para generar energía eléctrica; las baterías se utilizan para almacenar energía electrostática mediante reacciones electroquímicas. En cambio, una celda de combustible (CC) es un sistema de conversión de energía, y sirve para convertir la energía química de un combustible directamente en energía eléctrica. El combustible de las CC puede ser hidrógeno (H_2), gas metano (CH_4) o alcoholes como etanol (CH_3-CH_2-OH) o metanol (CH_3-OH), entre otros; el único requisito es que contengan hidrógeno, de manera análoga a los motores de combustión interna de los automóviles, cuyo combustible es la gasolina, no obstante, los



motores de los automóviles convierten la energía del combustible en energía mecánica.

Bajo este contexto, una CC no es precisamente un sistema de generación de energía eléctrica que pueda compararse con una celda solar o un aerogenerador, sino que utiliza, como su nombre lo indica, un combustible para producir electricidad a través de reacciones electroquímicas de oxidación y reducción. Los conceptos de oxidación y reducción se explican en subtemas subsecuentes.

Una reacción electroquímica involucra la transferencia de electrones tras efectuarse una reacción química. Esta reacción química la promueve un material denominado “electrocatalizador”; dicha acción consiste en la disociación de uno o más elementos o moléculas en sus constituyentes primarios: electrones y protones del elemento en cuestión. El movimiento de los electrones genera corrientes eléctricas que en principio pueden aprovecharse para producir energía eléctrica. En el diagrama de los bloques básicos de la energía se muestra: i) generación mediante fuentes primarias de energía, como la energía solar, eólica o geotérmica; ii) almacenamiento, y iii) reconversión de energía.

El diagrama de los bloques básicos de la energía muestra la secuencia y los medios para generar, almacenar y convertir la energía de diversas fuentes primarias de energía.



Competencia específica



Unidad 1

Diferenciar los tipos de celdas de combustible, así como sus principales ventajas y desventajas, para seleccionar el tipo de celda para una aplicación específica, considerando los componentes que las conforman mediante la interpretación de las curvas de polarización.

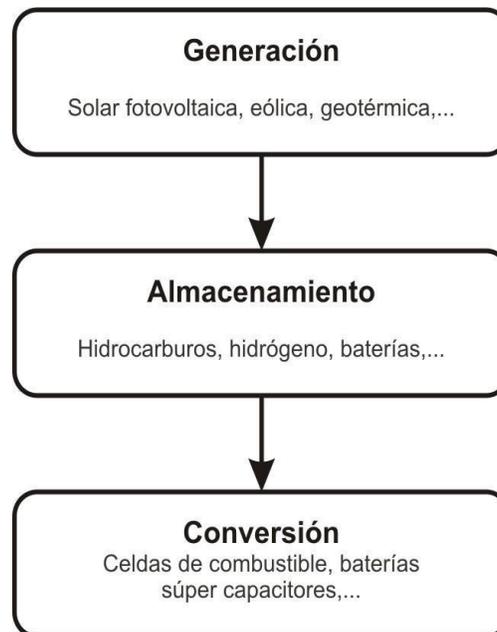
Propósitos

- 1** **Identificar** las principales aplicaciones de las celdas de combustible en cuanto a la temperatura de operación y a la potencia eléctrica que generan.
- 2** **Analizar** las ventajas y desventajas de las celdas de combustible.
- 3** **Interpretar** las curvas de polarización.



1.1. Clasificación de las celdas de combustible

Diagrama de los bloques básicos de la energía.



Actualmente existe una gran variedad de celdas de combustible (CC), y hay un tipo de celda de combustible para cada aplicación específica, ya sea para suministrar energía a un hogar, para alimentar eléctricamente a una industria de manufactura, o bien, para dispositivos portátiles como computadoras personales o teléfonos celulares. Aunque es posible clasificar a las CC utilizando diferentes criterios, como la temperatura de operación o la potencia eléctrica que generan, normalmente se diferencian entre sí según el tipo de electrolito que utilizan. A pesar de que en la siguiente sección se definirá cada componente de las celdas de combustible, es importante mencionar que un electrolito es una sustancia líquida o sólida que sirve para transportar iones, ya sean iones con carga negativa o positiva.

A continuación, se listan los diferentes tipos de celdas de combustible según su electrolito:

- Membrana polimérica: PEMFC
- Alcalina: AFC



- Ácido fosfórico: PAFC
- Carbonatos fundidos: MCFC
- Óxido sólido: SOFC

En las celdas de combustible de membrana polimérica, PEMFC (*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*), el electrolito es una membrana sólida de polímero de politetrafluoretileno (PTFE) o Teflón, con un grupo funcional sulfonado (SO_3^-); las celdas alcalinas, AFC (*Alkaline Fuel Cell*), utilizan un electrolito de hidróxido de potasio, KOH, es decir, una solución líquida alcalina; en las celdas de ácido fosfórico, PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*), el electrolito es una solución de ácido fosfórico, H_3PO_4 ; el electrolito de las celdas MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*) es de carbonatos fundidos, un compuesto de litio, carbono, oxígeno y potasio: Li_2CO_3 o K_2CO_3 ; y el electrolito de las celdas de combustible SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*) es de un material de óxido en fase sólida, un compuesto de itrio, circonio y oxígeno: $\text{ZrO}_2 / \text{Y}_2\text{O}_3$.

En la literatura se distinguen dos tipos más de celdas de combustible, aunque no tengan un electrolito diferente a los mencionados anteriormente, porque básicamente utilizan membranas de polímero sólido como electrolito; la diferencia radica en que éstas utilizan metanol o etanol diluidos como combustible, y se denominan DMFC (*Diluted Methanol Fuel Cell*) y DEFC (*Diluted Ethanol Fuel Cell*), respectivamente. Los detalles de cada tipo de celda se describen en el siguiente subtema. En la siguiente tabla se hace un resumen de los tipos de celdas de combustible.

Tabla. Tipos de CC según su electrolito; también se muestra el ion que transportan.

Celda de combustible	Electrolito	Ion que transporta
PEMFC, DMFC, DEFC	PTFE + SO_3^-	H^+
AFC	KOH	OH^-
PAFC	H_3PO_4	H^+
MCFC	$\text{Li}_2\text{CO}_3 /$ K_2CO_3	CO_3^{2-}
SOFC	$\text{ZrO}_2 / \text{Y}_2\text{O}_3$	O^{2-}

Cada tipo de celda de combustible puede generar una potencia eléctrica en un intervalo específico. El intervalo de potencia eléctrica que generan las celdas PEMFC oscila entre 1 W y 250 kW; en el caso de las celdas DMFC y DEFC, el intervalo es entre 1 W y 1 kW. Las celdas de electrolito alcalino, AFC, pueden generar hasta 10 kW de potencia eléctrica.



