



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación del impacto del
uso de las celdas de
combustible en los sectores
eléctrico residencial y
transporte en México**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Sergio Guzmán Pérez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Rigel Gámez Leal



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado EVALUACION DEL IMPACTO DEL USO DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE EN LOS SECTORES ELECTRICO RESIDENCIAL Y TRANSPORTE EN MEXICO que presenté para obtener el título de INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

SERGIO GUZMAN PEREZ
Número de cuenta: 317113383

Agradecimientos.

A lo largo de mi vida académica he pasado por muchos obstáculos y situaciones que estoy seguro no hubiera logrado afrontar y superar sin el apoyo de muchas de las personas con las que he tenido el gusto de coincidir.

Me gustaría agradecer en primer lugar a mis padres Celia Pérez Martínez y Sergio Guzmán Velasco, quienes desde un inicio brindaron su vida, tiempo, apoyo, esfuerzo, trabajo, consejos, anécdotas y sobre todo su cariño para que el día de hoy fuera posible, no hay palabras que puedan describir lo importante que son para mí, pero de algo si estoy completamente seguro y es que fueron, son y serán mi mayor fortaleza para lograr mis objetivos, tengan en cuenta que todo lo que viene es por y para ustedes, llegó el momento de poder devolverles lo que han hecho por mi. Aunque sean pocas las veces que se los he dicho, pero MUCHAS GRACIAS POR TODO, LOS AMO.

A mi hermana Montserrat quién a pesar de ser menor que yo por 10 años y que quizá en este momento ignore cuan importante es para mi su existir, agradecerle ser un motivo más para salir adelante y llenar mi vida de alegría con solo verte, espero el día que tu estés en este punto de la vida yo pueda estar felicitándote.

A mi abuela fallecida Martha Martínez a quien considero mi segunda madre, se que me está cuidando desde el cielo.

A mi familia en general, a quienes frecuento del diario y a quienes veo en días festivos o en alguna reunión familiar, primos, primas, sobrinos, tíos, tías, abuelos, en fin, a toda la familia, ya que con el simple hecho de saludarnos, felicitarnos, preguntar cómo estamos, cómo nos va nos permitimos interactuar y mantener esa unión que necesitamos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México quién me abrió sus puertas para formar parte de su historia desde mi ingreso al Colegio de Ciencias y Humanidades Naucalpan, quién a su vez me permitió vivir mis primeros 3 años como un puma más. A la par, me gustaría agradecer a la Facultad de Ingeniería por permitirme formarme como un profesional más en la ingeniería y ser mi casa por más de 5 años. Es un gran orgullo poder decir que soy de la UNAM.

Al Dr. Rigel Gámez Leal quién a lo largo de este tiempo tomó el papel de mi asesor de tesis, agradezco su tiempo brindado y apoyo durante la realización del presente trabajo y sobre todo su paciencia ante las intermitencias en el desarrollo del mismo.

Al profesorado en general, ya que sin sus conocimientos mi formación académica no hubiese sido posible, es digno de reconocer su esfuerzo y empeño que aplican en cada una de sus clases.

Agradecer también a cada una de las amistades que he formado a lo largo de la vida, a Juan Esteban, Luis Eduardo, Bryan Jesús, amigos de la infancia que a pesar que ya no frecuento fueron de gran apoyo. A Alberto Guadalupe Pérez, Carol Acosta, Gerardo Rosas, Sebastián Villalobos, Frida Jasso, Oscar Jair y demás amigos de la preparatoria, gracias por tan bella etapa. A mis colegas y próximos grandes ingenieros e ingenieras, Sergio Franco, Ana Laura Carreño, Yael Jasso, Daniela Maldonado, José Ángel Pérez, Edgar Rivera, Alfonso Camargo, Gerardo Flores, Fabricio Mireles, gracias por su gran apoyo durante este tiempo, sé que serán grandes profesionistas, fue un gusto compartir todo lo vivido.

A mis mascotas las cuales estuvieron conmigo en cada momento, viviendo mis desveladas, viviendo mis momentos tristes y felices, gracias por elegirme como su dueño. Sobre todo a mi perrito Goliat quién llegó a demostrarme lo fiel que puede ser un amigo peludo y llegó a salvarme en tiempos de pandemia, espero algún día volver a verte, te extraño mucho.

Finalmente agradecer a quienes no nombré pero que han coincidido conmigo en la vida sin importar en que momento, lugar o circunstancia, el simple hecho de coincidir con ustedes es un motivo de agradecimiento pues seguramente en algo positivo han influido en mi.

Índice

1. Introducción	3
1.1. Objetivo principal	4
1.2. Definición del problema	4
1.3. Hipótesis	4
1.4. Justificación	4
1.5. Alcance	5
2. Marco Teórico	6
2.1. Clasificación de las celdas de combustible	6
2.1.1. Membrana polimérica: PEMFC, DMFC, DEFC. Celdas de combustible de baja temperatura	6
2.1.2. Celda de combustible alcalina: AFC. Celda de combustible de mediana temperatura	7
2.1.3. Ácido fosfórico: PAFC. Celda de combustible de mediana temperatura	8
2.1.4. Celda de combustible de carbonatos fundidos: MCFC. Celdas de combustible de alta temperatura	9
2.1.5. Celda de combustible de óxido sólido: SOFC. Celdas de combustible de alta temperatura	10
2.2. Componentes de las celdas de combustible	11
2.2.1. Electrolitos	12
2.2.2. Electrolito sólido: membrana polimérica	12
2.2.3. Electrolito líquido: KOH , H_3PO_4	14
2.2.4. Electro-catalizadores	14
2.2.5. Placas monopolares, bipolares, y campo de flujos	14
2.3. Principio de operación de las celdas de combustible	15
2.4. Comparación de las diferentes tecnologías de las celdas de combustible	15
2.5. Características principales del sector energético en México. Uso de combustibles fósiles y de fuentes de energía renovables	16
2.5.1. Generación y Consumo de Energía Eléctrica	16
2.5.2. Matriz de energía primaria de México	16
2.5.3. Capacidad instalada y generación eléctrica	17
2.5.4. Intensidad de carbono	17
2.5.5. Proyecciones y planificación	17
3. Uso de las celdas de combustible en el sector energético	18
3.1. Aplicaciones principales en los sectores residenciales y transporte	18
3.1.1. Sector residencial	18
3.1.2. Sector de transporte	25
3.2. Aspectos generales técnicos de las celdas. Rendimiento y energía producida	28
3.3. Aspectos generales económicos de las celdas	29
4. Ventajas y desventajas principales en el uso de las celdas de combustible en el sector energético	33
4.1. Sector residencial	33
4.1.1. Ventajas	33
4.1.2. Desventajas	35
4.2. Sector transporte	37
4.2.1. Ventajas	37
4.2.2. Desventajas	39
4.3. Principales limitaciones	40
4.3.1. Alto costo del hidrógeno y de la tecnología	40
4.3.2. Infraestructura limitada para producción y distribución de hidrógeno	40
4.3.3. Desafíos técnicos y operativos	40
4.3.4. Dependencia de políticas y subsidios gubernamentales	41
5. Recomendaciones para la incorporación del uso de las celdas de combustible en el sector energético mexicano	42
5.1. En el sector residencial	42
5.2. Incorporación en el sector transporte	46

6. Conclusiones	50
7. Referencias	52
8. Referencias para figuras	55

1. Introducción

El uso de las celdas de combustible ha adquirido una creciente relevancia a nivel internacional en el marco de la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles. Estas tecnologías representan una alternativa innovadora para la generación de energía limpia y eficiente, tanto en el ámbito residencial como en el sector transporte, al contribuir a la reducción de emisiones contaminantes hacia el medio ambiente y a la diversificación de la matriz energética. En el caso de los hogares, diversos países han impulsado programas de implementación que buscan aprovechar el potencial de las celdas de combustible para producir electricidad y calor de manera simultánea. Japón constituye el referente más consolidado a través de su programa *Ene-Farm*, que ha permitido la instalación de cientos de miles de sistemas en viviendas. De igual manera, en Alemania y Corea del Sur se han promovido esquemas de integración de estas tecnologías en edificios y comunidades, con el fin de fortalecer la eficiencia energética y reducir la dependencia de fuentes convencionales.

En el sector transporte, las celdas de combustible se perfilan como una de las soluciones más prometedoras para avanzar hacia una movilidad sustentable. Países como Estados Unidos, Alemania, China y Japón han desarrollado flotas de automóviles, autobuses y camiones que son impulsados por hidrógeno, respaldadas por la construcción de redes de estaciones de recarga que permiten su operación a mayor escala. Estos avances reflejan no solo un esfuerzo tecnológico, sino también el resultado de políticas públicas y marcos regulatorios que han favorecido la investigación, la inversión y la comercialización. China, por ejemplo, ha priorizado la incorporación de autobuses urbanos de hidrógeno como parte de sus estrategias para disminuir la contaminación en grandes ciudades, mientras que Alemania y Japón se han consolidado como líderes en el establecimiento de infraestructura de abastecimiento y en la promoción de vehículos con celdas de combustible.

En contraste, el panorama en México se encuentra en una fase incipiente. En el ámbito residencial, las experiencias con celdas de combustible se limitan principalmente a proyectos piloto impulsados por instituciones académicas y de investigación, los cuales han permitido demostrar su viabilidad técnica, pero cuyo alcance comercial ha sido restringido por los altos costos, la falta de incentivos gubernamentales y la escasa infraestructura de hidrógeno. En el sector transporte, la situación es similar: no existe aún un mercado consolidado de vehículos a hidrógeno ni una red de estaciones de recarga, aunque se han desarrollado iniciativas de carácter experimental enfocadas principalmente en el transporte de carga y en la movilidad urbana sustentable.

De manera general, puede afirmarse que, mientras a nivel internacional las celdas de combustible avanzan de manera significativa gracias a políticas de apoyo y a la consolidación de marcos regulatorios, en México su desarrollo se encuentra en una etapa temprana, pero con un potencial considerable. El futuro de esta tecnología en el país dependerá de la creación de condiciones que favorezcan la inversión, la investigación aplicada y la integración de soluciones energéticas más limpias dentro de los planes de modernización nacional.

El presente trabajo se encuentra estructurado en cuatro capítulos/temas los cuales brindarán la información de la siguiente manera:

1. Tema 1. Marco teórico.

En este tema se aborda toda la información referente a las diferentes clasificaciones de las celdas de combustible, los componentes que integran una celda de combustible (estructura básica), el principio de operación por el cual rigen su funcionamiento así como la comparación de las celdas de combustible en sus diferentes tecnologías. Finalmente se analizan las características del sector energético en México tanto en fuentes de energía renovables como de combustibles fósiles.

2. Tema 2. Uso de las celdas de combustible en el sector energético.

Este tema se encuentra enfocado en el análisis de las aplicaciones principales de las celdas de combustible en los sectores residencial y transporte revisando los aspectos generales técnicos destacando el rendimiento y energía producida. Dentro de este mismo tema se realiza un análisis económico general de las celdas.

3. Tema 3. Ventajas y desventajas principales en el uso y/o aplicación de las celdas de combustible en el sector energético.

Este tema está enfocado en analizar las principales ventajas y desventajas que se tienen al aplicar las celdas en los sectores de análisis así como las limitaciones dentro de las propias aplicaciones.

4. Tema 4. Recomendaciones para la incorporación del uso de las celdas de combustible en el sector energético mexicano.

Finalmente, con base en el tema anterior, en este tema se hacen una serie de recomendaciones, pautas y lineamientos que se deben tomar en cuenta al considerar la utilización de las celdas de hidrógeno en el sector residencial así como en el sector transporte en nuestro país.

1.1. Objetivo principal

Evaluar el impacto que tendría el incremento del uso de las celdas de combustible en el sector eléctrico y de transporte de México en el marco de una transición energética necesaria y urgente.

1.2. Definición del problema

Desde hace más de doscientos años el progreso de la humanidad se ha financiado de combustibles fósiles que han permitido la producción de bienes y servicios, así como mejorar las condiciones de vida de la población. Sin embargo, el uso desmedido ha dañado ecosistemas y están poniendo en peligro al planeta entero. Los derivados de la producción y consumo de energía fósil se han convertido en la causa principal del calentamiento global y el cambio climático.

Lo anterior ha hecho impostergable una transición energética con tres vertientes principales: el aprovechamiento acelerado de las energías limpias, el remplazo del petróleo y el carbón por gas natural y un giro hacia un consumo de energía más racional y eficiente. Se han realizado diversos esfuerzos notables por incrementar paulatinamente la incorporación significativa del uso de las energías limpias y, con ello, desincentivar el uso de combustibles fósiles en todos los sectores de los sistemas energéticos.

México no es la excepción y por ello, a través de diversos organismos gubernamentales y académicos se está buscando la incorporación del uso de fuentes de energía no convencionales que permitan una transición energética más acelerada. Dentro del uso de las energías renovables como la solar, la eólica, la biomasa y la geotérmica, destaca el uso de las pilas de combustible en particular en el sector transporte y en el sector residencial principalmente.

En comunidades remotas o comunidades un tanto aisladas, estas celdas representan una alternativa promisoría para la generación de energía eléctrica. Sin embargo, actualmente representan una inversión inicial grande por lo que aún hay retos para promover su comercialización. Por otra parte, en aplicaciones de mediana potencia se pueden utilizar en automóviles que utilizan un motor de corriente eléctrica en lugar de gasolina por lo que su uso representa un nicho de oportunidad en el sector transporte.

Con base en lo anterior este trabajo pretende evaluar el impacto que se tiene en el uso de esta tecnología dentro del sector eléctrico en nuestro país, principalmente en el uso residencial, así como en el sector transporte, de manera que se esté en posibilidades de proponer alternativas que incentiven su uso en mayor escala para que con ello se logre un desarrollo más sostenible.

1.3. Hipótesis

La incorporación significativa del uso de las celdas de combustible en el sector eléctrico y en el sector transporte permitirá una mayor rapidez en la transición energética para desincentivar el uso de combustibles fósiles en nuestro país. Con ello será posible acercarse en forma acelerada al uso sostenible de nuestros recursos energéticos.

1.4. Justificación

El uso indiscriminado de recursos fósiles ante la creciente demanda en el sector energético ha propiciado un deterioro ambiental sin precedentes en nuestro planeta. Se hace impostergable la necesidad de buscar alternativas que promuevan un uso racional de los recursos energéticos, así como incrementar significativamente el uso de fuentes no convencionales de energía que sustituyan a las fuentes convencionales que causan más

impacto en el medio ambiente. En este tenor se sabe que el uso de celdas de combustible en los sectores eléctricos y de transporte podrán contribuir a lograr esta transición energética.

1.5. Alcance

El análisis del impacto que se tendría en la incorporación del uso de esta tecnología se realizará únicamente tanto en el sector eléctrico residencial como en el sector transporte de nuestro país. Lo anterior obedece a que es en estos sectores donde se vislumbra que el impacto sería significativamente más importante.

2. Marco Teórico

2.1. Clasificación de las celdas de combustible

Actualmente, existe una amplia variedad de celdas de combustible (CC), cada una diseñada para aplicaciones específicas, como el suministro de energía a hogares, la alimentación eléctrica de industrias manufactureras o la carga de dispositivos portátiles como computadoras personales y teléfonos móviles.[34]

Aunque es posible clasificar las celdas de combustible según diferentes criterios, como la temperatura de operación o la potencia eléctrica que generan, comúnmente se diferencian por el tipo de electrolito que emplean[34]. El electrolito, que puede ser líquido o sólido, es una sustancia encargada de transportar iones, ya sean de carga negativa o positiva. A continuación, se presentan los distintos tipos de celdas de combustible clasificados según el electrolito que emplean:

2.1.1. Membrana polimérica: PEMFC, DMFC, DEFC. Celdas de combustible de baja temperatura

En las celdas de combustible de membrana polimérica (PEMFC, por sus siglas en inglés: *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*) como se muestra en la **Figura 1**, el electrolito consiste en una membrana sólida de polímero de politetrafluoroetileno (PTFE), también conocido como Teflón, que incluye un grupo funcional sulfonato ($-SO_3^-$) el cual es clave para conducir protones y es la forma desprotonada del ácido sulfónico ($-SO_3H$). [34]

El politetrafluoroetileno (PTFE) es un polímero similar al polietileno, en el que los átomos de hidrógeno han sido sustituidos por átomos de flúor.[35]. Este material es prácticamente inerte, no reacciona con otras sustancias químicas excepto en situaciones muy especiales, debido a la protección de los átomos de flúor sobre la cadena carbonada. Además, es un excelente aislante eléctrico, sumamente flexible, no se altera por la acción de la luz y es capaz de soportar temperaturas desde $-270^\circ C$ hasta $300^\circ C$. Su cualidad más conocida es la antiadherencia. [35]

Las celdas de combustible con electrolito de membrana polimérica, como las de tipo PEMFC, DMFC (por sus siglas en inglés: *Direct Methanol Fuel Cell*) como se muestra en la **Figura 2** y DEFC (por sus siglas en inglés: *Direct Ethanol Fuel Cell*) como se muestra en la **Figura 3**, comparten características fundamentales de funcionamiento. Sin embargo, difieren en el estado del combustible utilizado: las celdas PEMFC emplean hidrógeno molecular (H_2) en estado gaseoso, lo que les ha valido el nombre de “celdas de hidrógeno”. En cambio, las celdas DMFC y DEFC utilizan combustibles en fase líquida. [34]

Las celdas de electrolito de membrana polimérica operan en un rango de temperatura de $25^\circ C$ hasta $100^\circ C$. A temperaturas superiores a $100^\circ C$, la estructura del electrolito se deteriora, perdiendo su capacidad para transportar iones, lo que provoca una degradación progresiva del rendimiento general de la celda de combustible.[34]

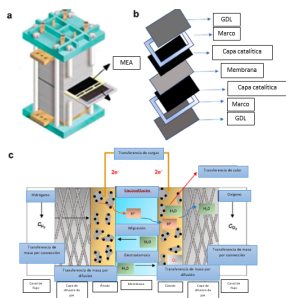


Figura 1: Celda de combustible PEMFC [a]

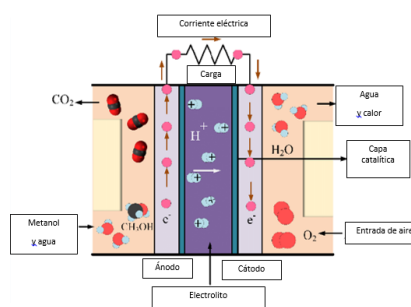


Figura 2: Celda de combustible DMFC [b]

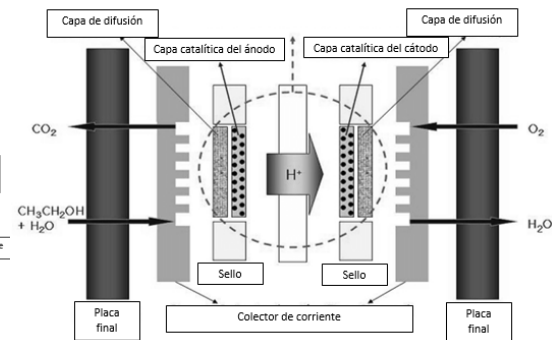


Figura 3: Celda de combustible DEFC [c]

Las reacciones involucradas en las celdas PEMFC son [34]:

Ánodo.



$$E_a = 0,00V \quad (2)$$

Cátodo.



$$E_c = 1,23V \quad (4)$$

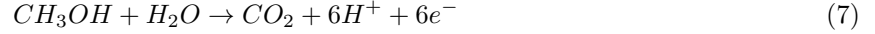
Reacción global.



$$E^o = 1,23V \quad (6)$$

Las reacciones involucradas en las celdas DMFC son:

Ánodo.



$$E_a = 0,019V \quad (8)$$

Cátodo.



$$E_c = 1,229V \quad (10)$$

Reacción global.



$$E^o = 1,21V \quad (12)$$

2.1.2. Celda de combustible alcalina: AFC. Celda de combustible de mediana temperatura

Inicialmente, se investigaron diversos materiales con potencial para ser utilizados como electrolito en las celdas de combustible AFC (por sus siglas en inglés: *Alkaline Fuel Cell*) como se muestra en la **Figura 4**, incluyendo el carbonato de sodio y el carbonato de potasio. Sin embargo, tras el descubrimiento del hidróxido de potasio (*KOH*), el uso de los carbonatos fue descartado, ya que el *KOH* ofrecía características similares con la ventaja de ser más económico. [2]

El electrolito de las celdas de combustible AFC es una solución líquida de hidróxido de potasio (*KOH*). La presencia de los iones hidroxilo que viajan a través del electrolito, permite que exista un circuito eléctrico y así la energía eléctrica puede ser extraída. [2]

En el ánodo, dos moléculas de hidrógeno gaseoso reaccionan con cuatro iones hidróxido de carga negativa, generando cuatro moléculas de agua y liberando cuatro electrones. Este proceso corresponde a una reacción de oxidación, que puede describirse como [2]:

Oxidación.