Por otra parte, las celdas de ácido fosfórico, PAFC, son capaces de generar una potencia eléctrica entre 10 kW y 10 MW. Finalmente, las celdas MCFC y SOFC tienen la capacidad de generar hasta 1 GW (Larminie & Dicks, 2003). En la siguiente tabla se presenta una clasificación de las celdas de combustible en función de su potencia eléctrica.

Tabla. Categoría de celdas de combustible en función de la potencia eléctrica. Datos extraídos de (Srinivasan, 2006).

Categoría	Potencia eléctrica (W)
Alta potencia	100 k* – 10 M*
Mediana potencia	5 k – 100 k
Baja potencia	100 – 5 k
Ultra baja potencia	1 – 100

* Múltiplos para denotar cantidades grandes: k = 1×10^3 ; M = 1×10^6 .

En cuanto a la temperatura de operación, las celdas de combustible pueden funcionar en un intervalo de temperatura. Algunas se consideran de baja temperatura, es decir, a una temperatura de operación inferior a 150°C. Tal es el caso de las celdas: PEMFC, DMFC y DEFC. Las celdas de combustible de mediana temperatura como la celda de electrolito de ácido fosfórico y las alcalinas, AFC y PAFC, pueden funcionar a una temperatura de hasta 200 y 220°C, respectivamente. Por otra parte, las celdas MCFC y SOFC se consideran de alta temperatura, puesto que éstas funcionan en un intervalo de hasta 650°C y 1000°C, respectivamente.

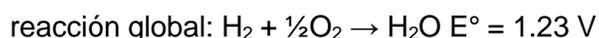
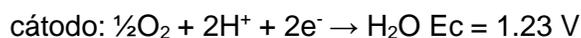
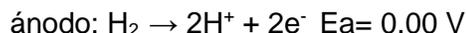
1.1.1. Celdas de combustible de baja temperatura: PEMFC, DMFC, DEFC

Las celdas de combustible cuyo electrolito es de membrana de polimérica, como las celdas tipo PEMFC, DMFC y DEFC, básicamente presentan las mismas características de funcionamiento, a excepción de que el combustible de las PEMFC es en estado gaseoso, *i.e.*, hidrógeno molecular (H_2), por tal razón, a este tipo de celdas también se les conoce como “celdas de hidrógeno”, mientras que el combustible de las DMFC y DEFC es en fase líquida. La temperatura de funcionamiento de las celdas de electrolito de membrana

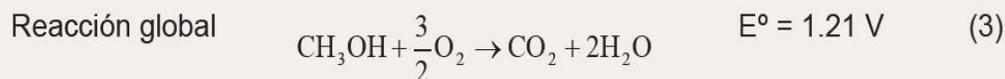
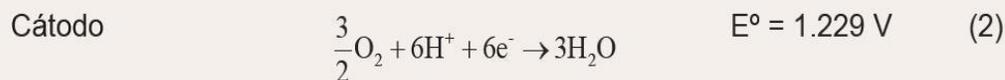


polimérica es en el intervalo de 25 a 100°C, lo cual puede ser una ventaja o desventaja, según la perspectiva del usuario. La restricción de la temperatura la impone el electrolito, es decir, la membrana, que, al estar fabricada de un polímero o plástico, a una temperatura superior a 100°C, la estructura de éste se deteriora, es decir, pierde su capacidad para transportar los iones, y el funcionamiento global de la celda de combustible se degrada paulatinamente. El electro-catalizador (EC) de este tipo de celdas normalmente es platino puro o aleaciones de platino, como platino-rutenio, etc. En cada lado de la celda, es decir, en cada electrodo, se genera de manera espontánea durante la reacción de oxidación o reducción, un potencial eléctrico asociado a cada reacción: en la zona del ánodo, se genera un potencial eléctrico anódico, E_a ; en el cátodo, un potencial eléctrico catódico, E_c . La diferencia en magnitud que existe entre estos potenciales eléctricos permite generar el movimiento de los electrones, debido al campo eléctrico que se produce entre ambos electrodos.

Las reacciones involucradas en las celdas PEMFC son:



Las reacciones involucradas en las celdas DMFC son:



En el ánodo se produce el proceso de oxidación o pérdida de electrones, mientras que en el cátodo se sucede el proceso de reducción o ganancia de electrones (Hooger G, 2003; y Srinivasan A., 2008), con la formación de subproductos a través de una reacción exotérmica.

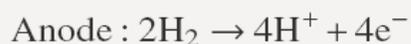


1.1.2. Celdas de combustible de mediana temperatura: AFC, PAFC

El electrolito de las celdas de combustible AFC y PAFC es en fase líquida. En el caso de las AFC, el electrolito es una solución de hidróxido de potasio, KOH, mientras que el electrolito de las PAFC es de una solución de ácido fosfórico, H₃PO₄. Originalmente, se estudiaron diversos materiales con potencial de ser utilizados como electrolito en las celdas de combustible AFC. Algunos materiales que se estudiaron son el carbonato de sodio y carbonato de potasio, sin embargo, tras descubrir al hidróxido de potasio, se descartó el uso de los carbonatos, ya que el KOH presentaba las mismas características con la ventaja adicional de ser más económico. La primera aplicación de este tipo de celdas fue en la misión lunar “Apolo”, del siglo pasado, en la cual se empleó una AFC como fuente de energía eléctrica para diversos dispositivos, y el agua que producía la celda también fue aprovechada para el consumo de los tripulantes. La temperatura alcanzó 260°C durante su operación. Una característica importante de las celdas AFC es su bajo costo, pues de entre los reactivos químicos disponibles comercialmente, el hidróxido de potasio es de los más económicos. Por otra parte, los electrodos, en particular el cátodo, se fabrica de metales no preciosos o materiales exóticos; por esta razón los electrodos son especialmente baratos respecto a las otras celdas de combustible (Larminie & Dicks, 2003; Srinivasan A., 2008).

Las celdas de ácido fosfórico funcionan de una manera similar a las de electrolito de membrana polimérica. Las celdas de combustible de ácido fosfórico utilizan un electrolito conductor de protones. De hecho, las reacciones electroquímicas son las mismas, la única diferencia es el medio por donde se transportan los protones; en este caso, se transportan a través de una solución de ácido fosfórico.