Los electrones liberados viajan a través de un circuito externo hacia el cátodo, donde reaccionan con el agua para generar iones hidróxido (OH^-). En el cátodo, una molécula de oxígeno se combina con dos moléculas de agua y absorbe cuatro electrones, formando cuatro iones hidróxido con carga negativa. La reacción de reducción resultante es:

Reducción.



Las celdas de combustible AFC generalmente operan en un rango de temperatura de $60^\circ C$ hasta $90^\circ C$. Sin embargo, los diseños más recientes permiten su funcionamiento a temperaturas más bajas, entre $23^\circ C$ hasta $70^\circ C$. Estas celdas se consideran de baja temperatura y tienen un costo de catálisis relativamente bajo.

El catalizador más comúnmente utilizado para acelerar las reacciones electroquímicas en los electrodos de estas celdas es el níquel. Es importante recordar que un catalizador es una sustancia que acelera la velocidad de una reacción química sin consumirse ni alterarse permanentemente durante el proceso. [2]

La eficiencia eléctrica de las celdas AFC es aproximadamente del 60 %, y puede superar el 80 % cuando se utiliza en sistemas de cogeneración de calor y energía eléctrica. En promedio, estas celdas pueden generar hasta $20kW$ de potencia eléctrica. [2]

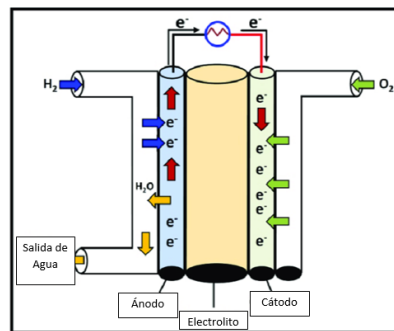


Figura 4: Celda de combustible AFC [d]

2.1.3. Ácido fosfórico: PAFC. Celda de combustible de mediana temperatura

El electrolito de las celdas de combustible PAFC (por sus siglas en inglés: *Phosphoric Acid Fuel Cell*) es en fase líquida, su electrolito es de una solución de ácido fosfórico, H_3PO_4 .

La solución de H_3PO_4 (que contiene 3,09 % de hidrógeno (H_2), 31,6 % de fósforo (P_2) y 65,3 % de oxígeno (O_2)) es un líquido transparente e incoloro utilizado en la fabricación de fertilizantes, detergentes, saborizantes alimentarios y productos farmacéuticos. La conductividad iónica del ácido fosfórico es baja a temperaturas reducidas, entre $150^\circ C$ y $220^\circ C$. El portador de carga en este tipo de celda de combustible es el ion hidrógeno (H^+ o protón), que se desplaza del ánodo al cátodo a través del electrolito. [2]

Los electrones generados en el ánodo viajan hacia el cátodo a través del circuito externo, generando corriente eléctrica. En el electrodo catódico, el agua se forma como resultado de la reacción entre los electrones, los protones y el oxígeno, en presencia de un catalizador de platino que acelera las reacciones. Normalmente, el

agua generada se utiliza para aplicaciones de calefacción. [2]

Es importante destacar que la operación continua del sistema a $40^{\circ}C$ es una preocupación, debido a la posible solidificación del ácido fosfórico a esta temperatura.

El hidrógeno generado en el ánodo, se divide en cuatro protones y cuatro electrones. La reacción redox que tiene lugar en la oxidación del ánodo, tal y como se muestra a continuación: [34]

Oxidación.



Mientras que en el cátodo se tiene la reacción de reducción, donde cuatro protones y cuatro electrones se combinan con el oxígeno para formar agua, tal y como se muestra: [34]

Reducción. [34]



Los electrones y protones se desplazan a través del circuito externo y el electrolito, respectivamente. Esto da como resultado la generación de corriente eléctrica y calor. Generalmente, el calor se utiliza para calentar agua o generar vapor a presión atmosférica. Sin embargo, las reacciones de reformado de vapor producen cierta cantidad de monóxido de carbono (CO) cerca de los electrodos, lo que puede causar envenenamiento en la celda PAFC y afectar gravemente su rendimiento. [2]

Una celda PAFC no requiere oxígeno puro para su funcionamiento, ya que el CO_2 no afecta ni el electrolito ni el rendimiento de la celda. Además, estas celdas pueden operar fácilmente con combustibles fósiles reformados. El ácido H_3PO_4 utilizado en ellas presenta baja volatilidad y una estabilidad aceptable a largo plazo. Sin embargo, el costo inicial de una PAFC es elevado, debido a que utiliza aire con aproximadamente un 21 % de oxígeno en lugar de oxígeno puro, lo que reduce hasta tres veces la densidad de corriente. [2]

2.1.4. Celda de combustible de carbonatos fundidos: MCFC. Celdas de combustible de alta temperatura

Utilizan como electrolito, (electrolito-sólido-Beta-alúmina; BASE) una mezcla de sales de carbonatos fundidos, suspendidos en una matriz cerámica porosa e inerte químicamente.

En una MCFC (por sus siglas en inglés: *Molten Carbonate Fuel Cell*) como se muestra en la **Figura 5**, la reacción en el ánodo ocurre entre el combustible (hidrógeno) y los iones de carbonato, resultando en la formación de dióxido de carbono, agua y electrones. En el ánodo, el gas de alimentación, generalmente metano (CH_4), junto con el agua (H_2O), se convierte en hidrógeno (H_2), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2). [2]

Reformado 1.



Reformado 2.



Simultáneamente, dos reacciones electroquímicas consumen hidrógeno y monóxido de carbono, generando electrones en el ánodo. Ambas reacciones utilizan los iones carbonatos disponibles en el electrolito [2]:

Oxidación 1.



Oxidación 2.



La reducción ocurre en el cátodo y son expulsados nuevos iones carbonatos a partir del oxígeno (O_2) y dióxido de carbono (CO_2). Entonces, los iones carbonatos producidos en el cátodo, se transfieren a través del electrolito hacia el ánodo. La corriente eléctrica y el voltaje de la celda, se transporta a través de los electrones [2]:

Reducción.



Actualmente, las celdas MCFC se utilizan en diversas aplicaciones, como centrales eléctricas de servicio público, en la industria y en servicios militares. Las ventajas y desventajas de estas celdas están estrechamente vinculadas a su alta temperatura de funcionamiento. Pueden alimentarse directamente con hidrógeno, monóxido de carbono, gas natural y propano. [2]

Una de sus ventajas es que no requieren catalizadores de metales nobles para las reacciones de oxidación y reducción electroquímica. Además, no es necesario realizar un desarrollo de infraestructura complejo para su instalación. Sin embargo, un inconveniente es que se necesita un tiempo considerable para alcanzar la temperatura de funcionamiento adecuada y comenzar a generar energía.

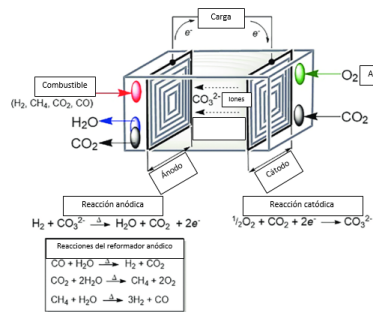


Figura 5: Celda de combustible MCFC [e]

2.1.5. Celda de combustible de óxido sólido: SOFC. Celdas de combustible de alta temperatura

Las celdas de combustible de óxido sólido SOFC (por sus siglas en inglés: *Solid Oxide Fuel Cell*) como se muestra en la **Figura 6** son dispositivos de alta temperatura que emplean un electrolito cerámico sólido. Normalmente, las celdas SOFC utilizan una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono, generados internamente mediante el reformado de hidrocarburos, como combustible, junto con aire como oxidante. [2]

A $1000^\circ C$, el oxígeno se reduce en la reacción de reducción en el cátodo, mientras que la oxidación del combustible ocurre en el ánodo. El ánodo debe ser poroso para permitir el flujo de combustible y transportar los productos de la oxidación lejos del electrolito y de la interfaz electrodo-combustible: [2]

Oxidación.



Reducción.



Las celdas SOFC son sistemas de generación de energía de gran escala, con capacidades que pueden alcanzar cientos de megavatios (*MW*). El calor producido como subproducto generalmente se aprovecha para generar más energía eléctrica mediante la rotación de turbinas de gas, lo que incrementa la eficiencia con sistemas de cogeneración de calor y energía eléctrica entre un 70 % y un 80 %. [2]

Estos sistemas SOFC son fiables, modulares y adaptables a diversos combustibles, además de emitir bajos niveles de gases nocivos como óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x). Por estas características, pueden ser una solución ideal como sistemas de generación de energía local para zonas rurales sin acceso a redes eléctricas públicas. [2]

Además, operan de manera silenciosa y requieren poco mantenimiento. Sin embargo, su uso está limitado por el largo tiempo necesario para alcanzar la temperatura de operación y el proceso de enfriamiento, así como por diversos problemas relacionados con la compatibilidad química y mecánica de sus componentes.

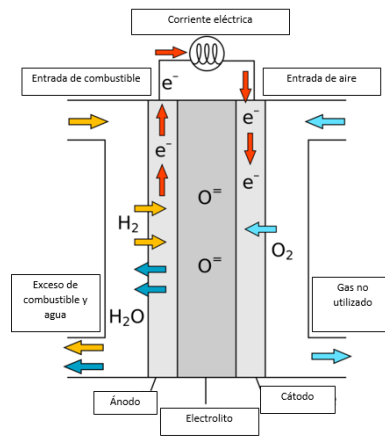


Figura 6: Celda de combustible SOFC [f]

2.2. Componentes de las celdas de combustible

Una celda de combustible está compuesta por diversos elementos pasivos que se interconectan con un propósito específico. Algunos de estos elementos se encargan de transportar fluidos, como gases, a través de superficies; otros conducen cargas eléctricas, ya sean positivas o negativas. Asimismo, ciertos componentes aíslan eléctricamente distintas partes, mientras que otros evitan fugas.

El diseño básico de una celda de combustible incluye cuatro elementos principales dispuestos de manera simétrica. El núcleo central es el “electrolito”, cuya función es transportar iones de un punto a otro. Estos iones pueden tener carga positiva o negativa, dependiendo del tipo de celda de combustible (CC). A cada lado del electrolito se encuentran los “electrodos”, denominados ánodo y cátodo. [34]

El ánodo está conectado a la terminal eléctrica negativa, mientras que el cátodo se asocia con la positiva. Los electrodos están formados por un material electro-catalizador, que facilita las reacciones electroquímicas necesarias para el funcionamiento de la celda. Este material suele estar disperso o soportado sobre carbono.

Para optimizar la distribución de los gases sobre la superficie del electro-catalizador, se emplea un componente llamado “difusor”, cuya función es precisamente distribuir los gases de manera uniforme sobre un área específica de la celda de combustible.

Adicionalmente, la celda incluye elementos como empaques y tornillos, que se encargan de sellar la estructura y prevenir fugas.

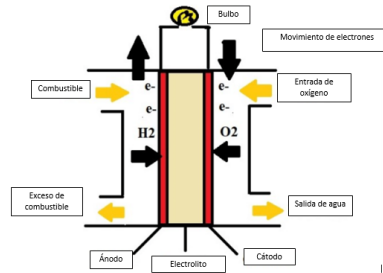


Figura 7: Diagrama básico de los elementos de una celda de combustible (ej:PEMFC) [g]

2.2.1. Electrolitos

Un electrolito es una sustancia, ya sea sólida o líquida, que permite la conducción de iones a través de su estructura, sean estos positivos o negativos. La capacidad de un electrolito para transportar iones se denomina conductividad iónica y se representa mediante la letra griega minúscula κ (kappa). Esta propiedad se mide en unidades de siemens por centímetro (S/cm). [34]

A continuación, en la **Tabla 1** se muestra los diferentes tipos de celdas de combustible, los materiales utilizados como electrolitos y los iones que cada uno de ellos transporta.

Celda de combustible	Electrolito	Ion que transporta
PEMFC, DMFC, DEFC	$PTFE + SO_3^-$	H^+
AFC	KOH	OH^-
PAFC	H_3PO_4	H^+
MCFC	Li_2CO_3/K_2CO_3	CO_3^{2-}
SOFC	ZrO_2/Y_2O_3	$O^{=}$

Tabla 1. Electrolitos y iones de las celdas de combustible. [34]

Los principales requisitos de los electrolitos se listan a continuación:

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

2.2.2. Electrolito sólido: membrana polimérica

La membrana en las celdas de combustible está compuesta de ácido perfluorosulfónico (PFSA, por sus siglas en inglés) y funciona como electrolito o ionómero. Esta membrana debe cumplir con varias características esenciales:

1. Exhibir una alta conductividad de protones.

2. Ser impermeable al combustible y al oxidante.
3. Poseer una excelente estabilidad química y mecánica en las condiciones de operación de la celda.
4. Ser capaz de transportar agua de manera eficiente.

Estas propiedades dependen directamente del grado de hidratación de la membrana. El intercambio de protones, proceso clave para el funcionamiento de la celda, requiere condiciones específicas de hidratación, lo que a su vez limita la temperatura máxima de operación de la celda de combustible. [34]

El contenido de agua en la membrana se expresa generalmente de dos maneras:

1. Relación masa de agua/polímero: El cociente entre la masa de agua (en gramos) y la masa del polímero.
2. Relación moléculas de agua/grupos funcionales: El cociente entre el número de moléculas de agua ($N(H_2O)$) y el número de grupos funcionales de ácido sulfónico ($N(SO_3^-)$) presentes en el polímero, representado como:

$$\lambda = \frac{N(H_2O)}{N(SO_3^-)} \quad (24)$$

En donde λ indica cuantas moléculas de agua están asociadas a cada grupo funcional ácido SO_3^- . En la **Tabla 2** se muestra la interpretación de λ .

Valor de λ	Estado de la membrana	Características
$\lambda < 3$	Pobrementemente hidratada	Baja conductividad protónica, posible desecación.
$\lambda = 10 - 14$	Hidratación óptima	Baja conductividad protónica y buena estabilidad mecánica
$\lambda > 20$	Excesivamente hidratada	Riesgo de hinchamiento, pérdida de integridad mecánica.

Tabla 2. Interpretación de λ . [56]

Por ejemplo:

Un valor de $\lambda = 22$ indica que la membrana se ha hidratado con agua líquida.

Un valor de $\lambda = 14$ indica que la hidratación se realizó utilizando vapor de agua.

Estos niveles de hidratación afectan la conductividad iónica de la membrana: $0,1 \frac{S}{cm}$ para $\lambda = 22$ y $0,06 \frac{S}{cm}$ para $\lambda = 14$ y . La relación entre la conductividad iónica (κ), el grado de hidratación (λ) y la temperatura (T) se describe mediante la ecuación:

$$\kappa = (0,00514\lambda - 0,0033)exp[1268(\frac{1}{303} - \frac{1}{T})] \quad (25)$$

Donde T es la temperatura en kelvin (K). [34]

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:

- a) En el cátodo se genera agua a una tasa proporcional a la generación de corriente eléctrica.
- b) 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.
- c) La difusión de agua a través de la membrana originada por gradientes de concentración; este fenómeno puede representarse matemáticamente mediante la ley de Fick.
- d) 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. [34]

2.2.3. Electrolito líquido: KOH , H_3PO_4

El electrolito de ácido fosfórico es el único ácido inorgánico que combina estabilidad térmica, química y electroquímica con una temperatura de volatilidad relativamente alta ($150^\circ C$). Una de sus principales ventajas es su tolerancia al dióxido de carbono (CO_2) presente en el combustible y el oxidante, lo que lo hace superior en este aspecto a las celdas con electrolito de solución alcalina.