Las reacciones electroquímicas involucradas en una celda de combustible de electrolito de ácido fosfórico (León, 2008), son:





1.1.3. Celdas de combustible de alta temperatura: MCFC, SOFC

MCFC

El electrolito de las celdas de carbonato fundido es una mezcla binaria de carbonatos de litio o potasio, o litio y sodio, sobre una matriz de una aleación de litio, aluminio y oxígeno: LiAlO_2 . A la temperatura de $600 - 700^\circ\text{C}$, tales carbonatos adquieren una gran capacidad para conducir iones de carbonato: CO_3^{2-} . El combustible de las celdas MCFC puede ser hidrógeno puro o gas metano, un hidrocarburo de fórmula CH_4 , o monóxido de carbono. Como oxidante, se puede emplear oxígeno puro o aire, además de dióxido de carbono. El uso de dióxido de carbono es importante, ya que de este compuesto se obtienen los iones que se transportan a través del electrolito de manera análoga al transporte de los protones de hidrógeno a través del electrolito en las celdas PEMFC, PAFC, DMFC y DEFC. En el ánodo se suministra el combustible, el cual se oxida, es decir, se liberan dos electrones por cada molécula diatómica de hidrógeno, y los electrones se conducen hacia el cátodo. En el cátodo se introduce oxígeno y dióxido de carbono, y en el electrocatalizador la molécula de CO_2 se reduce, es decir, gana electrones provenientes del ánodo para formar iones CO_3^{2-} , mismos que atraviesan el electrolito hasta llegar al ánodo, donde se recombinan con el combustible para formar agua y dióxido de carbono. Una práctica común al utilizar este tipo de celdas es recircular el CO_2 que se genera en el ánodo directamente al cátodo. En la siguiente figura se muestra un diagrama esquemático de una celda MCFC. También se muestran las reacciones electroquímicas que se llevan a cabo en cada electrodo.

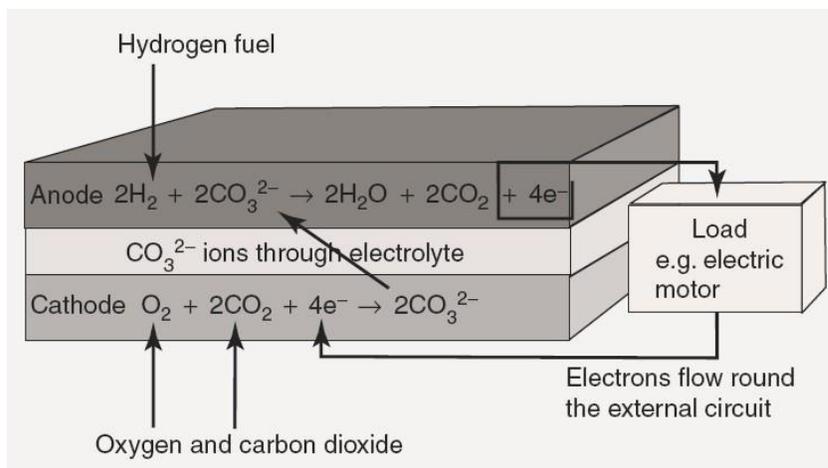
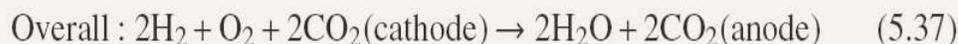
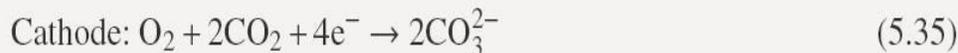


Diagrama simplificado de una celda de combustible MCFC

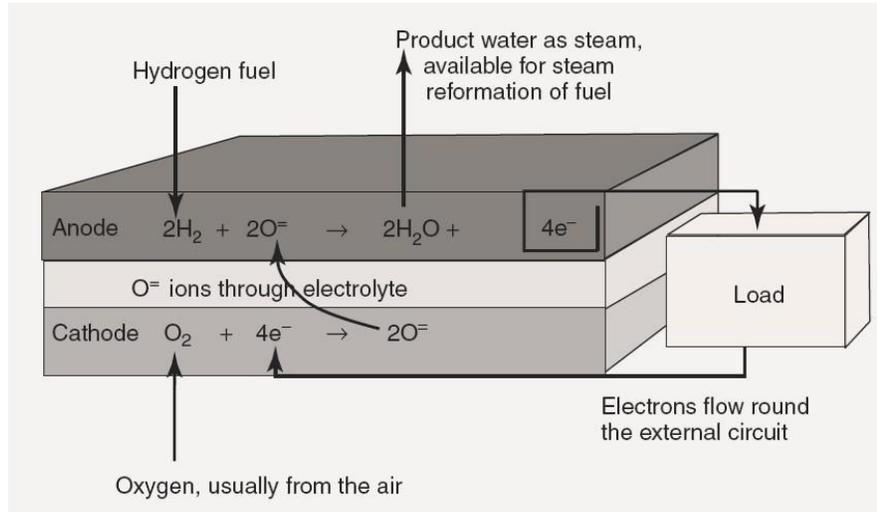


Las reacciones electroquímicas involucradas en una celda de combustible de electrolito de carbonatos fundidos son:



SOFC

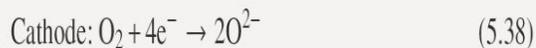
Las celdas de electrolito de óxido sólido son dispositivos completamente de estado sólido. El electrolito es un óxido cerámico conductor de iones, típicamente se fabrica de dióxido de circonio (ZrO_2), y se adiciona una pequeña cantidad de óxido de itria (Y_2O_3) para obtener una estructura estable. Este tipo de celdas funcionan a alta temperatura, entre 800 y 1000°C. Al ser de alta temperatura, este tipo de celdas de combustible no necesita metales preciosos para llevar a cabo las reacciones electroquímicas, como las celdas de baja temperatura, PEMFC, DMFC, etc., ya que la energía térmica de la celda provoca que las reacciones ocurran a una menor temperatura. El combustible de las celdas SOFC puede ser hidrógeno puro, gas metano, o bien, monóxido de carbono, como en las celdas MCFC. El oxidante puede ser oxígeno puro o aire. Por el ánodo se suministra el combustible, hidrógeno o gas metano, mientras que por el cátodo se suministra oxígeno o aire. En el ánodo el combustible se oxida, es decir, pierde electrones; éstos se transfieren hacia el cátodo por un circuito externo, y al llegar al cátodo se combinan con el oxidante, oxígeno o aire, en un proceso denominado reducción. Es decir, hay una ganancia de electrones, dando lugar al ion O^- , los cuales se transportan a través del electrolito. De manera simultánea, en el ánodo el combustible reacciona con los iones O^- para formar agua, además de la liberación de los electrones. El proceso completo de oxidación y reducción que se lleva a cabo en una celda de electrolito de óxido sólido se presenta en la siguiente figura.