El ácido fosfórico es incoloro, viscoso e higroscópico, lo que significa que absorbe agua. En las celdas de combustible de ácido fosfórico ($PAFC$, por sus siglas en inglés), el ácido se retiene por efecto de capilaridad, ya que forma un ángulo de contacto superior a 90° , dentro de los poros de una matriz de carburo de silicio (S_iC). Esta matriz está unida mediante una pequeña cantidad de politetrafluoroetileno ($PTFE$).

Durante los primeros desarrollos de esta tecnología en la década de 1980, se utilizaba ácido fosfórico puro, que tiene un punto de congelación de $42^\circ C$. Para evitar la solidificación del ácido, las celdas debían calentarse por encima de esta temperatura.

Aunque el ácido fosfórico tiene una alta temperatura de volatilidad, las celdas $PAFC$ pueden experimentar pérdidas de electrolito si se operan a temperaturas elevadas durante largos periodos. Esto hace necesario reemplazar el electrolito periódicamente o garantizar, desde el diseño inicial, que la cantidad de ácido en la matriz sea suficiente para satisfacer las necesidades energéticas previstas durante el tiempo de operación planificado.

La matriz de S_iC tiene un grosor de entre $0,1mm$ y $0,2mm$ y está formada por partículas de aproximadamente $1\mu m$. Su delgado diseño ofrece la rigidez mecánica necesaria para evitar el cruce de combustible u oxidante a través del electrolito, garantizando así la eficiencia y la seguridad de la celda. Sin embargo, una de las principales desventajas es que esta matriz no soporta presiones superiores a $200mbar$, lo que limita su resistencia bajo ciertas condiciones operativas. [34]

2.2.4. Electro-catalizadores

Cada componente de una celda de combustible influye en su desempeño, pero los electro-catalizadores desempeñan un papel fundamental, ya que son responsables de facilitar las reacciones electroquímicas esenciales para su operación. Entre ellos, el platino es el más utilizado debido a su capacidad para promover estas reacciones incluso a bajas temperaturas, como la temperatura ambiente ($25^\circ C$).

Este atributo es especialmente relevante, ya que elimina la necesidad de aportar energía adicional para que la celda funcione de manera eficiente. Como resultado, el uso de platino contribuye significativamente a mejorar la eficiencia general del sistema [34]. En la **Tabla 3** se presentan los electrolitos y iones que transportan los electro-catalizadores en cada una de las celdas de combustible.

Celda de combustible	Electrolito	Ion que transporta
PEMFC, DMFC, DEFC	$\frac{Pt}{C}$, $\frac{Pt-Ru}{C}$	$\frac{Pt}{C}$
AFC	N_i	Ag
PAFC	$\frac{Pt}{C}$	$\frac{Pt}{C}$
MCFC	N_i	N_iO
SOFC	$N_i - ZrO_2$	$\frac{LaMnO_3}{Sr}$

Tabla 3. Electrolitos y iones de los electro-catalizadores. [34]

2.2.5. 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:

1. Paralelo o de canales rectos.
2. Serpentin sencillo.
3. Serpentin múltiple.
4. Tipo rejilla, etc.

Cada configuración se usa exclusivamente para un tipo de combustible o aplicación en función de la potencia eléctrica que se desee. [34]

2.3. Principio de operación de las celdas de combustible

Las celdas de combustible generan energía eléctrica y calor a través de una reacción electroquímica que en realidad es una reacción de electrólisis invertida. Esto sucede entre el oxígeno e hidrógeno para formar agua. Existe una variedad de diseños disponibles para celdas de combustible, sin embargo, todos ellos operan con los mismos principios básicos. La principal diferencia en el diseño de las celdas, se basa en las características químicas del electrolito utilizado en cada una (Cook, 2001).

El proceso conocido como electrólisis inversa es, en esencia, el opuesto a la electrólisis del agua, en la que se emplea energía eléctrica para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno. En este caso, el hidrógeno y el oxígeno se recombinan en una celda de combustible, generando energía eléctrica y agua como subproducto. [2][8]

Cabe mencionar que el término más preciso para describir este proceso es "funcionamiento de una celda de combustible", ya que la electrólisis se refiere específicamente a la descomposición de compuestos mediante la aplicación de una corriente eléctrica.

Una celda de combustible consta de cuatro componentes principales: ánodo, cátodo, electrolito y circuito externo. En el ánodo, el hidrógeno se oxida, generando protones y electrones. En el cátodo, el oxígeno se reduce a especies óxido, que posteriormente reaccionan para formar agua. Según el tipo de electrolito, los protones o los iones óxido se desplazan a través de un conductor iónico aislante (material que permite la transferencia de iones, es decir, partículas cargadas eléctricamente, a través de su estructura, pero que actúa como un aislante para los electrones), mientras que los electrones fluyen a través del circuito externo, produciendo energía eléctrica. [2]

La reacción entre el oxígeno e hidrógeno para generar energía eléctrica varía según el tipo de celda de combustible. En un electrolito ácido, el gas de hidrógeno se descompone en electrones y protones (H^+) en el ánodo. Los electrones fluyen hacia el cátodo a través de un circuito externo, mientras que los protones atraviesan el electrolito. Este proceso produce energía eléctrica. Al mismo tiempo, en el cátodo, los electrones provenientes del circuito y los protones del electrolito reaccionan con el oxígeno para formar agua. Las reacciones presentes en el ánodo y cátodo se muestran a continuación:

Ánodo:



Cátodo:



2.4. Comparación de las diferentes tecnologías de las celdas de combustible

Las aplicaciones de las celdas de combustible dependen del tipo de celda utilizada. Es fundamental determinar qué tecnología es la más adecuada para cada caso específico. Estas celdas generan energía eléctrica en un amplio rango de potencias, desde $1MW$ hasta $10MW$, lo que las hace aptas para casi cualquier aplicación que requiera suministro de energía. En dispositivos pequeños, pueden emplearse en equipos electrónicos personales, como teléfonos móviles y computadoras personales (PC). A escala media, las celdas de combustible son ideales para vehículos, aparatos domésticos, aplicaciones militares y sistemas de transporte público.

Por último, a gran escala, pueden integrarse en sistemas de distribución de energía eléctrica de alta calidad (1-10MW) para abastecer comunidades de difícil acceso, donde la instalación de infraestructura tradicional para generación eléctrica resulta costosa. [10]

2.5. Características principales del sector energético en México. Uso de combustibles fósiles y de fuentes de energía renovables

El sector energético en México es fundamental para el desarrollo económico y social del país. A continuación, se presentan las principales características del sector, basadas en información actualizada de fuentes oficiales como la Secretaría de Energía (SENER), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

2.5.1. Generación y Consumo de Energía Eléctrica

Consumo Neto del Sistema Eléctrico Nacional (SEN): En 2022, el consumo neto fue de 333,662 GWh, lo que representa un incremento del 3,4 % respecto a 2021. Véase la **Figura 8**

CUADRO 3.1 CONSUMO NETO DE ENERGÍA ELÉCTRICA 2020-2022

CONSUMO NETO						
	2020		2021		2022	
	GWh	% Inc.	GWh	% Inc.	GWh	% Inc.
SISTEMA						
Eléctrico Nacional (SEN)	311,604	-2.2	322,552	3.5	333,662	3.4
Interconectado Nacional (SIN)	294,166	-2.5	304,034	3.4	314,317	3.4
Baja California (SIBC)	14,683	3.9	15,541	5.8	16,233	4.5
Baja California Sur (SIBCS)	2,608	-3.8	2,826	8.4	2,964	4.9
Mulegé (SIMUL)	148	6.8	150	1.9	148	-1.4
GERENCIA DE CONTROL REGIONAL						
Central (CEN)	56,243	-5.0	56,862	1.1	58,099	2.2
Oriental (ORI)	49,847	-2.0	52,083	4.5	53,321	2.4
Occidental (OCC)	67,867	-1.6	69,893	3.0	72,679	4.0
Noroeste (NOR)	25,421	4.5	25,548	0.5	25,735	0.7
Norte (NTE)	28,572	0.5	28,948	1.3	29,735	2.7
Noreste (NES)	53,769	-4.4	57,152	6.3	60,277	5.5
Peninsular (PEN)	12,447	-10.0	13,549	8.9	14,470	6.8

FUENTE: Elaboración propia con datos del CENACE.

Figura 8: Consumo neto de energía eléctrica. [h]

Proyección de Consumo: Se estima que para 2037, el consumo de energía eléctrica en México alcanzará aproximadamente 479,987 GWh, un aumento del 43,9 % en comparación con las cifras actuales. [9]

2.5.2. Matriz de energía primaria de México

La matriz de energía primaria de México en 2023 refleja la diversidad de fuentes energéticas utilizadas para satisfacer la demanda nacional. A continuación, se detallan las principales fuentes de energía primaria y su participación en el consumo total.

Fuentes de energía primaria:

1. Combustibles fósiles.

Petróleo y derivados: Aportan alrededor del 42,61 % al consumo de energía primaria, utilizados principalmente en el sector transporte y en procesos industriales.

Gas natural: Representando el 41,34 % del consumo total. El gas natural es fundamental para la generación de energía eléctrica y como combustible industrial.

Carbón: Representa cerca del 4,67 % del consumo, empleado en menor medida para la generación eléctrica y en algunas industrias.

2. Energías limpias.

Hidroeléctrica: Contribuye con aproximadamente el 0,93 % de la matriz energética, siendo una fuente importante de generación eléctrica.

Energía eólica y solar: Cada una aporta alrededor del 3,99 % al consumo total, con un crecimiento notable en los últimos años debido a inversiones en infraestructura renovable.

Nuclear: Representa cerca del 1,77 % del consumo de energía primaria, proveniente de la central nuclear de Laguna Verde.

Biocombustibles: Representa cerca del 4,7 % del consumo de energía primaria. En el **Figura 9** podemos ver un diagrama que desglosa en porcentaje la importancia de la matriz energética y la dependencia que se tiene de los combustibles fósiles.

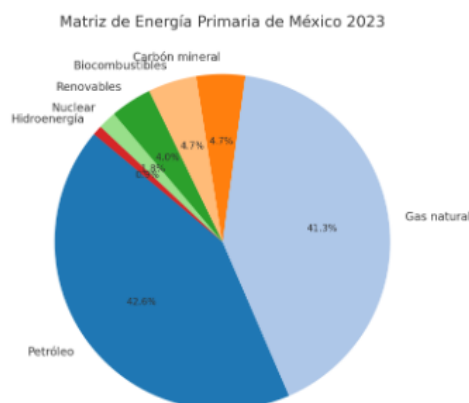


Figura 9: Matriz de energía primaria 2023 en México

2.5.3. Capacidad instalada y generación eléctrica

Capacidad instalada: México ha incrementado su capacidad instalada de generación eléctrica, pasando de 64,172MW en 2013 a 94,781MW en 2023, lo que representa un aumento de más de 30,000MW en una década. [12]

Generación por persona: La generación eléctrica per cápita es de aproximadamente 2,692kWh, lo que ubica al país en el puesto 111 a nivel mundial en este indicador. [12]

2.5.4. Intensidad de carbono

La intensidad de carbono de la generación eléctrica en México es de 421.62 $\frac{gCO_2eq}{kWh}$, posicionando al país en el lugar 107 a nivel global en términos de emisiones por unidad de energía generada.

2.5.5. Proyecciones y planificación

Consumo eléctrico futuro: Se estima que para 2037, el consumo de energía eléctrica en México alcanzará aproximadamente 479,987GWh, lo que representa un incremento del 43,9 % respecto a 2022.

Energías renovables: México se posiciona como uno de los líderes en América Latina en la adopción de energías renovables, junto con Brasil y Chile, impulsando proyectos de energía solar, eólica y almacenamiento de energía.[13]

3. Uso de las celdas de combustible en el sector energético

3.1. Aplicaciones principales en los sectores residenciales y transporte

3.1.1. Sector residencial

Las celdas de combustible cuentan con diversas aplicaciones en el sector residencial, siendo especialmente útiles en sistemas de cogeneración que producen, de manera simultánea, energía eléctrica y calor para el hogar tal y como se ve en la **Figura 10**. Estos sistemas, conocidos como microcogeneración o micro-CHP, representan una alternativa eficiente y de bajas emisiones para cubrir las necesidades energéticas domésticas. [1]

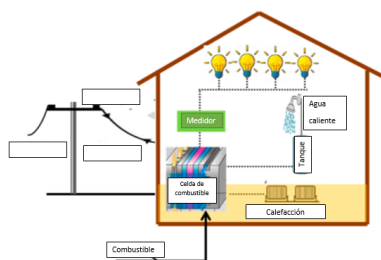


Figura 10: Diagrama básico de un sistema micro-CHP [i]

Entiéndase que los sistemas de microcogeneración, o micro-CHP (por sus siglas en inglés, *Combined Heat and Power*), son tecnologías que permiten la generación simultánea de energía eléctrica y calor utilizable a partir de una única fuente de combustible, como gas natural, biogás o hidrógeno. Estos sistemas están diseñados para aplicaciones residenciales y comerciales de pequeña escala, ofreciendo una solución eficiente y sostenible para satisfacer las necesidades energéticas locales. [14]

Las principales tecnologías de celdas de combustible utilizadas en aplicaciones residenciales incluyen:

1. Celdas de Combustible de Membrana de Electrolito Polimérico (PEMFC).
Operan a temperaturas moderadas (alrededor de 80°C) y ofrecen una alta densidad de potencia. Son adecuadas para aplicaciones residenciales debido a su rápida respuesta y diseño compacto.
2. Celdas de Combustible de Óxido Sólido (SOFC).
Funcionan a temperaturas más elevadas (600°C - 1000°C), lo que permite una mayor eficiencia eléctrica y la posibilidad de utilizar diversos combustibles, como gas natural o biogás.

Se cuenta con los siguientes detalles técnicos:

1. Eficiencia.

Los sistemas de micro-CHP basados en celdas de combustible pueden alcanzar eficiencias totales de hasta el 90 %, con una eficiencia eléctrica alrededor del 60 % y el resto en forma de calor aprovechable. [14]

En la **Tabla 4** que es una tabla comparativa se analizan las eficiencias de acuerdo al tipo de tecnología micro-CHP utilizada destacando las celdas de combustible.

Tecnología micro-CHP	Eficiencia eléctrica típica	Eficiencia térmica	Eficiencia global (eléctrica + típica)
Motor de combustión interna	22 – 30 %	50 – 55 %	80 – 85 %
Motor Stirling	10 – 15 %	60 – 70 %	80 – 90 %
Celdas de combustible	30 – 60 % (según el tipo)	25 – 50 %	80 – 95 %
Micro turbinas	25 – 30 %	45 – 55 %	75 – 85 %

Tabla 4. Eficiencias de las tecnologías micro-CHP. [56][57][58][59]

2. Tamaño y capacidad.

Estos sistemas suelen tener una capacidad de hasta $50kW$, lo que los hace adecuados para viviendas y pequeños edificios comerciales. Las cifras orientadas a su tamaño dependen del diseño propio de la celda de combustible a aplicar, si son del tipo PEMFC o SOFC, si el combustible es hidrógeno puro o un reformado como el gas natural, la presión de almacenamiento, la capacidad eléctrica nominal (partiendo de $0.7kW$ hasta los $10kW$).

A continuación se presentan las dimensiones por componente a considerar en la instalación de una celda de combustible en el sector residencial.

a) Módulo de pila (*fuel-cell stack* + carcasa del módulo).

- 1) Rango típico (sistemas domésticos micro-CHP, $0.7-2kW$):
 $1.6m$ (alto) $\times$ $0.35-0.40m$ (ancho) $\times$ $0.39-0.45m$ (fondo). Ejemplo comercial Ene-Farm (unidad doméstica empotrable/colgada): $1.650m \times 0.350m \times 0.395m$.
- 2) Módulos más grandes ($5kW$ clase comercial / pequeño edificio):
 $0.83-1.0m$ (ancho) $\times$ $0.42-0.97m$ (fondo) $\times$ $1.76-1.9m$ (alto). Ejemplo Panasonic $5kW$: $0.834m \times 0.417m \times 1.766m$.
- 3) Tamaño físico interno de un stack (sólo la pila):
Puede ser del orden de $0.2m$ - $0.300m$ de ancho $\times$ $0.2 - 0.500m$ de alto/profundo según la potencia y el número de celdas. Ejemplo stacks industriales PEM: $0.235m \times 0.275m$ en algunas fichas.

b) *Balance of Plant (BoP)*— gabinete/reformador / procesador de combustible (si aplica).

- 1) Si se usa reformador(reforma de gas natural/LPG $\rightarrow H_2$):
Suele ser un gabinete adicional del orden de $0.6-1.5m$ (alto) $\times$ $0.4-0.8m$ (ancho) $\times$ $0.4-0.8m$ (fondo), dependiendo de si integra intercambiadores, catalizadores, bombas y tanques pequeños. En instalaciones “integradas” (*Ene-Farm*) muchos de estos elementos están incorporados en la unidad compacta.
- 2) Si el sistema opera con H_2 puro (tanque externo o suministro por red), el BoP se reduce (válvulas, reguladores, paneles de control), ocupando típicamente un armario de $0.5-1.0m$ junto a la pila. Ejemplo: generadores modulares Panasonic incluyen BoP integrado en la carcasa grande.

c) Almacenamiento de hidrógeno (tanque):

- 1) Vehicular típico:
 $1-3$ tanques con volúmenes totales de $140-160L$ para $4.4-6.3kgH_2$ (automóviles) donde cada tanque suele medir del orden de $1.2-1.8m$ de longitud y $0.15-0.45m$ de diámetro según la geometría y presión la cual puede variar entre 350 a $700 bar$.
- 2) Para un hogar que quiera almacenamiento local tales como “*Homefueler*” o estaciones domésticas, hay soluciones desde pequeños depósitos tipo botellas compuestas hasta sistemas de mayor volumen. Por ejemplo, estaciones domésticas de pruebas almacenan decenas de litros a cientos de litros de volumen. El volumen físico necesario depende directamente de los kgH_2 deseados y la presión.

d) Electrónica de potencia / inversor.

- 1) Muchos fabricantes integran la electrónica en la misma carcasa de la unidad micro-CHP; si es externa, un inversor trifásico/residencial ocupa alrededor de 0.5–1.0m (alto) $\times$ 0.4–0.6m (ancho) $\times$ 0.2–0.4m (fondo) siendo un caso similar a inversores residenciales de baterías. Si hay baterías de apoyo se debe añadir el volumen del banco de baterías.

e) Depósito de agua caliente / recuperación térmica.