Diagrama

simplificado de una celda de combustible SOFC.

Las reacciones electroquímicas involucradas en una celda de combustible de electrolito de óxido sólido son:



Curva de polarización

Para entender el comportamiento eléctrico de una celda de combustible se emplean figuras de mérito. Una figura de mérito es un parámetro o gráfica que permite distinguir entre diferentes dispositivos similares entre sí. En el área de las celdas de combustible, las figuras de mérito son las curvas de polarización. Una curva de polarización es una gráfica del potencial eléctrico (E) en función de la densidad de corriente eléctrica (i), es decir, una curva $E - i$. Realmente, el término E , es la diferencia entre el potencial eléctrico del cátodo y del ánodo; esto es, $E = E_c - E_a$, aunque suele expresarse como $E = E_c$, ya que E_a generalmente es cero.

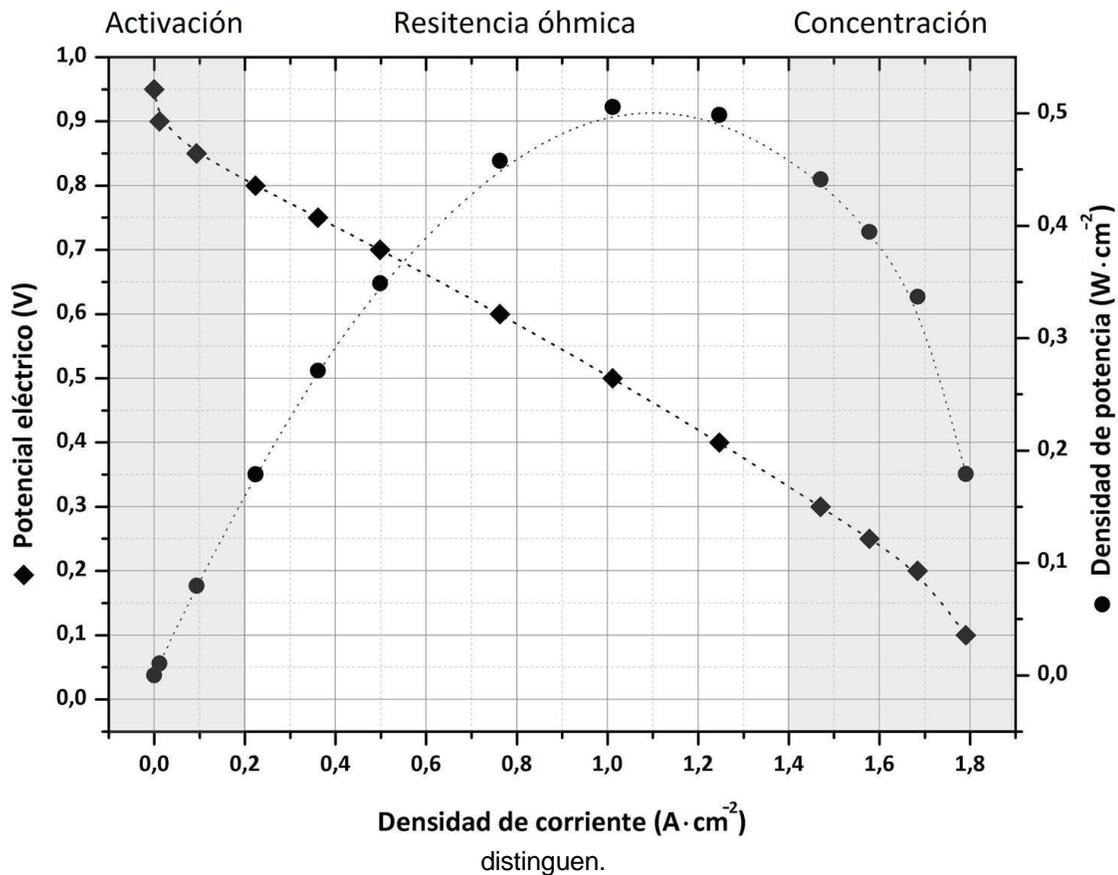
Otra figura de mérito es la gráfica de la densidad de potencia eléctrica (p) en función de la densidad de corriente eléctrica, es decir, una curva $p - i$. Ambas gráficas sirven para representar el comportamiento eléctrico de la CC. En la Figura 1.4 se presenta la curva de



polarización típica de una celda de combustible. En una curva de este tipo se distinguen tres zonas (Larminie & Dicks, 2003 y Srinivasan A., 2008):

- 1) Zona de activación, asociada a la actividad del electro-catalizador;
- 2) Zona óhmica, asociada a la resistencia eléctrica intrínseca de los diferentes materiales; y
- 3) Zona de concentración, que se relaciona con la dificultad para transportar a los reactivos hacia el interior de la celda, debido a un cambio de concentración.

Curva de polarización de una celda de combustible; se observan las principales zonas que la



Para conducir corriente eléctrica, es deseable utilizar materiales altamente conductores de electricidad, tal es el caso de la mayoría de los metales. Esto repercute de manera directa en la región óhmica de la curva de polarización, pues entre mayor conductor de electricidad, la caída de la curva en esta zona es menor. Las figuras de mérito también sirven para comparar diferentes sistemas similares entre sí. Por ejemplo, en las cámaras fotográficas digitales, la resolución se expresa en megapíxeles (millones de píxeles). Ésta es una figura de mérito, ya que permite diferenciar cuál cámara tiene mayor resolución,



además, es independiente del tipo de cámara y de la marca; es un criterio global y objetivo para hacer comparaciones. Las curvas $E - i$, y $p - i$ sirven, entonces, para determinar si una celda de combustible funciona de una manera más eficiente respecto a otra, sin importar el tipo de celda de combustible que se trate, y permite comparar el comportamiento eléctrico de diferentes celdas.

A partir de estas dos figuras de mérito puede obtenerse información relevante acerca del funcionamiento eléctrico de una CC. Un parámetro importante es el potencial eléctrico de circuito abierto (E_{ocv}), el valor máximo del potencial eléctrico de las celdas.

1.2. Componentes de las celdas de combustible

Una celda de combustible se integra por diversos elementos pasivos que se interconectan entre sí con una finalidad específica. Algunos elementos sirven para transportar fluidos como gases, sobre una superficie, y otros se utilizan para conducir cargas eléctricas, tanto positivas o negativas; algunos aíslan eléctricamente diferentes componentes, y otros más previenen fugas.

El esquema básico de una celda de combustible consiste en cuatro elementos cuya disposición física es simétrica. El elemento central se denomina “electrolito”, el cual tiene la función de transportar iones de un lugar a otro. Los iones pueden ser negativos o positivos, su carga y característica depende del tipo de CC. En cada extremo del “electrolito” se encuentran los “electrodos”, denominados ánodo y cátodo. El ánodo se asocia a una terminal eléctrica negativa, mientras que el cátodo, a una positiva. Los electrodos, a su vez, están conformados por un material electro-catalizador, y tienen la función de propiciar las reacciones electroquímicas. Además, el electro-catalizador se dispersa o soporta sobre carbono. Para mejorar la distribución de los gases sobre la superficie del electro-catalizador, se utiliza un material denominado “difusor”, el cual, como su nombre lo indica, difunde los gases sobre un área específica de la CC. Una celda de combustible también contiene elementos adicionales como empaques y tornillos que sirven para sellar la celda y evitar fugas. En el siguiente subtema se explica de manera detallada cada componente que conforma a una celda de combustible.

En la siguiente figura se muestra un dibujo del corte transversal de una celda de combustible de membrana polimérica. Es importante recordar que en este tipo de celda el electrolito es la membrana polimérica; también se observan sus diferentes elementos: placa monopolar, difusor, electrodos: cátodo y ánodo. El resto de las celdas tiene una configuración similar a la mostrada en la figura del diagrama esquemático de una celda de



combustible, con ligeros cambios en cuanto al tipo de materiales y disposición de los elementos, pero siempre ordenados de manera simétrica.

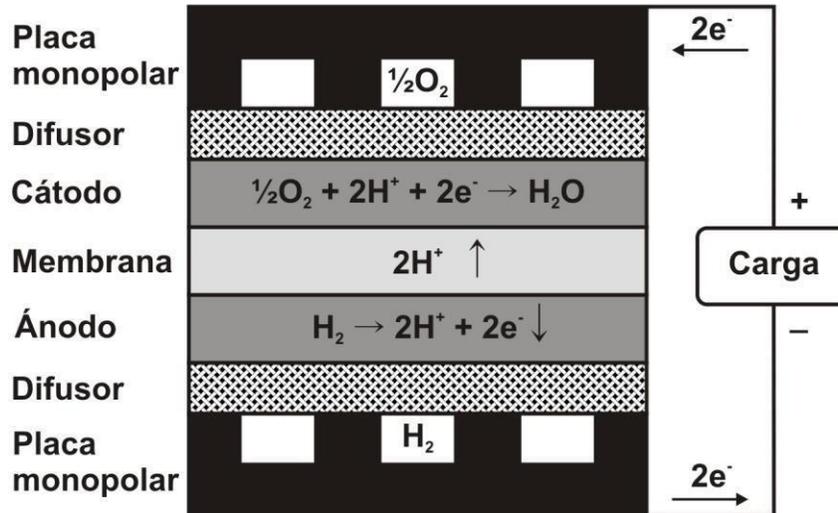


Diagrama esquemático de una celda de combustible de membrana polimérica, PEMFC.

1.2.1. Electrolitos

Un electrolito es una sustancia sólida o líquida que conduce iones través de su estructura, ya sean iones positivos o negativos. A la capacidad para transportar los iones se le conoce como conductividad iónica, la cual se denota por la letra griega minúscula *kappa*, κ ; sus unidades son *Siemens* por centímetro (S/cm). En la tabla se presentan los diferentes tipos de celdas de combustible, el material del electrolito, así como el ion que transporta cada uno de ellos.

Tabla de los tipos de CC según su electrolito; también se muestra el ion que transporta.

Celda de combustible	Electrolito	Ion que transporta
PEMFC DEMF, DEFC	PTFE + SO_3^-	H^+
AFC	KOH	OH^-
PAFC	H_3PO_4	H^+



MCFC	$\text{Li}_2\text{CO}_3 / \text{K}_2\text{CO}_3$	CO_3^{2-}
SOFC	$\text{ZrO}_2 / \text{Y}_2\text{O}_3$	O^-

Los principales requisitos de los electrolitos se listan a continuación:

- Alta conductividad iónica
- Estabilidad química y mecánica
- Impermeable a los gases o líquidos (según el tipo de combustible)

Electrolito sólido: membrana polimérica

La membrana de las celdas de combustible es un compuesto de ácido perfluorosulfónico (*perfluorosulfonic acid*, PFSA) y se utiliza como electrolito o ionómero. La membrana debe exhibir una alta conductividad de protones, debe ser impermeable al combustible y oxidante. Debe exhibir una buena estabilidad química y mecánica en el ambiente de la CC (por ejemplo, a un potencial de hidrógeno, $\text{PH} = 4$), y debe ser capaz de transportar agua (Sammes, 2006). Las propiedades antes mencionadas tienen una relación directa con el grado de hidratación de la membrana. El intercambio de protones requiere de condiciones específicas de hidratación de la membrana, restricción que establece la temperatura máxima de operación de una CC (Hooger, 2003). El contenido de agua de la membrana usualmente se expresa mediante: i) el cociente de la masa de agua -en gramos- y la masa de polímero, o ii) como el cociente del número de moléculas de agua por grupo funcional de ácido sulfónico ($-\text{SO}_3^-$) presentes en el polímero: $\lambda = \text{N}(\text{H}_2\text{O}) / \text{N}(\text{SO}_3^-)$. Un valor de contenido de agua $\lambda = 22$ implica que la hidratación se ha realizado utilizando agua líquida, mientras que un valor de contenido de agua $\lambda = 14$, implica que la hidratación se ha realizado utilizando vapor de agua, lo que corresponde a una conductividad iónica de 0.1 y 0.06 S/cm, respectivamente. La conductividad iónica se representa mediante la siguiente ecuación; y es una función del grado de hidratación y de la temperatura (Jiao K., & Li X., 2011).

Ecuación

$$\kappa = (0.00514 \lambda - 0.0033) \exp[1268(1/303 - 1/T)]$$

Debido a que es necesario que la membrana contenga agua, es importante conocer los mecanismos que involucran la transferencia de agua y que promueven su deshidratación. Algunos de ellos son:

- 1) En el cátodo se genera agua a una tasa proporcional a la generación de corriente eléctrica
- 2) Otro fenómeno que permite el movimiento del agua dentro de la CC es el arrastre



- electro-osmótico; este fenómeno es en dirección del ánodo hacia el cátodo
- 3) La difusión de agua a través de la membrana originada por gradientes de concentración; este fenómeno puede representarse matemáticamente mediante la ley de Fick; finalmente
 - 4) Un fenómeno de transporte de agua es el debido a gradientes de presión entre el ánodo y el cátodo, también denominado arrastre. Para membranas delgadas, la retro-difusión del agua del cátodo hacia al ánodo es un mecanismo suficiente para contrarrestar la deshidratación por arrastre electro-osmótico, fenómeno que sucede en la dirección opuesta (Sammes, 2006).