- 1) Si la unidad es micro-CHP integrada con calentador de agua, puede requerir un tanque ACS/hidráulico con capacidad de 100 a 200L. Cuando el sistema no incluye tanque, suele instalarse un boiler estándar de dimensiones variables, por ejemplo de 0.5–1.0m de diámetro $\times$ 0.5–1.5m alto.

f) Huella total estimada (sistema doméstico integrado, 0.7–2 kW).

- 1) Unidad integrada (stack + BoP + control + intercambiador de calor) que suele ocupar de 0.5 a 1.2 m^2 en planta y de 0.4–1.8m de altura.
- 2) Sistema con tanque externo + gabinete BoP + inversor:
Suma práctica entre 1–3 m^2 de superficie útil ocupada (dependiendo del tamaño del tanque/herramientas).

Entonces tenemos un diagrama básico de una instalación de un sistema micro-CHP tal y como lo muestra la **Figura 11**.



Figura 11: Elementos de un micro-CHP.

3. Combustible.

Aunque el hidrógeno es el combustible ideal para las celdas de combustible, en aplicaciones residenciales es común el uso de gas natural o propano, que se reforman internamente para producir hidrógeno. A continuación se presentan las etapas del proceso de reformación para la obtención de hidrógeno de forma general [21]:

a) Preparación del gas natural.

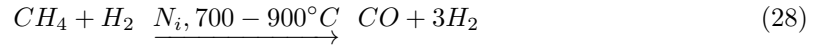
Desulfurización: El gas natural contiene trazas de compuestos de azufre que, aunque sean mínimas, pueden envenenar el catalizador del reformador y la celda de combustible (sobre todo si es

de tipo PEM). [36]

Método: Se hace pasar el gas por un lecho adsorbente (normalmente óxidos metálicos) que retiene el azufre.

b) Reformación con vapor de agua (*Steam Methane Reforming*, SMR). [37]

Reacción principal:



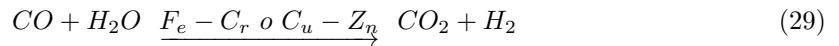
El gas natural (principalmente metano) se mezcla con vapor de agua y se calienta en presencia de un catalizador de níquel.

Resultado.

Se obtiene una mezcla rica en hidrógeno, monóxido de carbono y algo de CO_2 .

c) Conversión de monóxido de carbono (*Water-Gas Shift*). [37]

Reacción:



Se puede hacer en dos etapas: alta temperatura ($350\text{--}450^\circ C$) y baja temperatura ($200\text{--}250^\circ C$), para maximizar la conversión.

d) Purificación del hidrógeno.

Método típico: Adsorción por cambio de presión (*Pressure Swing Adsorption*, PSA) o membranas selectivas.

Se obtiene hidrógeno con purezas mayores al 99,9 %, lo que es crucial para el buen funcionamiento de la celda de combustible. [38]

e) Integración con la celda de combustible.

El hidrógeno purificado alimenta directamente la celda (generalmente de tipo PEMFC o SOFC en aplicaciones residenciales).

La celda convierte el hidrógeno en electricidad y calor útil para calefacción o agua caliente.

El CO_2 generado en el proceso de reformación se maneja de forma controlada; en aplicaciones residenciales pequeñas normalmente se libera, aunque existen soluciones para capturarlo. [38]

f) Características en el sector residencial.

Compacto: Los reformadores domésticos son integrados dentro del sistema de micro-CHP, con aislamiento térmico y control automatizado.

Eficiencia: La eficiencia eléctrica suele estar entre 35–40 %, pero el aprovechamiento total (electricidad + calor) puede superar el 80 %.

Seguridad: Incluyen sistemas de detección de fugas, ventilación y control de presión para el manejo seguro del hidrógeno. [14]

4. Emisiones

Las celdas de combustible producen bajas emisiones de contaminantes locales, ya que la generación de energía eléctrica se realiza sin combustión directa. A continuación se presenta una tabla comparativa para las celdas PEMFC y SOFC de las emisiones de contaminantes en aplicaciones residenciales. La **Tabla 5** hace una demostración al respecto.[16]

Tipo de celda de combustible	Emisiones de NO_x	Emisiones de CO	Emisiones de SO_2	Emisiones de CO_2
PEMFC	~ 0	~ 0	~ 0	0.71-0.75
SOFC	~ 0	~ 10	~ 0	0.52-0.60

Tabla 5. Emisiones contaminantes de las celdas de combustible PEMFC y SOFC en mg/kWh [56][58][60]

En México, la Agencia de Energía del Estado de Puebla ha destacado que las celdas de combustible de baja temperatura son una opción viable para la generación de energía en edificaciones residenciales, subrayando su gran potencial en aplicaciones domésticas. A continuación, se presentan algunas de sus aplicaciones más destacadas: [18]

1. Generación de energía eléctrica y calor simultáneos (cogeneración).

Mayor eficiencia. Las celdas de combustible permiten aprovechar tanto la energía eléctrica como el calor generado en un solo proceso, lo que aumenta significativamente la eficiencia energética.

Calentamiento de espacios. El calor residual puede utilizarse para calentar agua sanitaria o incluso toda la vivienda, reduciendo la dependencia de otros sistemas de calefacción, dicho calor se recoge por medio de intercambiadores de calor integrados en el sistema de cogeneración. [19]

En un sistema de cogeneración basado en celdas de combustible para uso residencial, los intercambiadores de calor integrados son componentes clave que permiten aprovechar el calor residual para producir agua caliente sanitaria y calefacción. Contamos con tres tipos diferentes de intercambiadores, los cuales se explican a continuación:

- a) Intercambiador de calor primario (o del stack). Ubicación: Acoplado directamente al stack (conjunto de celdas de combustible).

Función: Recupera el calor generado internamente por las celdas durante la reacción electroquímica.

Aplicación: Se transfiere a un fluido térmico (agua/glicol), que luego se utiliza para calentar agua sanitaria o aportar a la calefacción del hogar. [17]

- b) Intercambiador de gases de escape. Ubicación: A la salida del sistema, donde se emiten los gases residuales calientes.

Función: Recupera el calor que aún contiene el gas de escape, especialmente útil en SOFC (por sus altas temperaturas de operación).

Aplicación: Puede alimentar un sistema de agua caliente o precalentar el agua fría de entrada al sistema. [17]

- c) Intercambiador de agua caliente sanitaria (ACS).

Ubicación: En el circuito de distribución o almacenamiento del agua caliente.

Función: Transfiere el calor del fluido térmico (calentado en los pasos anteriores) al agua sanitaria de consumo. [17]

Aplicación: Calienta el agua que se utiliza en duchas, grifos o sistemas de calefacción doméstica.

2. Sistemas de respaldo de energía.

a) Autonomía energética.

En caso de cortes de energía, las celdas de combustible pueden proporcionar energía eléctrica de manera continua, garantizando la continuidad de los servicios esenciales en el hogar. De este punto se debe considerar que la duración de la generación de energía eléctrica por una celda de combustible en un sistema de micro-CHP durante un corte de energía en el sector residencial depende de varios factores, incluyendo el tipo de celda de combustible, el suministro de combustible disponible y la demanda energética de la vivienda. [17]

Para el caso de una PEMFC, esta puede operar de manera continua mientras tenga suministro de hidrógeno o gas natural, para el caso de una SOFC se requiere un tiempo de arranque más largo y puede operar mientras tenga acceso a combustible.

Teóricamente se puede señalar que si la celda de combustible se alimenta con gas natural de la red, podrá funcionar indefinidamente durante el corte de energía, siempre que la red de gas no se vea afectada. En su defecto, si opera con hidrógeno almacenado, la duración dependerá del volumen del tanque. Un sistema residencial típico con un tanque de hidrógeno de 5-10 kg puede proporcionar energía eléctrica por varias horas o incluso días, dependiendo del consumo. [14][17]

b) Mayor seguridad.

Al no requerir combustión, las celdas de combustible reducen el riesgo de incendios y emisiones de gases tóxicos.

3. Integración con energías renovables.

a) Almacenamiento de energía.

Las celdas de combustible pueden utilizarse para almacenar el exceso de energía generado por paneles solares o aerogeneradores, permitiendo su uso cuando sea necesario.

La energía eléctrica excedente se emplea para alimentar un electrolizador, dispositivo que descompone el agua (H_2O) en sus componentes básicos: hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). [22]

La reacción química es:



Este proceso permite convertir la energía eléctrica en energía química almacenada en forma de hidrógeno. El hidrógeno generado se almacena en tanques especializados, ya sea a alta presión, en forma líquida a bajas temperaturas, o mediante materiales que lo absorben. La elección del método de almacenamiento depende de factores como el espacio disponible, la cantidad de hidrógeno y las necesidades específicas de la aplicación. [22]

4. Aplicaciones domésticas convencionales:

Cocinas eléctricas: Las celdas de combustible pueden alimentar cocinas eléctricas de alta eficiencia, ofreciendo una alternativa más limpia y segura al gas natural. A continuación se presentan algunas consideraciones necesarias para poder realizar la integración de celdas de combustible en cocinas eléctricas.[31]

a) Infraestructura necesaria.

Suministro de hidrógeno: puede provenir de tanques de almacenamiento o de un reformador que convierte gas natural en hidrógeno.

Sistema de gestión de energía: incluye inversores y controladores que regulan la distribución de electricidad generada por la celda hacia la cocina eléctrica y otros dispositivos del hogar.

Sistemas de seguridad: detectores de fugas de hidrógeno, ventilación adecuada y protocolos de emergencia son esenciales para garantizar una operación segura.

b) Integración con la cocina eléctrica.

Conexión eléctrica: la electricidad generada por la celda se conecta al sistema eléctrico de la cocina, alimentando directamente las resistencias o elementos de inducción.

Es importante señalar que si la cocina es eléctrica, la celda de combustible puede suministrar directamente la electricidad o en su defecto mediante la red eléctrica del hogar. Sin embargo, si la cocina es de gas, no se podrá utilizar hidrógeno puro como combustible (esto por seguridad y por el calentamiento de la combustión), ante ello la celda de combustible podrá suplir calor para agua caliente o energía eléctrica para equipos auxiliares.

c) Consideraciones adicionales.

Regulaciones locales: es fundamental cumplir con las normativas locales relacionadas con la instalación y operación de sistemas de hidrógeno y celdas de combustible. Algunas normas aplicables a este rubro son la NOM-002-SECRE-2010: Instalaciones de aprovechamiento de gas natural la cual tiene el objetivo principal el establecer los requisitos técnicos y de seguridad que deben cumplir las instalaciones donde se utiliza gas natural, con el fin de garantizar un uso seguro, eficiente y confiable de este combustible [39], así como la NOM-001-SEDE-2021: Instalaciones Eléctricas (Utilización) la cual establece los requisitos técnicos y de seguridad que deben cumplir todas las instalaciones eléctricas en México, tanto en edificaciones nuevas como en modificaciones o ampliaciones de las existentes.[40]

Mantenimiento: se debe establecer un plan de mantenimiento regular para asegurar la eficiencia y seguridad del sistema.

Sistemas de ventilación: el calor generado por las celdas de combustible puede utilizarse para mejorar la ventilación y la calidad del aire interior. Al igual que en el caso de cocinas eléctricas, para sistemas de ventilación es necesario tomar en cuenta algunas consideraciones para sus integración con celdas de combustible.[29]

a) Evaluación de necesidades energéticas y térmicas.

Análisis de demanda: determinar la carga eléctrica y térmica del sistema de ventilación, incluyendo ventiladores, controles y posibles sistemas de recuperación de calor.[31]

Selección de la celda de combustible: optar por una celda adecuada, como las de tipo PEMFC o SOFC, que se ajusten a las necesidades energéticas identificadas.

b) Diseño del sistema de integración.

Interconexión eléctrica: conectar la salida eléctrica de la celda al sistema de ventilación, asegurando compatibilidad de voltaje y frecuencia.

Aprovechamiento del calor residual: incorporar intercambiadores de calor para utilizar el calor generado en la celda en la precalificación del aire de ventilación o en sistemas de calefacción complementarios.

c) Infraestructura y equipos necesarios

Suministro de combustible: implementar un sistema de almacenamiento y suministro de hidrógeno o un reformador para convertir gas natural en hidrógeno.

Sistemas de control y monitoreo: instalar controles para gestionar la operación conjunta de la celda y el sistema de ventilación, incluyendo sensores de temperatura, flujo y calidad del aire.

d) Infraestructura y equipos necesarios

Verificación de funcionamiento: realizar pruebas para asegurar que la integración funciona adecuadamente, tanto en condiciones normales como en situaciones de carga máxima.[29]

Estas aplicaciones permiten a los hogares producir tanto energía eléctrica como calor de manera autónoma, lo que reduce su dependencia de la red eléctrica y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero. Aunque la adopción de esta tecnología en el sector residencial todavía enfrenta desafíos, como los altos costos iniciales y la falta de una infraestructura adecuada para el suministro de hidrógeno, su desarrollo continuo promete mejorar la eficiencia energética y fomentar la sostenibilidad en los hogares.[29][30]

3.1.2. Sector de transporte

Las celdas de combustible tienen aplicaciones significativas en el sector del transporte, ofreciendo una alternativa eficiente y ecológica a los motores de combustión interna tradicionales. Estas aplicaciones abarcan desde vehículos ligeros hasta transporte público y vehículos pesados.

1. Vehículos ligeros y automóviles.

Las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) son comúnmente utilizadas en automóviles debido a su alta eficiencia y rápida respuesta (véase la **Figura 12**). Estas celdas convierten el hidrógeno en energía eléctrica para alimentar motores eléctricos, emitiendo únicamente vapor de agua como subproducto. Fabricantes de automóviles han desarrollado vehículos impulsados por celdas de combustible, destacando su potencial para reducir las emisiones en el sector del transporte.

Principalmente sus aplicaciones se ven reflejadas en los siguientes puntos:

a) Pila de celdas de combustible. Múltiples celdas conectadas en serie para alcanzar la potencia requerida.

Normalmente se emplea celdas PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), ya que operan a bajas temperaturas, arrancan rápido y tienen buena densidad de potencia.

Para poder realizar un buen dimensionamiento del número de celdas a ocupar, se calcula la potencia eléctrica nominal en función de las demandas del vehículo. Por ejemplo podemos partir de que un auto compacto que requiere 80 kW pico y 30–50 kW en operación continua.[41]

Adicionalmente el número de celdas individuales se determina sumando sus voltajes nominales (0.6–0.7 V por celda) hasta alcanzar el voltaje del sistema (por ejemplo, 300–400 V).

b) Motor eléctrico.

Convierte la energía eléctrica generada en energía mecánica para mover el vehículo. Esta integración de la celda con el motor no es simplemente conectar “la pila al motor”, sino que requiere un sistema cuidadosamente diseñado que combina la generación de energía, el almacenamiento intermedio y el control electrónico para obtener tracción confiable, segura y eficiente.

Para una correcta integración es necesario un convertidor DC/DC el cual eleva o regula el voltaje para adaptarlo al bus de tracción del vehículo. [41]

c) Tanques de hidrógeno.

Almacenan el hidrógeno a alta presión, generalmente a 700 bares, para proporcionar una autonomía comparable a la de los vehículos convencionales.

d) Batería auxiliar o supercondensador.

Almacenan energía recuperada durante el frenado regenerativo y proporcionan potencia adicional durante aceleraciones rápidas.

Ambos entregan picos de potencia en aceleración y absorben energía del frenado regenerativo, su aplicación recae en que la celda de combustible entrega potencia constante y sostenida, pero no responde instantáneamente a cambios bruscos de demanda.

e) Sistemas de gestión y control.

Supervisan y también optimizan el rendimiento de la celda de combustible, el flujo de hidrógeno y la operación del motor eléctrico.

Básicamente una unidad de control de energía (ECU específica para FCVs) decide cuánta potencia proviene del stack, cuánta se toma o envía a la batería y cuándo operar el stack en modo carga de batería. El software prioriza que el stack trabaje en rangos de carga óptimos para prolongar su vida útil y mejorar la eficiencia del hidrógeno. [41]

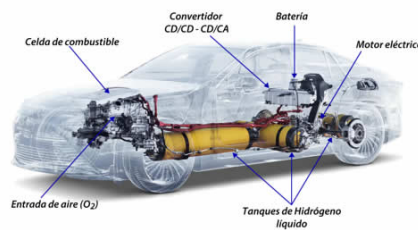


Figura 12: Toyota MIRAI. Vehículo ligero con celda de combustible. [j]

2. Transporte público.

Las celdas de combustible también se han implementado en autobuses y otros medios de transporte público (véase la **Figura 13**). Por ejemplo, en Europa, Australia, China y Estados Unidos, se han operado autobuses equipados con celdas de combustible, demostrando su viabilidad y eficiencia en operaciones urbanas. Estos autobuses ofrecen una operación silenciosa y cero emisiones contaminantes, contribuyendo a la mejora de la calidad del aire en las ciudades. [41]

Principalmente sus aplicaciones se ven reflejadas en los siguientes puntos:

a) Almacenamiento de hidrógeno.

El hidrógeno se almacena en tanques a bordo del autobús, generalmente a alta presión, garantizando una autonomía adecuada para rutas urbanas e interurbanas.

b) Generación de electricidad.

El hidrógeno almacenado se suministra a la pila de combustible, donde se combina con oxígeno del aire en una reacción electroquímica que produce energía eléctrica, calor y agua como subproducto.[32]

c) Propulsión.

La energía eléctrica generada alimenta un motor eléctrico que impulsa el autobús. Adicionalmente, muchos sistemas incorporan baterías o supercapacitores para almacenar energía recuperada durante el frenado regenerativo y proporcionar potencia adicional durante aceleraciones o pendientes pronunciadas. [32]

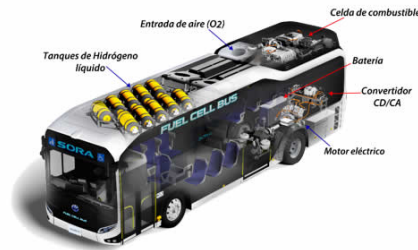


Figura 13: Toyota SORA. Transporte público con celda de combustible. [k]

3. Vehículos pesados y transporte de carga.

En el sector de transporte de carga (véase la **Figura 14**), las celdas de combustible se consideran una opción prometedora para vehículos de grandes dimensiones. Su capacidad para proporcionar energía limpia y eficiente es especialmente relevante en aplicaciones donde las baterías convencionales pueden ser menos prácticas debido al peso y la autonomía requerida.[41]

Las celdas de combustible de hidrógeno, especialmente las de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC), están emergiendo como una solución prometedora para la propulsión de vehículos pesados y el transporte de carga, ofreciendo una alternativa sostenible a los motores diésel tradicional.[41] La integración de celdas de combustible en vehículos pesados implica la adaptación de varios componentes clave:

a) Sistema de celdas de combustible.