Otras ventajas de reducir el espesor de la membrana son: la disminución de la resistencia iónica, reducción del costo y una mejor hidratación; sin embargo, presentan vulnerabilidad al cruce de los reactivos, como ocurre con las celdas de metanol diluido, DMFC (Suddhastawa, 2007; y Hooger, 2003). En la actualidad existe una gran variedad de fabricantes de membranas de polímero sólido para PEMFC. A continuación, se enlistan algunos fabricantes de membranas poliméricas para ser empleados como electrolitos en celdas de combustible PEMFC, DMFC, DEFC:

DuPont (Nafion®)

Asahi Glass (Flemion®)

Asahi Chemical (Aciplex®)

Dow Chemical - Gore Associates (GoreSelect®)

La membrana denominada Nafion® la fábrica la compañía DuPont. Es la más utilizada y comercialmente está disponible en diferentes espesores y valores de conductividad iónica. Esta membrana es un co-polímero de teflón, PTFE, y éter-vinil, un polímero conductor de protones con grupos funcionales de SO_2F . Después de un tratamiento químico con una solución alcalina, seguido de otro tratamiento con una solución ácida, el polímero adquiere la propiedad para conducir protones, debido a la presencia de grupos funcionales SO_3 en su estructura (Hooger, 2003). El grupo funcional SO_3H brinda un carácter fuertemente ácido para facilitar el transporte de protones. La capacidad para transportar cationes se determina por el peso equivalente, EW, el cual se expresa como el cociente de los pesos moleculares del polímero y del grupo funcional SO_3 , esto es, $\text{EW} = W_{\text{PFSA}} / W_{\text{SO}_3}$. El intervalo del parámetro EW de las membranas comerciales es entre 800 y 1500, sin embargo, es deseable que el valor de EW sea lo más bajo posible, con la finalidad de aumentar conductividad iónica (Rajendran, 2005).



Electrolito líquido: KOH, H₃PO₄

El electrolito de ácido fosfórico es el único ácido inorgánico que presenta una estabilidad térmica, química, y electroquímica, además de exhibir una relativamente alta temperatura de volatilidad (150°C). Una característica importante es su tolerancia al dióxido de carbono, CO₂, presente en el combustible y oxidante en comparación con las celdas de electrolito de solución alcalina. El ácido fosfórico es incoloro, viscoso e higroscópico, es decir, que absorbe agua. En las PAFC, el ácido es contenido por efecto de capilaridad (éste forma un ángulo de contacto > 90°) dentro de los poros de una matriz de carburo de silicio (SiC), unidas, a su vez, a una pequeña cantidad de PTFE. En los inicios del desarrollo de esta tecnología, en la década de los 80, se utilizaba ácido fosfórico puro, cuyo punto de congelación es de 42°C, de tal forma que para evitar que se congele, la celda se calienta a una temperatura superior a la temperatura de congelación. Aun cuando la temperatura de volatilidad es relativamente alta, cuando una celda PAFC se mantiene a alta temperatura durante largos periodos de tiempo, una cierta cantidad de electrolito se pierde; esto hace necesario reemplazar el electrolito durante la operación de la celda, o garantizar desde un inicio que la reserva de electrolito en la matriz es suficiente para la cantidad de energía requerida por el periodo de tiempo planeado. La matriz de SiC es de 0.1 a 0.2 mm de espesor, y contiene partículas de alrededor 1µm. El espesor de la matriz es lo suficientemente delgado y con la rigidez mecánica necesaria para prevenir el cruce de combustible u oxidante a través del electrolito. La principal desventaja es que la matriz de SiC no soporta una presión superior a 200 mbar (Larminie & Dicks, 2003; y Srinivasan A., 2008).

1.2.2. Electro-catalizadores

Cada elemento de una celda de combustible repercute en el funcionamiento de la misma, sin embargo, los electro-catalizadores tienen una función primordial, ya que éstos son los encargados de promover las reacciones electroquímicas. El electro-catalizador más utilizado es el platino, debido a que promueve las reacciones electrodinámicas aun cuando la temperatura es baja, como la temperatura ambiente, 25°C. Este es un aspecto de suma importancia, ya que evita el uso de energía adicional para que una celda de combustible funcione correctamente, y esto se refleja en la eficiencia de esta. En la siguiente tabla se presentan los diferentes materiales con que se fabrica el electro-catalizador empleado en cada celda de combustible. Normalmente, el EC dispersa o soporta sobre otro material, como carbono, para aumentar el área que éste cubre; entre mayor sea el área que ocupe el EC, habrá más sitios para que el combustible y oxidante reaccionen, lo cual permite una mayor producción de energía eléctrica.



Celda de combustible	Electro-catalizador anódico	Electro-catalizador catódico
PEMFC, DEMF, DEFC	Pt/C, Pt-Ru/C	Pt/C
AFC	Ni	Ag
PAFC	Pt/C	Pt/C
MCFC	Ni	NiO
SOFC	Ni-ZrO ₂	LaMnO ₃ /Sr

Tabla. Electro-catalizador anódico y catódico de las celdas de combustible.

Pt: platino; Ru: rutenio; C: carbono; Ni: Níquel; Zr: circonio; Ag: plata; O: Oxígeno; La: lantano; Mn: Manganeso; Sr: estroncio.

El término para denotar la cantidad de EC se denomina “carga”, y representa cuánta masa de EC se distribuye sobre un área específica. Por consiguiente, tiene unidades de masa sobre área, mg/cm²; típicamente, la carga del EC está entre 0.3 y 1 mg/cm² (Srinivasan A., 2008). Otro parámetro que se utiliza para denotar la cantidad de EC presente en un electrodo es el área específica; éste tiene unidades de área por unidad de masa, es decir, mg/cm², y es el inverso de la carga del catalizador.