Las celdas se agrupan en módulos para alcanzar la potencia requerida por el vehículo.

b) Tanques de almacenamiento de hidrógeno.

Diseñados para almacenar hidrógeno a alta presión, garantizando una autonomía adecuada.[32]

c) Motor eléctrico.

Convierte la energía eléctrica generada en energía mecánica para la propulsión.

d) Sistemas de gestión térmica y de energía.

Optimizan el rendimiento y la eficiencia del sistema.[32]

Empresas como Hyzon Motors y Daimler están desarrollando camiones pesados impulsados por celdas de combustible de hidrógeno, con capacidades de carga de hasta 80 toneladas y autonomías que superan los 1,000 km.



Figura 14: Mercedes Benz GenH2. Vehículo pesado con celda de combustible. [1]

4. Otros vehículos.

Los vehículos *off-road* hacen uso de celdas de combustible que les ofrecen una solución de energía limpia y eficiente para vehículos utilizados en entornos difíciles, algunos ejemplos son la maquinaria agrícola y equipos de construcción.

Las celdas de combustible de hidrógeno, especialmente las de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC), están emergiendo como una solución prometedora para la propulsión de vehículos todoterreno (*off-road*). Estos vehículos, utilizados en sectores como la agricultura, construcción y minería, requieren sistemas de propulsión robustos, eficientes y capaces de operar en entornos exigentes. La integración de celdas de combustible en vehículos *off-road* implica la adaptación de varios componentes clave[41]:

a) Sistema de celdas de combustible.

Las celdas se agrupan en módulos para alcanzar la potencia requerida por el vehículo.

b) Tanques de almacenamiento de hidrógeno.

Diseñados para almacenar hidrógeno a alta presión, garantizando una autonomía adecuada.[32]

c) Motor eléctrico.

Convierte la energía eléctrica generada en energía mecánica para la propulsión.

d) Sistemas de gestión térmica y de energía.

Optimizan el rendimiento y la eficiencia del sistema.[32]

Empresas como INEOS están desarrollando prototipos de vehículo todoterreno impulsados por celdas de combustible de hidrógeno, demostrando el potencial de esta tecnología en aplicaciones *off-road*.

3.2. Aspectos generales técnicos de las celdas. Rendimiento y energía producida

En la **Tabla 6** podemos ver los aspectos técnicos base de las celdas de combustible que se deben tomar en cuenta a la hora de elegir alguna en dependencia de la aplicación a realizar.

Tipo de celda de combustible	Temperatura de operación °C	Potencia de salida (kW)
Celda de combustible alcalina (AFC)	90-100	10-100
Celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC)	150-200	50-1000
Celda de combustible de óxido sólido (SOFC)	600-1000	>1-3000
Celda de combustible de carbonatos fundidos (MCFC)	600-700	<1-1000
Celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC)	50-100 (>100 con electrolito ≠ Nafion)	<1-250
Celda de combustible de metanol directo (DMFC)	20-90	0.001-100

Tabla 6. Aspectos técnicos generales de las celdas de combustible.

Tipo de celda de combustible	Eficiencia eléctrica (%)	Eficiencia con sistema de potencia y calor combinados
Celda de combustible alcalina (AFC)	60	>80
Celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC)	>40	>85
Celda de combustible de óxido sólido (SOFC)	35-43	<90
Celda de combustible de carbonatos fundidos (MCFC)	45-47	>80
Celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC)	53-58	70-90
Celda de combustible de metanol directo (DMFC)	53-40	80

Tabla 6.1. Aspectos técnicos generales de las celdas de combustible.

3.3. Aspectos generales económicos de las celdas

Como se ha mencionado las celdas de combustible son dispositivos que convierten la energía química de un combustible, como el hidrógeno, directamente en energía eléctrica mediante una reacción electroquímica. Esta tecnología ofrece diversas ventajas económicas y ambientales, pero también enfrenta desafíos que afectan su adopción y desarrollo. A continuación, se detallan los aspectos económicos más relevantes asociados a las celdas de combustible:

1. Costos de producción y materiales.

a) Materiales catalíticos.

Las celdas de combustible, especialmente las de tipo PEMFC, requieren el uso de catalizadores como el platino, un metal precioso de alto costo. Este requerimiento eleva significativamente el costo de producción de las celdas. [34]

El platino es un metal precioso con un precio elevado y sujeto a fluctuaciones en el mercado global, su extracción está concentrada en pocos países (Sudáfrica, Rusia y Canadá), lo que puede generar riesgos de abastecimiento incrementando su valor.

Debido a su costo, el uso de platino limita la adopción masiva de celdas de combustible en aplicaciones como transporte o generación de energía.

b) Procesos de fabricación.

La producción de celdas de combustible implica procesos de manufactura avanzados y especializados, lo que contribuye a costos de producción elevados. De manera general, el proceso de producción de una celda de combustible se resume de la siguiente manera[24]:

1) Preparación de los electrodos.

Ánodo y cátodo: se recubren materiales como el carbono con un catalizador (frecuentemente platino) para facilitar las reacciones electroquímicas. Estos recubrimientos se aplican sobre

una película portadora y luego se transfieren a una membrana polimérica. [42][43]

2) Fabricación de la membrana de intercambio protónico (PEM).

Material: se utiliza una membrana polimérica que permite el paso de protones pero bloquea electrones, esencial para la conducción iónica en la celda. [43]

3) Ensamblaje del conjunto membrana-electrodo (MEA).

Unión: los electrodos (ánodo y cátodo) se adhieren a ambos lados de la membrana PEM, formando el MEA, que es el núcleo de la celda de combustible. [43][44]

4) Incorporación de placas bipolares.

Función: estas placas distribuyen uniformemente los gases reactivos (hidrógeno y oxígeno) sobre los electrodos y conducen la corriente eléctrica generada.

5) Montaje del stack de celdas.

Apilamiento: se ensamblan múltiples MEA con sus respectivas placas bipolares en serie para alcanzar el voltaje y la potencia deseados.[42]

6) Integración de sistemas auxiliares.

Componentes adicionales: se incorporan sistemas de gestión térmica, control de flujo de gases y electrónica de control para garantizar un rendimiento óptimo y seguro de la celda de combustible.[43]

2. Inversión inicial y competitividad.

Inversión de capital: la implementación de sistemas de celdas de combustible, ya sea en aplicaciones estacionarias o móviles, requiere una inversión inicial considerable. Esto incluye costos de investigación y desarrollo, infraestructura y producción a gran escala.

Competitividad en el mercado: actualmente, las celdas de combustible enfrentan desafíos para competir económicamente con tecnologías convencionales y otras alternativas de energía limpia, como las baterías de iones de litio. Sin embargo, se espera que con avances tecnológicos y economías de escala, los costos disminuyan en el futuro. [42]

A continuación en la **Tabla 7** se presenta una comparativa económica de las celdas de combustible frente a otras fuentes de energías convencionales y renovables, basada en costos de producción, operación y viabilidad de mercado.

Fuente de energía	Costos de inversión inicial (\$/kW)	Costo de generación (\$/kW)	Eficiencia promedio	Durabilidad/Vida útil
Celdas de combustible (Hidrógeno)	1500-3000	0.10-0.25	40-85 %	5-15 años
Carbón	1000-1500	0.05-0.10	33-40 %	30-50 años
Gas Natural (Ciclo combinado)	600-1200	0.04-0.08	50-60 %	25-40 años
Energía Nuclear	5000-8000	0.08-0.15	35-45 %	40-60 años
Energía solar fotovoltaica	800-1000	0.04-0.06	15-25 %	25-30 años
Energía eólica	1200-1500	0.03-0.05	30-50 %	20-25 años

Tabla 7. Aspectos económicos generales de las celdas de combustible. [61][62][63][64]

Las celdas de combustible son una alternativa limpia y eficiente, pero todavía son costosas en comparación con fuentes renovables y fósiles. Su adopción dependerá de la reducción del precio del hidrógeno

y mejoras en la infraestructura de distribución.

3. Infraestructura y suministro de combustible.

a) Producción y distribución de hidrógeno.

El hidrógeno, principal combustible para muchas celdas de combustible, requiere una infraestructura de producción, almacenamiento y distribución que aún está en desarrollo. La falta de una red de suministro establecida incrementa los costos asociados y limita la adopción masiva de esta tecnología.[22]

b) Alternativas de combustible.

Algunas celdas de combustible pueden operar con gas natural, aprovechando la infraestructura existente; sin embargo, esto implica emisiones de carbono, aunque menores en comparación con los combustibles fósiles tradicionales.[22]

4. Perspectivas de mercado y apoyo gubernamental

a) Crecimiento del mercado.

Se proyecta un crecimiento significativo en el mercado de celdas de combustible en los próximos años, impulsado por la demanda de soluciones energéticas limpias y sostenibles.

Se anticipa que el mercado global de combustibles renovables crezca de 925.1 mil millones de dólares en 2022 a 1,713.4 mil millones de dólares en 2030, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 8.01 %. Esa transición hacia fuentes de energía más limpias está fortaleciendo el mercado de las celdas de combustible. [45]

b) Incentivos y políticas públicas.

El apoyo gubernamental, a través de subsidios, incentivos fiscales y políticas favorables, juega un papel crucial en la viabilidad económica y la adopción de las celdas de combustible.

5. Potencial de reducción de costos

a) Nuevos materiales.

El desarrollo de nuevos materiales catalíticos y membranas más eficientes puede reducir significativamente los costos. De este avance, se cuenta con los siguientes puntos a destacar:

1) Catalizadores sin metales preciosos.

Grupos de investigadores de la Universidad de Cornell han identificado una clase de derivados de metales no preciosos capaces de catalizar reacciones en pilas de combustible con una eficiencia comparable al platino, pero a una fracción de su costo.

2) Electrocatalizadores exentos de metales.

El grupo de investigación de Materiales Carbonosos y Medio Ambiente de la Universidad de Alicante ha creado un método para obtener materiales carbonosos sin metales, utilizando polianilina tratada térmicamente. Estos materiales muestran excelentes propiedades como electrocatalizadores en pilas de combustible y baterías metal-aire. [46]

3) Desarrollo de membranas avanzadas.

Investigaciones recientes se centran en mejorar la estabilidad y conductividad de las membranas PEM. Por ejemplo, se están desarrollando membranas basadas en polianilina dopada con ácido fosfórico, que muestran una mayor conductividad y estabilidad térmica, lo que podría mejorar el rendimiento de las celdas de combustible a temperaturas elevadas. [46]

b) Optimización de procesos.

La mejora de los procesos de fabricación y la integración de las celdas de combustible en sistemas más eficientes pueden reducir los costos.

c) Economías de escala.

A medida que aumenta la demanda, se espera que los costos de producción disminuyan significativamente.

6. Factores adicionales.

a) Precio del hidrógeno.

El precio del hidrógeno es un factor clave en la economía de las celdas de combustible.

b) Fluctuaciones del mercado.

Las fluctuaciones en los precios de los metales preciosos y de las materias primas pueden afectar los costos de producción.

c) Madurez tecnológica.

A medida que la tecnología de las celdas de combustible siga madurando, se espera que los costos disminuyan y la eficiencia aumente.

4. Ventajas y desventajas principales en el uso de las celdas de combustible en el sector energético

4.1. Sector residencial

4.1.1. Ventajas

a) Alta eficiencia energética.

Al aprovechar simultáneamente la generación de electricidad y calor (cogeneración), las celdas de combustible pueden alcanzar eficiencias superiores al 80 %, superando a muchas tecnologías convencionales.[47]

b) Reducción de emisiones contaminantes.

Cuando se utiliza hidrógeno como combustible, las emisiones se limitan a vapor de agua, eliminando gases de efecto invernadero y otros contaminantes asociados a combustibles fósiles, tales como el monóxido de carbono (CO) proveniente de la combustión incompleta en los calentadores, estufas, chimeneas, el dióxido de carbono (CO_2) proveniente de la combustión completa de cualquier combustible fósil, los óxidos de nitrógeno (NO_X) provenientes de la combustión a alta temperatura, especialmente en calderas y calentadores, entre otros.[47]

En consecuencia, en combinación con hidrógeno renovable, el sistema es prácticamente neutro en carbono.

c) Operación silenciosa.

A diferencia de los generadores tradicionales, las celdas de combustible funcionan de una manera casi silenciosa, lo que las hace ideales para los entornos residenciales. Lo anterior gracias a que su construcción no cuenta con partes móviles como lo pueden ser los motores o generadores mecánicos, su funcionamiento parte de reacciones electroquímicas directas, es decir, la energía se produce sin combustión ni fricción, las celdas de combustible son sistemas cerrados, por lo cual la mayoría de los procesos están encapsulados, lo que amortigua sonidos, además de que no hay movimiento turbulento de gases. [48]

d) Versatilidad en el uso de combustibles.

Pueden operar con diversos combustibles, como hidrógeno, metano o etanol, adaptándose a las fuentes disponibles en cada región.[49]

e) Independencia energética.

Al generar energía en el sitio de consumo, se reduce la dependencia de la red eléctrica así como del gas natural por lo cual se minimizan las pérdidas por transmisión.

f) Funcionamiento continuo.

A diferencia de paneles solares o turbinas eólicas, las celdas de combustible pueden operar 24/7, este funcionamiento es completamente dependiente de que exista un suministro de combustible constante.

g) Ahorro en facturas de energía.

En sistemas de cogeneración (CHP), como se ha mencionado anteriormente se aprovecha tanto la electricidad como el calor, lo que puede reducir significativamente las facturas.

Aunque no hay cifras oficiales aún sobre el impacto en facturas residenciales en México podemos tomar como referencia los casos de Japón y Alemania, países que han adoptado el uso de celdas de combustible como alternativa para un ahorro económico.

Para el caso de Japón se ha implementado el Programa ENE-FARM (programa pionero lanzado en 2009 en Japón para fomentar la adopción de sistemas de celdas de combustible residenciales que generan electricidad y calor en el hogar a partir de gas natural o hidrógeno), dicho programa tiene alrededor de 400,000 hogares que han instalado sistemas de celdas de combustible residenciales, estos usuarios reportan reducciones del 30 % al 40 % en el costo de energía total (electricidad + gas).[50]

Un caso similar es el de Alemania quien implementó el Programa *KfW* 433 (iniciativa del banco de desarrollo alemán *KfW* (*Kreditanstalt für Wiederaufbau*) para impulsar la adopción de tecnologías limpias en el sector residencial, especialmente sistemas de celdas de combustible de pequeña escala). En este programa se han reportado ahorros energéticos del 20 % al 50 %, estas cifras dependen del tamaño del sistema y el perfil de consumo.

h) Incentivos gubernamentales.

En muchos países existen subsidios, deducciones fiscales o tarifas del tipo preferenciales para quienes instalan tecnologías limpias como celdas de combustible. Para el caso específico de México no se cuenta con un programa o incentivo similar al de Japón o Alemania, sin embargo, se cuenta con iniciativas fuera del ámbito gubernamental que valen la pena mencionar.

- 1) Instituciones como el INEEL (Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias), la UNAM y el IPN han desarrollado prototipos de celdas de combustible para generación distribuida y han participado en proyectos de demostración. El INEEL ha creado una celda de combustible PEMFC de hasta 10 *kW*, pensada para uso residencial e industrial.[51]
- 2) La UNAM desarrolló un sistema que combina paneles solares y celdas de hidrógeno, con capacidad de generar hasta 50 *kWh* diarios, aunque sigue en fase de prototipo.[52]

i) Escalabilidad.

Afortunadamente en el uso de celdas de combustible dentro del sector residencial se cuenta con la facilidad de adaptación a diferentes tamaños de viviendas, desde casas unifamiliares hasta edificios multifamiliares.[29] Algunas de las características a considerar a priori a una instalación de una celda de combustible son:

- 1) Área ventilada y protegida para instalar la unidad (similar al espacio requerido para una caldera o calentador de gas)
- 2) Debe estar alejada de fuentes de calor o combustión y con fácil acceso para mantenimiento.
- 3) Es recomendable contar con un sistema de respaldo o batería de respaldo, especialmente si se busca autonomía energética.
- 4) Acceso confiable al combustible. Sistema de purificación de gas si se usa biogás.
- 5) En caso de usar hidrógeno, considerar tanques de almacenamiento presurizados y sus requisitos de seguridad.
- 6) Detección de fugas de gas o hidrógeno (sensores específicos). Lo anterior sirve como sistema de seguridad.
- 7) Ventilación forzada, en especial si el sistema está en interiores.

- 8) Sistema de apagado de emergencia y protocolos ante fallas o fugas.
 - 9) Algunos sistemas modernos tienen monitorización remota (adecuación de acuerdo al presupuesto).
 - 10) Cumplir con normas locales de construcción y seguridad.
- j) Respuesta rápida.

Principalmente las celdas de combustible PEMFC suelen responder rápidamente a las demandas energéticas del hogar sin necesidad de largos tiempos de arranque. Para el caso de las SOFC el tiempo de respuesta crece, sin embargo se tiene un margen de arranque aceptable de acuerdo a las necesidades solicitadas.

A continuación la **Tabla 8** muestra una comparativa de estas dos celdas de combustible:

Tipo de celdas	Tiempo de arranque típico	Observaciones
Celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC)	Menos de un minuto	Ideal para aplicaciones residenciales por su respuesta rápida
Celda de combustible de óxido sólido (SOFC)	Aproximadamente 30 minutos	Mejor para funcionamiento continuo

Tabla 8. Tiempo de arranque en celdas PEMFC y SOFC. [56][58]

- k) Menor necesidad de mantenimiento.