1.2.3. Placas monopolares, bipolares, y campo de flujos

La distribución del combustible y oxidante, ya sea en fase gaseosa o líquida, se realiza a través de los campos de flujo. Éstos, a su vez, están embebidos en el cuerpo de las placas monopolares (o, en su caso, bipolares). Un campo de flujo consta de una serie de canales que sirven para transportar los fluidos. De la forma en que se disponen los canales sobre la superficie de la placa monopolar, se distinguen diferentes configuraciones de campos de flujo: a) paralelo o de canales rectos, b) serpentín sencillo, c) serpentín múltiple, d) tipo rejilla, etc. Cada configuración se usa exclusivamente para un tipo de combustible o aplicación en función de la potencia eléctrica que se desee. En la figura siguiente se presentan los diferentes campos de flujos para la distribución de los reactivos sobre la superficie del electro-catalizador en una celda de combustible.

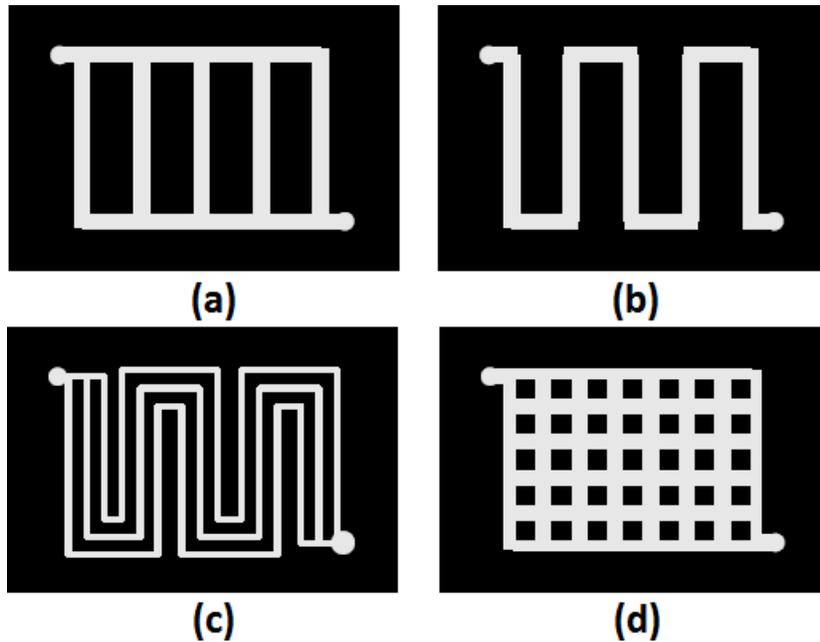


Figura de configuraciones de los campos de flujos: a) paralelo o canales rectos; b) serpentín sencillo; c) serpentín múltiple; d) tipo rejilla. Los canales se representan mediante las líneas blancas; el resto es parte de la placa monopolar. Fuente: tomado de Larminie & Dicks, (2003).

1.3. Aplicaciones, ventajas y desventajas de las celdas de combustible

En esta sección se presentan las principales aplicaciones de las celdas de combustible, así como las principales ventajas y desventajas de esta prometedora tecnología. Países como Japón, Alemania, Estados Unidos de América y Canadá, entre otros, ocupan los primeros lugares a nivel mundial en cuanto al desarrollo tecnológico, en la instalación y uso práctico de las celdas de combustible. Las instituciones nacionales que realizan trabajos de investigación en el área de celdas de combustible son: la Universidad Nacional Autónoma de México, específicamente el Instituto de Energías Renovables; el Centro de Investigación y Estudios Avanzados, Cinvestav, la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, ambos del Instituto Politécnico Nacional; y el Instituto de Investigaciones Eléctricas. Además, existe una empresa mexicana de reciente creación dedicada a la implementación de celdas de combustible como sistemas de respaldo de energía eléctrica o UPS (sistema de potencia interrumpible) para redes de comunicación en zonas remotas (<http://www.microm.com.mx>), entre otras aplicaciones.



En México, se realiza investigación básica y aplicada encaminada al desarrollo de nuevos materiales con potencial de ser utilizados en las celdas de combustible. Se realiza trabajo experimental y teórico para sintetizar nuevos electro-catalizadores que permitan disminuir el coste del ensamble membrana-electrodos. Otro tema de investigación y desarrollo (I+D) es referente a las placas mono y bipolares. Se analizan diferentes materiales que sean ligeros y eléctricamente conductores, se estudian aleaciones de distintos metales en diferentes composiciones, así como materiales recubiertos con capas metálicas superficiales, lo que ayudaría a lograr una mayor aceptación de la tecnología por parte de la sociedad, al ofrecer precios competitivos para solucionar algunos de los problemas de abastecimiento de energía eléctrica.

1.3.1. Principales ventajas y desventajas

La energía renovable consiste en generar energía eléctrica a partir de recursos existentes en la naturaleza, como la radiación solar, el calor del interior de la Tierra, el viento, etc. Estos recursos se consideran ilimitados, al menos durante un largo periodo de tiempo, sin embargo, estos recursos se encuentran localizados, es decir, algunos de ellos están distribuidos geográficamente de una manera específica. Estos recursos, tras ser aprovechados para generar energía eléctrica, se renuevan de manera natural y regresan a su estado original, de modo que pueden aprovecharse nuevamente.

Ventajas

La energía renovable, en donde se incluyen las celdas de combustible, tiene dos metas fundamentales, ambas de igual importancia. En primer lugar, la ingeniería en energía renovable tiene la meta de lograr una independencia del sector energético ante los recursos no renovables como el petróleo y sus derivados, los cuales se utilizan para generar un gran porcentaje de la energía eléctrica que actualmente necesita en el país. Por otra parte, las ER tienen como una segunda meta contribuir a mitigar el cambio climático mediante la implementación de procesos alternativos para generar energía eléctrica de forma limpia, y al mismo tiempo, dicha implementación permitirá reducir o eliminar la emisión de gases de efecto invernadero. Ambas metas constituyen las principales ventajas de utilizar ER y celdas de combustible. De la misma manera, con la implementación de las celdas de combustible se pretende evitar usar materia prima que dañe o altere el medio ambiente.

De lograr las metas de las ER y celdas de combustible, se espera una mejor calidad de vida para la sociedad en general en cuanto a salud pública, disponibilidad de los recursos naturales para la generación de energía eléctrica sin comprometer al medio ambiente, y la



calidad de vida de las futuras generaciones.