Al no tener partes móviles (en muchos tipos), presentan menos desgaste y requieren menos mantenimiento que motores de combustión. Aunque el servicio de mantenimiento no precisamente debe ser enfocado en la celda, es indispensable realizarlo periódicamente al sistema de integración eléctrico o de calefacción de la celda, por lo cual se realizan los siguientes mantenimientos:

- 1) Revisión del sistema de suministro de hidrógeno o gas verificando presión, caudal y pureza del combustible. Adicionalmente, se recomienda la revisión de reguladores, válvulas y sensores de fugas y de ser necesario limpieza o cambio de filtros de gas o reformadores (en celdas que extraen hidrógeno del gas natural).
- 2) En temas de gestión del agua y la humidificación es indispensable la limpieza del sistema de humidificación así como revisión de posibles bloqueos en líneas de agua o drenajes.
- 3) Para un mantenimiento del sistema eléctrico es indispensable la inspección de conexiones eléctricas, inversores y cableado. Revisión de baterías auxiliares (si el sistema cuenta con almacenamiento).

4.1.2. Desventajas

- a) Alto costo inicial.

La inversión necesaria para la adquisición e instalación de sistemas de celdas de combustible puede ser significativa, aunque se espera que los costos disminuyan con la adopción masiva. Para el caso específico de México se debe tomar en cuenta que los costos son más altos debido a la importación de equipos, falta de economía de escala, y ausencia de programas de apoyo financieros (subsídios). [52]

La **Tabla 9** nos permite realizar una comparación de costos iniciales para la adquisición e instalación de celdas de combustible de cuatro diferentes países, incluyendo a México.

Pais/Región	Costo total aproximado	Incluye
Japón	\$15000-\$25000 USD	Sistema + instalación + accesorios
Alemania	\$20000-\$30000USD	Pre-subsidio, dependiendo del tamaño
Estados Unidos	\$20000-\$35000 USD	Aún con oferta limitada
México	25000–40000 USD	Sin subsidios ni fabricación local significativa

Tabla 9. Costo inicial para la instalación celdas de combustible. [65][66]

b) Infraestructura limitada para el hidrógeno.

La distribución y almacenamiento de hidrógeno aún enfrenta desafíos, lo que puede limitar su disponibilidad para aplicaciones residenciales. [52] El caso de mayor dificultad es sin duda el tema del almacenamiento, principalmente en los tipos de almacenamiento, teniendo como resultado la **Tabla 10**:

Tipo de almacenamiento	Presión típica	Características
Almacenamiento gaseoso	200-700 bar	Más común en residencias, especialmente en tanques compuestos tipo IV (fibra de carbono)
Almacenamiento líquido	-253°C a presión atmosférica	Muy poco común en zonas residenciales por alto costo y riesgo criogénico
Hidruros metálicos	Baja presión (20-30 bar)	Más seguros pero costosos; aún en desarrollo para viviendas

Tabla 10. Almacenamiento del hidrógeno y presión típica. [67][68]

Adicionalmente, es necesario integrar un sistema de seguridad que cumpla básicamente:

- 1) Sensores de detección de fugas de hidrógeno en áreas cercanas al tanque y al equipo de conversión.
- 2) Ventilación natural o forzada, especialmente en espacios cerrados.
- 3) Sistema de apagado de emergencia automático.
- 4) Separación física del tanque respecto a áreas habitables o fuentes de ignición.
- 5) Cercas, casetas o encapsulados para el tanque, en caso de instalación exterior.

c) Tiempo de arranque prolongado.

Algunas tecnologías, requieren tiempos de arranque de hasta 24 horas, lo que puede ser una limitación en situaciones que demandan energía inmediata, por lo cual se opta por las dos más aplicables. [30]

d) Tecnología en desarrollo.

Aunque prometedoras, muchas aplicaciones residenciales de celdas de combustible aún se encuentran en etapas de desarrollo o pruebas piloto, lo que puede implicar incertidumbres en cuanto a su rendimiento y durabilidad a largo plazo. [30]

Como se mencionó para el caso de México no se cuenta con subsidios que permitan la exploración en el ámbito de las celdas de combustible a escala de manufactura, por lo cual la dependencia de las celdas de combustible recae en importaciones de países pioneros en esta tecnología.

4.2. Sector transporte

4.2.1. Ventajas

1. Cero emisiones locales

Los vehículos con celdas de combustible solo emiten vapor de agua y calor, contribuyendo significativamente a la reducción de la contaminación urbana. Un estudio publicado en *Renewable and Sustainable Energy Reviews* indica que los vehículos con celdas de combustible de hidrógeno consumen entre un 29 % y un 66 % menos de energía y generan aproximadamente entre un 31 % y un 80 % menos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en comparación con vehículos convencionales a gasolina o diésel.[32]

Aunque los vehículos con celdas de combustible de hidrógeno no emiten contaminantes durante su operación, las emisiones asociadas a su uso dependen del método de producción del hidrógeno. Si el hidrógeno se produce a partir de fuentes renovables, las emisiones del ciclo de vida son mínimas. Algunos de los métodos más ocupados para la obtención del hidrógeno son:

a) Reformado con vapor de gas natural (*Steam Methane Reforming, SMR*).

1) Descripción:

Método más común. Consiste en reaccionar metano (CH_4) con vapor de agua a alta temperatura (700–1,000°C) para producir hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO). [37]

2) Reacción principal:



Luego, el CO puede reaccionar con más agua para formar CO_2 y más H_2 (reacción de desplazamiento de gas de agua).

3) Ventajas.

Bajo costo, tecnología madura.

4) Desventajas.

Alta emisión de CO_2 (hidrógeno "gris").

b) Gasificación de carbón o biomasa.

1) Descripción:

Se calienta carbón o biomasa en presencia de vapor y una cantidad limitada de oxígeno. Se genera un gas de síntesis (syngas) compuesto por H_2 , CO y CO_2 . [37]

2) Reacción básica:



3) Ventajas.

Posibilidad de usar residuos orgánicos o carbón abundante.

4) Desventajas.

Emisiones altas de CO_2 ; si se captura el carbono, se produce hidrógeno azul.

c) Electrólisis del agua.

1) Descripción:

Se divide el agua (H_2O) en hidrógeno y oxígeno usando electricidad. Si la electricidad proviene de fuentes renovables, el hidrógeno resultante se llama verde.[8]

2) Reacción:



3) Tipos de electrólisis:

a' Electrólisis alcalina.

Tecnología madura y económica.

b' Electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM).

Más eficiente, mejor respuesta dinámica, pero más costosa.

c' Electrólisis de óxido sólido (SOFC).

Alta temperatura, aún en desarrollo.

4) Ventajas.

Cero emisiones si se usa energía renovable.

5) Desventajas.

Alto costo energético (especialmente si se usa electricidad no renovable).

2. Rápido repostaje.

El tiempo de recarga de hidrógeno es comparable al de los vehículos de combustión interna, oscilando entre 3 y 7 minutos, lo que supera en conveniencia a los tiempos de carga de los vehículos eléctricos a batería.[53]

El proceso de recarga de hidrógeno en vehículos es similar al repostaje de gasolina o diésel, pero con diferencias importantes debido a las propiedades del hidrógeno y los requisitos de seguridad y presión.[53]

Para el caso de vehículos grandes como autobuses el nivel de presión es de 350 bar (5,000 psi) y para el caso de automóviles ligeros el nivel de presión es de 700 bar (10,000 psi). Para llevar a cabo el proceso de recarga es necesario conectar una boquilla especial hermética al puerto de hidrógeno del vehículo, el sistema de recarga utiliza un acoplamiento estandarizado (ISO 17268) que asegura una conexión segura sin fugas en donde el dispensador está equipado con sensores que detectan identidad del vehículo, presión del tanque y temperatura.[53]

Adicionalmente, el hidrógeno debe estar altamente comprimido para entrar en los tanques del vehículo y para evitar el sobrecalentamiento durante el llenado rápido, el gas se enfría previamente (hasta -40°C aprox.).

El proceso de transferencia de hidrógeno del dispensador al tanque debe ocurrir a una presión controlada y de existir un sistema de llenado por etapas dicho sistema ajusta el caudal para evitar sobrepresión. Finalmente, cuando el tanque está lleno o alcanza el límite de presión, el sistema se detiene automáticamente.

3. Mayor autonomía.

Modelos actuales ofrecen autonomías superiores a los 500 km, adecuándose a trayectos largos sin necesidad de recargas frecuentes.[53]

4. Operación silenciosa y suave.

La ausencia de partes móviles en el sistema de propulsión reduce el ruido y las vibraciones, mejorando la experiencia de conducción y disminuyendo la contaminación acústica.

4.2.2. Desventajas

1. Infraestructura limitada.

La escasez de estaciones de hidrógeno, restringe la adopción masiva de celdas de combustible. Actualmente, México cuenta con una infraestructura limitada de estaciones de hidrógeno para vehículos. Las estaciones existentes son principalmente de uso privado. [54] En cuanto a estaciones públicas, la primera se inauguró en la Ciudad de México en 2012 como parte de un proyecto piloto. Sin embargo, la información actualizada sobre su operación y existencia es limitada. Según estimaciones, para el año 2020, México contaba con más de 12 estaciones de hidrógeno distribuidas en ciudades como Monterrey, Guadalajara y Querétaro. Se proyecta que para finales de 2025, el país cuente con al menos 25 estaciones de hidrógeno operativas.

2. Costos elevados.

Los vehículos con celdas de combustible suelen tener precios iniciales altos, en parte debido al uso de materiales costosos como el platino en las celdas. Tenemos entonces la **Tabla 11**

Categoría	Autos convencionales (Gasolina)	Autos con celdas de combustible (Hidrógeno)
Precio base promedio	\$20,000 – \$35,000 USD	\$50,000 – \$65,000 USD
Modelos populares	Toyota Corolla, Honda Civic, Ford Focus	Toyota Mirai, Hyundai Nexo, Honda Clarity FCEV
Tiempo de recarga/llenado	3–5 minutos	3–5 minutos
Emisiones directas	CO ₂ y otros gases contaminantes	Cero (solo vapor de agua)
Mantenimiento	Moderado	Bajo (menos piezas móviles)
Disponibilidad en México	Muy alta	Muy baja (principalmente importación/piloto)
Infraestructura disponible	Alta (gasolineras en todo el país)	Muy baja (pocas estaciones de hidrógeno)
Autonomía promedio	500 – 800 km	500 – 650 km
Costo por km (combustible)	\$0.10 – \$0.15 USD/km	\$0.12 – \$0.20 USD/km

Tabla 11. Comparativa autos convencionales vs autos con celdas de combustible. [61][62][63][64]

3. Desafíos en almacenamiento y transporte.

El hidrógeno requiere almacenamiento a alta presión y presenta riesgos asociados a su inflamabilidad, lo que complica su manejo y distribución.

4. Competencia con vehículos eléctricos a batería (BEV).

Los BEV cuentan con una infraestructura de carga más desarrollada y costos operativos más bajos, lo que los hace más atractivos para muchos consumidores.

4.3. Principales limitaciones

4.3.1. Alto costo del hidrógeno y de la tecnología

1. Costo del hidrógeno.

La **Tabla 12** representa una comparativa referente a los precios de los principales combustibles.

Combustible	Precio promedio	Unidad
Gasolina Magna (regular)	\$24.30	Litro
Gasolina Premium	\$25.73	Litro
Diésel	\$26.15	Litro
Gas Natural Vehicular (GNV)	\$12.00-\$14.00	Cm^3
Hidrógeno (H_2)	\$180-\$200	Kg

Tabla 12. Comparativa de los costos de los combustibles.

2. Costo de la tecnología.

Aunque los costos de las celdas de combustible han logrado disminuir, aún representan una inversión considerable en comparación con tecnologías convencionales.

4.3.2. Infraestructura limitada para producción y distribución de hidrógeno

1. Distribución y almacenamiento.

El hidrógeno es altamente inflamable y requiere sistemas de almacenamiento y transporte especializados, lo que incrementa los costos y presenta desafíos de seguridad.

4.3.3. Desafíos técnicos y operativos

1. Sensibilidad a contaminantes.

Los catalizadores de platino utilizados en las celdas PEM son susceptibles a ser envenenados por monóxido de carbono, lo que puede reducir la eficiencia y la vida útil de la celda.[55]

Esta sensibilidad se relaciona principalmente con la contaminación del gas de entrada (hidrógeno o aire/oxígeno) y afecta especialmente al catalizador (generalmente platino) y a la membrana polimérica. A continuación, se describe esta sensibilidad[55]:

a) Contaminantes en el hidrógeno (ánodo).

1) Monóxido de carbono (CO).

Es uno de los contaminantes más perjudiciales. Se adhiere fuertemente al platino, por lo cual bloquea los sitios activos para la reacción de oxidación del hidrógeno. Incluso concentraciones tan bajas como 10 ppm pueden causar una significativa pérdida de rendimiento.

2) Azufre (H_2S , SO_2).

También se adsorben sobre el catalizador y son difíciles de remover. Pueden causar desactivación irreversible.

3) Amoníaco (NH_3) y compuestos nitrogenados.

Pueden contaminar la membrana por así afectar su conductividad protónica y envenenar el catalizador.

4) Hidrocarburos.

Algunos hidrocarburos presentes en el reformado del hidrógeno pueden descomponerse y generar CO o carbonillas que envenenan el ánodo.

b) Contaminantes en el aire/oxígeno (cátodo).

1) Óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x).

Pueden reaccionar con la membrana y formar ácidos que dañan la estructura polimérica.

2) Partículas y contaminantes del aire (ozono, cloro, etc).

Pueden degradar tanto la membrana como el catalizador catódico.

c) Contaminación de la membrana.

1) Iones metálicos o impurezas del agua (como Na^+ , Ca^{2+}).

Pueden reducir la conductividad protónica de la membrana.

2) Peróxidos o radicales libres generados en la operación.

Atacan la membrana y provocan su degradación química.

4.3.4. Dependencia de políticas y subsidios gubernamentales

1. Apoyo gubernamental.

La viabilidad económica de las celdas de combustible a menudo depende de subsidios y políticas de apoyo. Cambios en las prioridades gubernamentales pueden afectar la continuidad de proyectos y la inversión en esta tecnología.

5. Recomendaciones para la incorporación del uso de las celdas de combustible en el sector energético mexicano

5.1. En el sector residencial

1. Evaluación técnica y selección de tecnología.

a) Tipos de celdas de combustible adecuadas para el hogar.

PEM (*Proton Exchange Membrane*): Ideales para aplicaciones residenciales debido a su rápida respuesta y operación a bajas temperaturas.

SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*): Ofrecen alta eficiencia, además son adecuadas para sistemas de cogeneración (CHP), proporcionando electricidad y calor simultáneamente.

b) Integración con sistemas existentes.

Cogeneración (CHP): Aprovecha el calor residual para calefacción y agua caliente, aumentando la eficiencia total del sistema hasta un 80–95 %.

Sistemas híbridos: Combina celdas de combustible con paneles solares o baterías para optimizar el suministro energético y reducir la dependencia de la red eléctrica. Esta integración tiene como objetivo final el aprovechar lo mejor de ambas tecnologías, por un lado se tiene la energía renovable intermitente del sol y por el otro la generación continua y controlada de electricidad a partir de hidrógeno, para así poder cubrir la demanda energética de la vivienda de forma estable, minimizando dependencia de la red eléctrica y reduciendo emisiones.

En un esquema típico, los paneles solares fotovoltaicos (FV) generan electricidad durante el día, mientras que la celda de combustible tiene la función de actuar como fuente de respaldo o suplemento. Básicamente el proceso de integración es muy similar a lo ya mencionado con anterioridad respecto a la cogeneración CHP.

Para poder realizar este proceso, es necesario analizar los componentes principales para unir las celdas de combustible con paneles solares:

- 1) Paneles solares fotovoltaicos (FV) los cuales generan energía eléctrica DC.
- 2) Controlador de carga / inversor híbrido el cual tiene la función de convertir la energía de las celdas de DC a AC además de gestionar la conexión con la celda de combustible y la red.
- 3) Celda de combustible (PEMFC o SOFC) el cual produce electricidad y calor a partir de hidrógeno.
- 4) Electrolizador (opcional) el cual es el encargado de convertir electricidad excedente en hidrógeno por electrólisis.
- 5) Sistema de almacenamiento de hidrógeno que pueden ser tanques a alta presión o hidruros metálicos.
- 6) Sistema de gestión de energía (EMS) que al final es un software que tiene la capacidad de decidir cuándo usar energía solar, cuándo activar la celda de combustible y cuándo almacenar o consumir hidrógeno.

Finalmente se tiene dos formas de integración:

- 1) Sin almacenamiento de hidrógeno (respaldo directo).

Los paneles solares alimentan directamente la vivienda.

Cuando la radiación solar es insuficiente (noche o días nublados), la celda de combustible entra en operación usando hidrógeno suministrado externamente (tanques recargables).

Ventaja: Menor complejidad.

Desventaja: Dependencia de logística de hidrógeno.

- 2) Con producción y almacenamiento de hidrógeno en sitio.

Los paneles solares producen energía para la vivienda.

El excedente alimenta un electrolizador que produce hidrógeno.

El hidrógeno se almacena en tanques y se usa en la celda de combustible cuando no hay sol.

Ventaja: Mayor autonomía energética.

Desventaja: Inversión inicial alta y requisitos de seguridad para el hidrógeno.

2. Consideraciones económicas y financieras.

- a) Costos iniciales y retorno de inversión.

Inversión inicial: Los sistemas de celdas de combustible pueden tener costos elevados de instalación, pero ofrecen ahorros a largo plazo en facturas de energía.

Los ahorros económicos que una vivienda puede obtener al integrar celdas de combustible ya sea en un sistema híbrido CHP o combinadas con paneles solares provienen de tres áreas clave:

- 1) Reducción de la factura eléctrica.
- 2) Disminución de gastos en calefacción/agua caliente.
- 3) Venta de excedentes o incentivos fiscales (caso muy raro).

Para el caso de una aplicación en México y considerando un costo promedio por kWh en un caso extremo de \$5, el ahorro se estima entre \$30,000 y \$75,000, dependiendo de la zona.

Del mismo modo, si se realiza una comparación de la integración de celdas de combustible con sistemas híbridos CHP y celdas fotovoltaicas, tenemos:

- 1) Ahorros en calefacción y agua caliente (CHP).

En modo CHP, la celda de combustible aprovecha el calor residual para calentar agua sanitaria o apoyar la calefacción.

Esto puede sustituir calentadores eléctricos o de gas, ahorrando entre 15 % y 35 % en gasto térmico.

Para una vivienda promedio en clima templado de México que genera un gasto de \$3,000 al año en gas LP para agua caliente, el ahorro es de entre \$450 a los \$1,050 al año solo por el uso térmico.

2) Ahorros en combinación con paneles solares.

Los paneles solares reducen consumo de red en horas de sol.

El excedente solar puede alimentar un electrolizador que produce hidrógeno para la celda de combustible.

Esto permite cobertura total de la demanda eléctrica incluso en la noche, reduciendo la factura eléctrica a casi cero.

Incentivos y subsidios: Explorar programas gubernamentales que ofrezcan créditos fiscales, subvenciones o tarifas preferenciales para energías limpias.

Un punto importante es recalcar que si hay incentivos públicos para tecnologías renovables como paneles solares en cuanto a temas de deducciones fiscales, financiamiento vía FIDE, hipoteca verde, *net metering*, descuentos locales de predial, etc. Sin embargo no existen incentivos específicos para celdas de combustible residenciales (ya sea como sistemas CHP o híbridos con solar).

b) Modelos de negocio alternativos.

Arrendamiento o financiamiento: opciones que permiten a los propietarios acceder a la tecnología sin desembolsos iniciales significativos.

Comunidades energéticas: implementar sistemas compartidos entre varias viviendas para reducir costos y maximizar la eficiencia.

3. Infraestructura y suministro de combustible.

a) Disponibilidad de hidrógeno o gas natural.

Infraestructura existente: se debe evaluar la disponibilidad de redes de gas natural o estaciones de hidrógeno en la zona.

Es importante mencionar que en México la evaluación de la disponibilidad de redes de gas natural y de estaciones de hidrógeno recae en distintos actores según el tipo de infraestructura, pero todos se enmarcan en la regulación y coordinación de la Secretaría de Energía (SENER). Tenemos entonces para el gas natural:

- 1) SENER (Secretaría de Energía). Define la política energética, planes de expansión de infraestructura y lineamientos para distribución y transporte de gas natural.
- 2) CRE (Comisión Reguladora de Energía). Otorga permisos de transporte, distribución y almacenamiento de gas natural; regula tarifas y condiciones técnicas.
- 3) CENAGAS (Centro Nacional de Control del Gas Natural). Opera el Sistema de Transporte y Almacenamiento Nacional Integrado de Gas Natural (SISTRANGAS) y evalúa la disponibilidad de capacidad.

- 4) Gobiernos estatales y municipales: pueden integrar planes de expansión en programas de desarrollo urbano y permisos de obra.

Para el caso de hidrógeno:

- 1) SENER (Secretaría de Energía). Establece la Estrategia Nacional de Hidrógeno y políticas para su despliegue.
- 2) CRE (Comisión Reguladora de Energía). Regula el almacenamiento, transporte y expendio de hidrógeno como combustible.
- 3) ASEA (Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente). Evalúa aspectos de seguridad industrial y ambiental para estaciones de hidrógeno.
- 4) Gobiernos estatales y municipales: gestionan licencias de uso de suelo y construcción.

Producción local de hidrógeno. Considerar la instalación de electrolizadores domésticos que generen hidrógeno a partir de fuentes renovables.

Es importante señalar que quienes instalen deben ser empresas o contratistas certificados en instalación de sistemas de generación distribuida y manejo de gases a presión. Además deben demostrar experiencia en instalación de electrolizadores, tuberías y tanques según normas de seguridad. Así como fabricantes autorizados que ofrecen el equipo con servicio de instalación y certificación de seguridad.

b) Seguridad y normativas.

Regulaciones locales. En este punto se debe cumplir con códigos y estándares establecidos para la instalación y operación segura de sistemas de celdas de combustible.

Capacitación. Adicionalmente se debe asegurar que el personal encargado de la instalación y mantenimiento esté debidamente capacitado.

4. Mantenimiento y operación.

a) Requisitos de mantenimiento.

Inspecciones periódicas. Realizar revisiones regulares para garantizar el funcionamiento óptimo del sistema.

Reemplazo de componentes. Sustituir partes consumibles según las recomendaciones del fabricante.

La **Tabla 13** resume la frecuencia en tiempo de las inspecciones a realizar:

Componente	Inspección visual	Mantenimiento preventivo	Mantenimiento mayor
Celda de combustible	6 meses	12 meses	3-15 años
Paneles solares	6 meses	12 meses	10-15 años
Electrolizador	3-6 meses	12 meses	5-10 años
Tanques de H_2	3-6 meses	12 meses	5-10 años
Sistema CHP térmico	6-12 meses	12 meses	Según el desgaste

Tabla 13. Frecuencia de mantenimiento preventivo y mayor .

b) Monitoreo y control.

Sistemas inteligentes. Implementar tecnologías que permitan el monitoreo en tiempo real y la optimización del rendimiento energético.

5. Educación.

a) Información al consumidor.

Campanñas educativas. Difundir información sobre los beneficios y funcionamiento de las celdas de combustible para fomentar su adopción.

Demostraciones prácticas. Organizar eventos o visitas a instalaciones existentes para mostrar la tecnología en funcionamiento.

b) Formación técnica.

Programas de capacitación. Desarrollar cursos y certificaciones para técnicos e instaladores especializados en celdas de combustible.

6. Adaptación a normativas y políticas públicas.

a) Incentivos gubernamentales.

Políticas de apoyo. Promover leyes y regulaciones que faciliten la adopción de tecnologías limpias en el sector residencial (este punto corresponde directamente al gobierno).

Subsidios y créditos fiscales: Implementar mecanismos financieros que reduzcan la carga económica para los usuarios finales (de igual forma es una consideración que debe analizar y/o aplicar el gobierno).

b) Estándares y certificaciones.

Normas de calidad. Establecer estándares para garantizar la eficiencia y seguridad de los sistemas instalados.

Certificaciones. Fomentar la obtención de certificaciones que avalen la competencia de los profesionales involucrados.

5.2. Incorporación en el sector transporte

1. Infraestructura de hidrógeno.

a) Despliegue estratégico de estaciones de recarga.

Es esencial establecer estaciones de hidrógeno cada 200 km en corredores logísticos clave, con capacidades de al menos 6 toneladas diarias, para satisfacer las necesidades del transporte pesado.

Partiendo que los autos y autobuses con celda de combustible (FCEV) actuales, como el Toyota Mirai o el Hyundai Nexo, tienen autonomías reales de 500–650 km, el hecho de que se coloquen estaciones cada 200 km garantiza redundancia, es decir, aunque un vehículo pueda recorrer 600 km, la existencia de una estación cada 200 km permite asegurar opciones intermedias en caso de desvíos, rutas montañosas, tráfico o emergencias. Adicionalmente esto permite tener soporte para diferentes tipos de vehículos como lo pueden ser camiones pesados y autobuses los cuales suelen

tener autonomías menores (300–400km).

Básicamente se puede decir que la distancia de 200km es un estándar internacional para cobertura confiable y segura en corredores de hidrógeno, y que la capacidad de 6 toneladas al día asegura que cada estación pueda atender tanto a vehículos ligeros como pesados, garantizando continuidad de servicio y viabilidad económica.

b) Producción descentralizada.

Implementar estaciones con producción in situ mediante electrólisis o reformado de metano es viable para áreas remotas, mientras que en zonas urbanas se favorece el suministro mediante camiones cisterna o gasoductos.

c) Reducción de costos.

La construcción de estaciones de hidrógeno oscila entre 1 y 4 millones de dólares; por ello, se recomienda la inversión pública y alianzas público-privadas para acelerar su desarrollo.

Si el gobierno asume el 30–50 % del costo, el inversionista reduce drásticamente su periodo de recuperación. Esto evita que los operadores carguen todo el gasto en el precio del hidrógeno, acelerando la adopción. Además el gobierno puede imponer exenciones o reducciones de IVA e ISR sobre equipos e importaciones de compresores, tanques criogénicos y electrolizadores.

Se puede decir entonces que si el gobierno apoya la construcción de estaciones de hidrógeno y no solo reduce el costo directo de levantar la infraestructura, sino que también abarata el financiamiento, agiliza trámites, comparte obras complementarias y mitiga el riesgo se puede bajar el costo total de construcción en un 30 % hasta un 50 % y permite acortar el tiempo de retorno de inversión.

2. Estandarización y seguridad.

a) Normativas internacionales.

Adoptar estándares como ISO 19880 (estaciones de repostaje), esta serie de normas establecen los requisitos y guías de seguridad, diseño, construcción, operación y mantenimiento para estaciones de repostaje de hidrógeno, principalmente orientadas a vehículos ligeros y pesados.

También se puede adoptar la ISO 14687 (calidad del hidrógeno) la cual es una norma internacional que establece los requisitos de calidad del hidrógeno destinado a aplicaciones en pilas o celdas de combustible.

Códigos de seguridad.

Implementar códigos como NFPA 2 quien es un estándar desarrollado por la *National Fire Protection Association (NFPA)* que regula la producción, almacenamiento, distribución y uso seguro del hidrógeno. Cubre aspectos como:

- 1) Diseño y construcción de instalaciones de hidrógeno.
- 2) Seguridad contra incendios y explosiones.
- 3) Manejo de tanques a presión y sistemas criogénicos.
- 4) Procedimientos operativos seguros y mantenimiento.

- 5) Requisitos para estaciones de hidrógeno, electrolizadores así como aplicaciones industriales y comerciales.
- 6) Su objetivo es minimizar riesgos para personas, propiedades y el medio ambiente durante el manejo de hidrógeno.

También se puede aplicar las regulaciones de la OSHA (29 CFR 1910.103) la cual regula la seguridad en el lugar de trabajo para el manejo de hidrógeno.

3. Políticas públicas e incentivos.

a) Incentivos económicos.

Establecer créditos fiscales, subsidios y programas de financiamiento para la producción de hidrógeno verde y la adquisición de vehículos con celdas de combustible fomenta su adopción (trabajo del gobierno y de la iniciativa privada).

b) Regulaciones claras.

Desarrollar marcos regulatorios específicos para el hidrógeno, diferenciándolo de otros combustibles, facilita su integración en el mercado (trabajo del gobierno y de la iniciativa privada).

4. Formación y capacitación.

a) Programas educativos.

Es fundamental establecer programas de formación técnica en tecnologías de hidrógeno para crear una fuerza laboral especializada.

b) Conciencia pública.

Campañas informativas sobre los beneficios y seguridad del hidrógeno pueden mejorar la aceptación social y reducir resistencias.

5. Aplicaciones estratégicas.

a) Transporte público.

En autobuses urbanos, las celdas de combustible ofrecen ventajas en tiempos de recarga y autonomía, aunque deben evaluarse frente a alternativas eléctricas según el contexto.

6. Producción sostenible de hidrógeno.

a) Hidrógeno verde.

Priorizar la producción de hidrógeno mediante electrólisis utilizando fuentes renovables garantiza una reducción real de emisiones.

b) Diversificación de fuentes.

Explorar múltiples métodos de producción y almacenamiento de hidrógeno mejora la resiliencia y sostenibilidad del suministro.

7. Evaluación económica y ambiental.

a) Análisis de ciclo de vida (LCA).

Análisis de ciclo de vida (LCA): Realizar evaluaciones completas del ciclo de vida de los vehículos con celdas de combustible permite identificar impactos ambientales y económicos, guiando decisiones informadas. Este proceso básicamente analiza lo siguiente:

1) Extracción y procesamiento de materiales.

Obtención de metales (platino para catalizadores, acero, aluminio, materiales para baterías y pilas).

Producción de componentes de la celda de combustible y tanque de hidrógeno.

2) Fabricación del vehículo y de la celda de combustible.

Consumo energético y emisiones asociadas a la fabricación.

Procesos específicos para la producción de celdas PEMFC o SOFC.

3) Producción y suministro del hidrógeno.

Evaluación del método de producción: reformado de gas natural, electrólisis con energías renovables, etc.

Impacto de la generación, compresión, almacenamiento y transporte del hidrógeno.

4) Uso del vehículo.

Consumo energético y emisiones durante la operación.

Comparación con vehículos convencionales (gasolina, diésel) y eléctricos con baterías.

5) Mantenimiento y reparación.

Recursos y energía asociados al mantenimiento durante la vida útil.

6) Fin de vida y reciclaje.

Procesos de disposición o reciclaje de componentes, especialmente catalizadores y tanques de hidrógeno.

Recuperación de materiales valiosos.

6. Conclusiones

El presente trabajo presentó una investigación referente a la clasificación de las celdas de combustible en donde se analiza su estructura de construcción. De esta investigación se pudo determinar que contamos con las celdas de membrana polimérica como lo son las Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC); Direct Methanol Fuel Cell (DMFC); Direct Ethanol Fuel Cell (DEFC); estas celdas suelen ser clasificadas como de combustible de baja temperatura.

Por otro lado tenemos la celda de combustible alcalina o AFC, esta celda está clasificada como de combustible de mediana temperatura. También tenemos la celda de ácido fosfórico o mejor conocida como PAFC la cual es clasificada como de combustible de mediana temperatura. Del mismo modo tenemos la celda de combustible de carbonatos fundidos o MCFC, estas celdas se encuentran clasificadas como de combustible de alta temperatura.

Por último pero no menos importante tenemos la celda de combustible de óxido sólido o SOFC la cual al igual que la celda anterior es clasificada de alta temperatura. Del análisis de esta variedad de celdas se determinó que la estructura básica de armado parte de un electrolito el cual es una sustancia, ya sea sólida o líquida que permite la conducción de iones a través de su estructura, este material es variable por cada celda, además del estado o composición del mismo (sólido o líquido). Los electro-catalizadores son otros elementos que desempeñan un papel fundamental en el funcionamiento de la celda ya que son responsables de facilitar las reacciones electroquímicas esenciales, del mismo modo que el electrolito, los electro-catalizadores son variables y transportan un tipo de ion en específico para su operación.

Entonces podemos decir que, si bien se cuenta con diferentes tipos de celdas, no todas están facultadas o enfocadas para tener aplicación en los sectores residencial y de transporte en México, es por ello que es necesario realizar una comparativa de las celdas; justamente en este punto podemos determinar que es fundamental determinar qué tecnología es la más adecuada para cada caso específico de aplicación. Estas celdas de manera general cuentan con la capacidad de generar energía eléctrica desde 1 hasta 10 MW, por lo cual la aplicación es variable y la elección de la celda también.

Por ejemplo, en el sector residencial básicamente lo que se busca es tener un sistema de cogeneración capaz de producir energía eléctrica y energía calorífica para un hogar es por ello que encontramos celdas de combustible en sistemas de microgeneración o micro-CHP. Aquí las celdas de combustible de membrana de electrolito polimérico (PEMFC) y las celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) son las más adecuadas para integrarlas a los sistemas antes mencionados. Las razones de su elección son variadas, desde la eficiencia con la que cuentan, el tamaño y capacidad de generación, el combustible utilizado para su operación principalmente.

Las aplicaciones domésticas convencionales las encontramos en las cocinas eléctricas que nos permitirán cambiar el gas natural o el gas LP por celdas. Los sistemas de ventilación también cuentan con presencia de celdas de combustible pues el calor generado por estas puede utilizarse para mejorar la ventilación y la calidad del aire interior del hogar.

Es importante señalar que por el momento y para el caso específico de México, la integración de celdas de combustible en hogares no representa una transición completa en temas de generación eléctrica, más bien, se puede clasificar como sistemas de respaldo.

Lo anterior debido a que la inversión necesaria para la adquisición e instalación de sistemas de celdas de combustible puede ser significativa, sumado a ello es importante mencionar que la distribución y almacenamiento de hidrógeno aún enfrenta desafíos debido a la poca infraestructura disponible para este combustible teniendo como consecuencia inmediata la poca o nula disponibilidad. Básicamente es una tecnología en desarrollo y precisamente por encontrarse en dicha fase existen incertidumbres entre los posibles adquirentes o usuarios en cuanto a su rendimiento y durabilidad a largo plazo.

Para el caso del sector de transporte las celdas de combustible tiene como fin ofrecernos a los clientes una alternativa eficiente y a la par ecológica en comparación con los motores de combustión interna tradicionales. Aquí las celdas Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) se llevan el puesto de ser las privilegiadas para estar presentes en las pilas de celdas de combustible por el simple hecho de operar a bajas temperaturas y tener una buena densidad de potencia, se puede destacar también que son celdas de alta eficiencia y rápida respuesta a las demandas de los automóviles, su aplicación esta presente en vehículo ligeros y automóviles.

Si nos vamos al transporte público se han implementado en autobuses, casos en Europa, Australia, China y Estados Unidos, han demostrado la operación de autobuses equipados con celdas de combustible, demostrando su viabilidad y eficiencia en operaciones urbanas. Un caso más que puede ser analizado sería el de vehículos pesados y transporte de carga donde hay acercamientos para la aplicación de celdas con el fin de separar el uso de diésel.

Si bien las aplicaciones para ambos sectores son variadas, un factor a considerar es que la aplicación en México no es tan sencilla, como pudimos observar, países como Japón, Estados Unidos, China han adoptado el uso de celdas en estos sectores, incluso han sido participes en el desarrollo de regulaciones y/o normas que faciliten la investigación así como la aplicación de esta tecnología, este caso no es el de nuestro país ya que las aproximaciones de aplicación quedan estancadas en pruebas piloto o casos de excepción. Es entendible que exista esta disparidad entre naciones y que exista un rezago en México pues el hecho de apostar por una nueva tecnología que inicialmente sea de respaldo y que busque trascender para posteriormente ser una aplicación convencional implica grandes inversiones económicas tanto del gobierno como de la iniciativa privada, que se deban también aplicar normativas o leyes que fomenten el apoyo a empresas que busquen entrar a la transición a energías más limpias, también implica realizar la capacitación adecuada al personal de ingeniería y técnicos en el manejo de las celdas de combustible y su aplicación a los sectores que se analizaron en este trabajo.

La instalación de la correspondiente infraestructura juega un papel sumamente importante sobre todo en la aplicación del sector de transporte, la necesidad de contar con centros de carga para vehículos que involucren celdas de combustible en el mejor de los escenarios donde se pueda dar el paso a la transición determinará la viabilidad de la misma ya que sin una correcta coordinación en la instalación de centros de carga no permitirá que la presencia de estos nuevos vehículos sea fácil y termine por ser una inversión costosa y con pocos o nulos beneficios.