En lugares remotos o comunidades marginadas, las celdas de combustible son una alternativa para la generación de energía eléctrica. Basta con suministrar combustible para obtener de manera eficiente energía eléctrica para un hogar o una pequeña comunidad. Es posible también aprovechar el agua caliente que la celda de combustible genera como sub-producto del proceso de generación de electricidad, para realizar labores domésticas y agrícolas. Otra ventaja de las celdas de combustible respecto a sistemas similares para generar energía eléctrica es que éstas funcionan de manera silenciosa, ya que no tienen partes móviles, y requieren de escaso mantenimiento. En el caso específico de las celdas de combustible de alta temperatura, MCFC y SOFC, éstas tienen la ventaja de prescindir de metales nobles como el platino, lo cual disminuye significativamente el costo de las celdas. Por el hecho de carecer de platino como electrocatalizador, este tipo de celdas son tolerantes a la presencia de contaminantes como el monóxido y dióxido de carbono (CO y CO_2), entre otros contaminantes presentes comúnmente en el combustible. A continuación, se presentan las desventajas de las CC.

Desventajas

Dentro de las principales desventajas destacan su relativo alto costo, ya que la inversión inicial es grande, y aún hay retos que vencer para promover su comercialización. Una celda de combustible se considera “limpia” siempre y cuando el combustible se extraiga a partir de fuentes de energía renovable, además que no se genere contaminación alguna durante el transporte, almacenamiento y uso del combustible. Este es el caso de la extracción del hidrógeno a partir del agua. Mediante diferentes procesos físicos, térmicos, electroquímicos, es posible separar el agua en sus constituyentes primarios: hidrógeno y oxígeno, elementos que se almacenan en forma de gas o líquido para su uso posterior en una CC. Sin embargo, un gran porcentaje del hidrógeno que actualmente se utiliza proviene de fuentes de energía no renovable, como gas metano, o indirectamente, de la energía nuclear; esto constituye la principal desventaja de la tecnología de CC, sin embargo, se espera que el escenario de la producción de hidrógeno se enfoque hacia fuentes de energía renovable, sin causar daños colaterales. Actualmente sólo el 4% del hidrógeno que se produce a nivel mundial proviene de fuentes de energía renovable (Srinivasan A., 2008). Otra desventaja de importancia es la contaminación del electrocatalizador y del electrolito. Durante el funcionamiento de la CC, el electrocatalizador es vulnerable a la presencia de CO y CO_2 , el cual se queda atrapado sobre la superficie del EC, y deja inactiva dicha superficie, lo que repercute directamente en el rendimiento de la celda, y el cual se degrada con el paso del tiempo. El CO y CO_2 pueden estar presentes en el ambiente o en el mismo combustible si no se emplean reactivos con la pureza adecuada, es decir, una pureza mayor a 99.99%. En el caso específico de las celdas MCFC y SOFC, al ser de alta temperatura, es posible realizar el proceso de reformado del



combustible para obtener hidrógeno; esto supone una ventaja, ya que el uso de hidrógeno de alta pureza resulta costoso.

1.3.2. Aplicaciones

Las celdas de combustible tienen un sin fin de aplicaciones, desde aplicaciones portátiles de baja potencia eléctrica como teléfonos celulares o computadoras personales, en aplicaciones de mediana potencia, por ejemplo, en automóviles que utilizan un motor de corriente eléctrica en lugar de gasolina. Las celdas de combustible también pueden implementarse en el hogar para satisfacer la demanda de energía eléctrica, además de proporcionar agua caliente. Otras aplicaciones incluyen sistemas de gran potencia como lo demanda la industria manufacturera, o bien, para generar la energía eléctrica para poblaciones marginadas. El uso de las celdas de combustible en el sector de transporte es un nicho de oportunidad, ya que permite resolver diferentes problemas asociados a este sector, como la contaminación del medio ambiente, y la necesidad de utilizar un combustible más eficiente que la gasolina o el gas metano. A nivel mundial, la industria automotriz ha comenzado a innovar sus líneas de producción para proponer el uso de automóviles que funcionan a base de celdas de combustible e hidrógeno como combustible. Estos prototipos funcionan como un automóvil convencional, con la ventaja de ser silenciosos, además de disminuir o eliminar su emisión de gases de efecto invernadero durante su utilización. En la siguiente tabla se muestran las diferentes aplicaciones de las celdas de combustible, en los diferentes sectores.

Aplicaciones de las celdas de combustible	
Dispositivos portátiles	Computadoras personales, teléfonos celulares, equipos de radiocomunicación, etc.
Estacionarias	Residenciales e industriales.
Sistema de transporte	Aéreo, terrestre y acuático: aviones, automóviles, autobuses, trenes, lanchas y barcos.

Tabla. Aplicaciones de las celdas de combustible. Fuente: tomado de EUR 20719 ES, (1999).



Cierre de la unidad

Has finalizado con el estudio de la Unidad 1, en la cual se presentaron los tipos de celdas de combustible, se te explicó la manera de utilizar e interpretar las curvas de potencia, y se finalizó con las ventajas y desventajas del uso de las celdas de combustible.

Ahora es momento de comenzar con el estudio de la Unidad 2. Adelante.



Fuentes de consulta



1. Otero de Becerra, J., *et al.* (2010). *Hidrógeno y pilas de combustible: estado actual y perspectiva inmediata*. Madrid: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.
2. EUR 20719 ES (1999). *La energía del hidrógeno y las pilas de combustible: una visión para nuestro futuro*.
3. Gottesfeld, S., Springer, T.E., & Sawodzinski, T.A. (1991). *Polymer electrolyte fuel cell model*. *Journal of the Electrochemical Society*. 138-8:2334-2342.
4. Hooger G. (2003). *Fuel cell technology handbook*. Boca Raton: CRC Press. Pp. Capítulo 4 y 5.
5. Jiao, K., & Li, X. (2011). Water transport in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(3), 221–291.
6. Kasik M. (2008). *Materials for fuel cells* Cambridge: CRC Press.
7. Larminie J., & Dicks A., (2003). *Fuel Cells Systems Explained*. Chichester: John Wiley & Sons.
8. León A. (2008). *Hydrogen Technology: Mobile and Portable Applications*. Berlín: Springer-Verlag.
9. Poggi Varaldo H. M., *et al.* (2009). *Tecnología Solar-Eólica-Hidrógeno-Pilas de combustible como fuentes de energía*.
10. Rajendran R.G., (2005). *MRS Bulletin*. USA: Materials Research Society.
11. Sammes N., (Ed.). (2006). *Fuel Cell technology: reaching toward commercialization*. London: Springer-Verlag.



12. Spiegel, C. (2008). *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB®*. London: Academic Press.
13. Srinivasan, S. (2006). *Fuel cells: From fundamentals to applications*. Nueva York: Springer.
14. Suddasthawa, B. (2007). *Recent Trends in Fuel Cells Science and Technology*. Nueva Delhi: Springer. Pp. 138-154.
15. Sundén, B., & Faghri M. (2005). *Transport Phenomena in Fuel Cells*. Boston: WITPress.