Todos estos factores económicos básicamente se pueden resumir en costos de producción y materiales para el caso de la fabricación de las celdas; inversión inicial y competitividad para el caso donde ya se cuenta con esta tecnología pero se va adentrando al terreno de las primeras aplicaciones; infraestructura y suministro de combustible para poder mantener en pie la constante aplicación de celdas y sobre todo el sustento de las demandas que el público con el paso del tiempo vayan requiriendo; prospectivas de mercado y apoyo gubernamental para tener en cuenta el futuro que del crecimiento del mercado o los incentivos y políticas públicas que lleguen a requerirse; finalmente los factores adicionales los cuales pueden verse principalmente en el precio del hidrógeno, las fluctuaciones del mercado y la madurez propia de la tecnología y su comparativa con las demás.

Las ventajas y desventajas que aparecen al hacer uso de las celdas de combustible en el sector residencial o en el sector de transporte pueden ser variadas, algunas veces habrá más ventajas que desventajas, la realidad es que ninguna de las aplicaciones será completamente llena de virtudes. El presente trabajo mostró una variedad de ventajas y desventajas lo mas detalladas posibles con el fin de concientizar al lector que habrá que analizar la viabilidad de las aplicaciones. En este punto ambos casos son inherentes, lo que valdría mayormente la pena analizar son las principales limitaciones existentes ya que estas de ser superadas nos permitirán una mayor flexibilidad en la incursión de las celdas de combustible en los sectores analizados en este trabajo.

Podemos destacar entonces que las limitaciones van desde el costo del hidrógeno que por ahora tiene un precio elevado en comparación a otros combustibles; los costos de las propias celdas son una limitación pues al final es una tecnología cara que bajo una expansión de fabricación e implementación, los costos disminuirán; la infraestructura limitada es un tema crucial, que al igual que el punto anterior, de poder realizar una buena cobertura en la infraestructura, la viabilidad de las celdas aumenta; finalmente los apoyos gubernamentales, a través de incentivos, pueden marcar la diferencia.

7. Referencias

- 1 UNAM. Repositorio. Capítulo IV. Celdas de combustible para el suministro de energía en estaciones sensoras de campo.
<http://www.ptolomeo.unam.mx/>
- 2 Alvarado, F., Ávalos, R. y Rutiaga, Q. Celdas de combustible como elementos potenciadores para un desarrollo energético sustentable. Instituto de Investigaciones Económicas. Repositorio Universitario.
- 3 Alberto G., (2005) Celdas combustibles: una opción para la transformación descentralizada de energía. XXVI (1), 11-16.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329127735003>
- 4 Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (s/f). Celdas de combustible Movilidad y Transporte.
- 5 Celdas de combustible para vehículos eléctricos. (s.f.). Hexagon. <https://hexagon.com/es/resources/resource-library/electric-vehicle-fuel-cells?accordId=89DD5E9196714C88BCA9118979252496>
- 6 Inspección dimensional de conjuntos de electrodos de membranas de celdas de combustible (MEAs). (s. f.). Hexagon.
<https://hexagon.com/es/resources/resource-library/dimensional-inspection-fuel-cell-membrane-electrode-assemblies-meas>
- 7 Infozara, & Infozara. (2008, 24 noviembre). ISQCH.
<http://www.isqch.unizar-csic.es/ISQCHportal/celdasDeCombustible.do>
- 8 electrolisis - Sierterm UEM — Terminología trilingüe. (2025, 1 marzo). Sierterm UEM — Terminología Trilingüe.
<https://sierterm.es/content/electrolisis/>
- 9 (S/f). Gob.mx. Demanda y consumo 2024-2038.
<https://base.energia.gob.mx/PRODESEN2024/prodesen24-38cap3.PDF>
- 10 Staff, I. (2023, 9 junio). El Prodesen 2023-2037 incrementa artificialmente las cifras de generación de energía limpia en México. IMCO.
<https://imco.org.mx/el-prodesen-2023-2037-incrementa-artificialmente-las-cifras-de-generacion-de-energia-limpia-en-mexico/>
- 11 Matriz Energética Global por Fuente 2024 — Datos Low-Carbon Power. (s.f.).
<https://lowcarbonpower.org/es/>
- 12 Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad. (s.f.). Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad.
<https://energia.conahcyt.mx/planeas/electricidad/capacidad-generacion>
- 13 Intelligence, A. M., & Intelligence, A. M. (2024, 18 octubre). Brasil, Chile y México: líderes en energías renovables 2024. Americas Market Intelligence Market Insights That Unlock Opportunities In Latin America.
<https://americasmi.com/insights/brasil-chile-mexico-mercados-mas-importantes-energias-renovables-america-latina/>
- 14 Lapierre, S. (2016, 18 mayo). Case study – Micro-CHP showcase. Simons Green Energy.
<https://simonsgreenenergy.com.au/case-studies/case-study-micro-chp-showcase-frankston-victoria/>
- 15 Lyong. (2015, 11 noviembre). Small and mighty – the performance of a fuel cell micro-CHP. CIBSE Journal.
<https://www.cibsejournal.com/technical/small-and-mighty-the-performance-of-a-fuel-cell-micro-chp/>

- 16 Paulus N, Dávila C and Lemort V; Jume, 2023. Pollutant testing (NO_x , SO_2 and CO) of commercialized micro-combined heat and power (mCHP) fuel cells.
<https://www.proceedings.com/content/069/069564-0104open.pdf>
- 17 E Torrero. National Rural Electric Cooperative Association Cooperative Research Network. Residential Fuel Cell Demonstration Handbook. July, 2002.
<https://docs.nrel.gov/docs/fy02osti/32455.pdf>
- 18 Agencia de Energia del Estado de Puebla. 10 preguntas para entender el hidrógeno y por qué es una oportunidad para el estado de Puebla.(s.f).
https://agenciadeenergia.puebla.gob.mx/images/docs/10_preguntas_para_entender_el_hidrogeno.pdf
- 19 De Castilla y León, J. (s.f.). Aplicaciones de las pilas de combustible. Energía y Minería.
<https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/aplicaciones-pilas-combustible.html>
- 20 De Aragón, E. (2023, 3 octubre). Electrolizadores y pilas de combustible, claves para las renovables. Hidrogeno Verde.
<https://hidrogeno-verde.es/electrolizadores-y-pilas-combustible-generacion-de-renovables/>
- 21 Editor rdu. (2022, 22 mayo). Sustentabilidad energética: hidrógeno como combustible limpio en la generación de electricidad - RDU UNAM. RDU UNAM.
https://www.revista.unam.mx/2022v23n3/sustentabilidad_energetic_hidrogeno_como_combustible_limpio_en_la_generacion_de_electricidad/
- 22 Octaviano A, Ruiz R. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Almacenamiento de energía con hidrógeno a escala de servicios como facilitador de la mitigación de CO_2 . 2022.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/852554/09_2023_F_Hidrogeno_a_escalade_servicios_310723_Rev3.pdf
- 23 Kilner J. Pilas de combustible, ¿una vía para la economía del hidrógeno? (s.f.). CIC energiGUNE.
<https://cicenergigune.com/es/blog/pilas-combustible-economia-hidrogeno>
- 24 Tamaño del mercado de celdas de combustible y análisis de acciones - Informe de investigación de la industria - Tendencias de crecimiento. (2024, 10 enero).
<https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/fuel-cell-market-industry>
- 25 IRENA. COSTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE EN 2020. (2001).
https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020_Summary_ES.pdf
- 26 Roca, J. A. (2021, 2 noviembre). La energía solar y la eólica son cada vez más baratas y vapulean en costes al carbón, el gas y la nuclear. El Periódico de la Energía.
<https://elperiodicodelaenergia.com/la-energia-solar-y-la-eolica-son-cada-vez-mas-baratas-y-vapulean-en-costes-al-carbon-el-gas-y-la-nuclear/>
- 27 Consejo Mundial de la Energía. COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS UTILIZANDO EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA. Julio, 2004.
https://www.worldenergy.org/assets/downloads/PUB_Comparison_of_Energy_Systems_using_lifecycle_2004_ESP_WEC.pdf
- 28 Writing. (2012, 1 julio). Celdas de combustible. Beneficios. materialesde.com.
<https://www.materialesde.com/celdas-de-combustible-beneficios/>
- 29 Hodrop. (2024, 3 octubre). Energía Limpia y Eficiente: Aplicación de Celdas de Combustible para Residencias y Pequeñas Empresas. Hodrop.
<https://www.hodrop.com/post/energ%C3%ADa-limpia-y-eficiente-aplicaci%C3%B3n-de-celdas-de-combustible-para-edificios-residenciales-y-peque>
- 30 Desenchufate.es. (2025, 20 enero). Celdas de combustible de óxido sólido revolucionan la energía sostenible en viviendas residenciales - Desenchufate.es. Desenchufate.es - Pásate al autoconsumo energético.
<https://desenchufate.es/celdas-de-combustible-de-oxido-solido-revolucionan-la-energia-sostenible-en-viviendas-residenciales/>

- 31 Celda De Combustible Casera: Pequeño generador para energía y agua caliente. (2022, 16 octubre). Everand.
<https://es.everand.com/book/600948076/Celda-De-Combustible-Casera-Pequeño-generador-para-energía-y-agua-caliente>
- 32 ¿Qué es un autobús con celda de combustible de hidrógeno? — Karsan. (s.f.).
<https://www.karsan.com/es/blog/hidrogeno-blog/que-es-un-autobus-con-celda-de-combustible-de-hidrogeno>
- 33 Alternative Fuels Data Center: Fuel cell electric vehicle emissions. (s.f.).
<https://afdc.energy.gov/vehicles/emissions-hydrogen>
- 34 De, I. a. las. (s/f). Celdas de combustible. Unadmexico.mx. Recuperado el 22 de noviembre de 2025, de: <https://dmd.unadmexico.mx/contenidos/DCSBA/BLOQUE2/ER/06/ECCM/unidad01/descargables/ECCMU1Contenido.pdf>
- 35 Politetrafluoroetileno. (s/f). Quimica.es. Recuperado el 22 de noviembre de 2025, de: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Politetrafluoroetileno.html>
- 36 (S/f). Sciencedirect.com. Recuperado el 22 de noviembre de 2025, de: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/desulphurisation>
- 37 Szablowski, L., Wojcik, M., y Dybinski, O. (2025). Review of steam methane reforming as a method of hydrogen production. *Energy (Oxford, England)*, 316(134540), 134540. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134540>
- 38 (S/f-c). Redalyc.org. Recuperado el 22 de noviembre de 2025, de: <https://www.redalyc.org/journal/6887/688772210003/html/>
- 39 NORMA Oficial Mexicana NOM-002-SECRE-2010, Instalaciones de aprovechamiento de gas natural (cancela y sustituye a la NOM-002-SECRE-2003, Instalaciones de aprovechamiento de gas natural). (s/f). Gob.mx. Recuperado el 22 de noviembre de 2025, de: <https://dof.gob.mx/normasOficiales/4290/sener/sener.htm>
- 40 NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones de aprovechamiento de gas natural (cancela y sustituye a la NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (utilización).. (s/f). Gob.mx. Recuperado el 22 de noviembre de 2025, de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/512096/NOM-001-SEDE-2012.pdf>
- 41 Resumen boletines - Instituto Mexicano del Transporte. (s/f). Imt.mx. Recuperado el 22 de noviembre de 2025, de <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=537IdBoletin=193>
- 42 Debe, M. K. “Advanced Cathode Catalysts and Supports for PEM Fuel Cells.” *Journal of Power Sources*, 2013.
- 43 Singhal, S. C. “Advances in solid oxide fuel cell technology.” *Solid State Ionics**, 2000.
- 44 Zamel, N., Li, X. “Effective transport properties for PEM fuel cells.” *Progress in Energy and Combustion Science**, 2011.
- 45 Afp. (2025, noviembre 12). Crecimiento de renovables supera al de energías fósiles pese a EU. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/noticia/2025/11/12/economia/-crecimiento-de-renovables-supera-al-de-energias-fosiles-pese-a-eu>
- 46 NUEVOS ELECTROCATALIZADORES EXENTOS DE METALES PARA PILAS DE COMBUSTIBLE. (s/f). Innoua.ua.es. Recuperado el 23 de noviembre de 2025, de <https://innoua.ua.es/es/2503/nuevos-electrocatalizadores-exentos-de-metales-para-pilas-de-combustible-pdf>
- 47 Celdas de combustible. Beneficios. (2012, junio 22). materialesde.com. <https://www.materialesde.com/celdas-de-combustible-beneficios/>
- 48 Hodrop. (2024, septiembre 2). Energía Limpia y Eficiente: Aplicación de Celdas de Combustible para Residencias y Pequeñas Empresas. Hodrop.
- 49 El impacto de las celdas de combustible en la energía distribuida. (2023, enero 17). *Todo Ingenierías*. <https://todoingenierias.com/el-impacto-de-las-celdas-de-combustible-en-la-energia-distribuida/>

- 50 ITOCHU. (s/f). ITOCHU ENEX CO.,LTD. Recuperado el 23 de noviembre de 2025, de <https://www.itcenex.com/en/business/detail/enefarm/index.html>
- 51 Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias. (s/f). Transferencia de tecnologías IIE: Celdas de combustible. gob.mx. Recuperado el 23 de noviembre de 2025, de <https://www.gob.mx/ineel/prensa/transferencia-de-tecnologias-ii-celdas-de-combustible>
- 52 (S/f). Academyducnguyen.com. Recuperado el 23 de noviembre de 2025, de <https://academyducnguyen.com/tecnologia/pros-y-contras-de-celdas-de-combustible/>
- 53 Cobb, J. (2015, agosto 25). Pros and cons of hydrogen fuel cell vehicles. Autoguide.com; Autoguide. <https://www.autoguide.com/auto-news/2015/08/pros-and-cons-of-hydrogen-fuel-cell-vehicles/>
- 54 El auge de los vehículos de hidrógeno verde en México: ¿Qué significa para el sector logístico? (2023, octubre 24). THE LOGISTICS WORLD. <https://thelogisticsworld.com/actualidad-logistica/el-auge-de-los-vehiculos-de-hidrogeno-verde-en-mexico-que-significa-para-el-sector-logistico/>
- 55 (S/f). Datacenterdynamics.com. Recuperado el 23 de noviembre de 2025, de <https://www.datacenterdynamics.com/es/opinion/uso-de-celdas-de-combustible-en-centros-de-datos-cuanto-sabes/>
- 56 Larminie, J., Dicks, A. (2003). Fuel cell systems explained. <https://doi.org/10.1002/9781118878330>
- 57 Cengel, Y. A., Boles, M. A. (1989). Thermodynamics: an Engineering Approach. <http://www.loc.gov/catdir/toc/ecip>
- 58 Services, E. . G. T., Inc, E. T. S., Energy, U. S. D. O. (2016). Fuel Cell Handbook (Seventh Edition).
- 59 Minassians, A. D. (2007). Stirling Engines for Low-temperature Solar-thermal-electric Power Generation.
- 60 Combined Heat and Power: Emissions Profile and Environmental Benefits. U.S. Environmental Protection Agency (EPA)(2010).
- 61 International Energy Agency. (2016). Energy Technology Perspectives 2016. IEA Publications.
- 62 U.S. Energy Information Administration. (2020). Levelized Cost of Electricity (LCOE) and Levelized Avoided Cost of Electricity (LACE). U.S. Department of Energy.
- 63 Cengel, Y. A., Boles, M. A. (2011). Thermodynamics: An Engineering Approach (7th ed.). McGraw-Hill.
- 64 Kim, Y. S., Wang, F., Hickner, M., McGrath, T., McGrath, J. E. (2003). Effect of humidity on water uptake and proton conductivity of sulfonated poly(arylene ether sulfone) copolymer membranes. Journal of Membrane Science, 212(1–2), 263–273.
- 65 Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). Costo, subsidios y penetración de tecnologías de celdas de combustible en México. Secretaría de Energía.
- 66 Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). Geopolitics of Hydrogen: A comparative analysis of leading economies. IRENA Publications.
- 67 Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) / Agencia Internacional de la Energía (IEA). Technological comparison of Hydrogen Storage: Roadmap and Challenges
- 68 Departamento de Energía de los Estados Unidos (U.S. DOE). Hydrogen Program Plan: Storage Technologies for Stationary and Mobile Applications.

8. Referencias para figuras

- a Figura 1. (S/f-b). Researchgate.net. Recuperado el 23 de noviembre de 2025, de: <https://www.researchgate.net/figure/a-An-illustration-of-a-PEM-fuel-cell-stack-Reprinted-with-permission-from-Ref-10fig1373209379>

- b Figura 2. (S/f). Sciencedirect.com. Recuperado el 23 de noviembre de 2025, de:
<https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B9780443190179000192>
- c Figura 3. (S/f-b). Researchgate.net. Recuperado el 23 de noviembre de 2025, de:
<https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-direct-ethanol-fuel-cellfig1284350506>
- d Figura 4. (S/f-c). Researchgate.net. Recuperado el 23 de noviembre de 2025, de:
<https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-typical-Alkaline-Fuel-Cell-AFCfig1329929165>
- e Figura 5. (S/f). Researchgate.net. Recuperado el 23 de noviembre de 2025, de:
<https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-a-molten-carbonate-fuel-cell-MCFC-Cathode-chemicalfig1356974334?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjo>
- f Figura 6. Wikipedia contributors. (s/f). Archivo:Solid oxide fuel cell.svg. Wikipedia, The Free Encyclopedia.
<https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Solidoxidefuelcell.svg>
- g Figura 7. (S/f). Researchgate.net. Recuperado el 23 de noviembre de 2025, de:
<https://www.researchgate.net/figure/Diagram-showing-fuel-cell-operation-Anodefig2343124134>
- h Figura 8. (S/f-b). Gob.mx. Recuperado el 23 de noviembre de 2025, de <https://www.cenace.gob.mx/Docs/16MARCOREG2038%20Cap%C3%ADtulos%201%20al%206.pdf>
- i Figura 10. (S/f). Researchgate.net. Recuperado el 23 de noviembre de 2025, de:
<https://www.researchgate.net/figure/Fuel-cell-micro-combined-heat-and-power-CHP-for-importing-and-exporting-electricityfig8361913444>
- j Figura 12. Resumen boletines - Instituto Mexicano del Transporte. (s/f). Imt.mx. Recuperado el 22 de noviembre de 2025, de
<https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=537IdBoletin=193>
- k Figura 13. Resumen boletines - Instituto Mexicano del Transporte. (s/f). Imt.mx. Recuperado el 22 de noviembre de 2025, de
<https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=537IdBoletin=193>
- l Figura 14. Resumen boletines - Instituto Mexicano del Transporte. (s/f). Imt.mx. Recuperado el 22 de noviembre de 2025, de
<https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=537IdBoletin=193>