

# Evaluación de las celdas de hidrógeno como alternativa al queroseno en la aviación: un enfoque hacia la sostenibilidad energética aeronáutica

| Fecha de recibido: 18 de julio 2023 | Fecha de aprobado: 12 de septiembre 2023 |

| Reception date: July 18, 2023 | Approval date: September 12, 2023 |

| Data de recebimento: 18 de julho de 2023 | Data de aprovação: 12 de setembro de 2023 |

## Luisa Fernanda Mónico Muñoz

<https://orcid.org/0000-0002-3597-6332>  
Luisa.monico@libertadores.edu.co

Doctora en Sistemas Propulsivos en Medios de Transporte  
Docente Tiempo Completo – Fundación  
Universitaria Los Libertadores, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura

Grupo de investigación en diseño, análisis y desarrollo de sistemas de ingeniería (GIDAD)

PhD in Propulsive Systems in Means of Transportation

Full Time Teacher - Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia

Researcher's role: theoretical and writing

Research group in design, analysis and development of engineering systems (GIDAD).

Doutorado em Sistemas Propulsivos em Meios de Transporte

Professor em tempo integral - Fundação Universitaria Los Libertadores, Colombia

Função do pesquisador: teórico e redação

Grupo de pesquisa em design, análise e desenvolvimento  
de sistemas de engenharia (GIDAD).

## Sofía Guadalupe Ríos Esparza

sofia.riosparza@gmail.com

Estudiante

Instituto Tecnológico de Hermosillo, México  
Rol del investigador: teórico y escritura

Student

Hermosillo Institute of Technology, Mexico  
Role of the researcher: theoretical and writing

Estudiante

Instituto Tecnológico de Hermosillo, México  
Função do pesquisador: teórica e redação

**Cómo citar este artículo:** Mónico Muñoz, L. F., y Ríos Esparza, S. G. (2023). Evaluación de las celdas de hidrógeno como alternativa al queroseno en la aviación: un enfoque hacia la sostenibilidad energética aeronáutica. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(1), 81-99. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.793>



## Evaluación de las celdas de hidrógeno como alternativa al queroseno en la aviación: un enfoque hacia la sostenibilidad energética aeronáutica

## Evaluation of hydrogen cells as an alternative to kerosene in aviation: an approach towards aeronautical energy sustainability

**Resumen:** Este estudio se enfoca en analizar en detalle el uso de celdas de hidrógeno como una posible alternativa al queroseno, el combustible tradicionalmente empleado en la aviación, con el propósito de enfrentar los desafíos relacionados con la sostenibilidad energética en el ámbito aeronáutico. La investigación se centra en evaluar tanto el impacto ambiental como la viabilidad a largo plazo al adoptar celdas de hidrógeno en la industria de la aviación.

En primer lugar, se examina el impacto ambiental de las celdas de hidrógeno en comparación con el queroseno. Se analizan los beneficios potenciales en términos de reducción de emisiones de carbono y contaminantes atmosféricos, lo que podría contribuir significativamente a la mitigación del cambio climático y la mejora de la calidad del aire en las áreas cercanas a los aeropuertos y las rutas de vuelo. Estos beneficios se basan en el hecho de que las celdas de hidrógeno producen energía mediante reacciones químicas que generan vapor de agua.

Sin embargo, también se consideran los desafíos asociados con la producción y el suministro sostenible del hidrógeno. Para que las celdas de hidrógeno sean una opción viable a largo plazo en la aviación, se necesita una infraestructura adecuada para producir, almacenar y distribuir el hidrógeno de manera sostenible. Esto implica superar obstáculos como la generación de hidrógeno a partir de fuentes renovables, el desarrollo de tecnologías de almacenamiento seguras y eficientes y la implementación de una red de suministro que abarque los aeropuertos y las rutas de vuelo.

Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan una información fundamental de la viabilidad de las celdas de hidrógeno y, así mismo, comparar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al uso de celdas de hidrógeno en relación con el queroseno. Se destacan sus posibilidades para abordar los desafíos de sostenibilidad en el sector aeronáutico, lo que puede conducir a una reducción significativa de las emisiones de carbono y sus contaminantes atmosféricos. Sin embargo, se subraya la importancia de superar los desafíos asociados con la producción y el suministro sostenible de hidrógeno para garantizar la viabilidad a largo plazo de esta tecnología en la aviación.

**Palabras clave:** hidrógeno; celdas de combustible; queroseno; aviación; emisiones; renovable; contaminación; transporte aéreo; sostenibilidad energética.

**Abstract:** This study focuses on analyzing in detail the use of hydrogen cells as a possible alternative to kerosene, the fuel traditionally used in aviation, in order to meet the challenges related to energy sustainability in the aeronautical field. The research focuses on assessing both the environmental impact and the long-term viability of adopting hydrogen cells in the aviation industry.

First, the environmental impact of hydrogen cells compared to kerosene is examined. The potential benefits in terms of reducing carbon emissions and air pollutants are analyzed, which could contribute significantly to climate change mitigation and improved air quality in areas near airports and flight routes. These benefits are based on the fact that hydrogen cells produce energy through chemical reactions that generate water vapor.

However, the challenges associated with the production and sustainable supply of hydrogen are also considered. For hydrogen cells to be a viable long-term option in aviation, adequate infrastructure is needed to produce, store and distribute hydrogen sustainably. This involves overcoming obstacles such as the generation of hydrogen from renewable sources, the development of safe and efficient storage technologies, and the implementation of a supply network covering airports and flight routes.

The results obtained in this study provide an informed information on the viability of hydrogen cells and also compare the greenhouse gas emissions associated with the use of hydrogen cells in relation to kerosene. It highlights its potential to address sustainability challenges in the aeronautical sector, which can lead to a significant reduction in carbon emissions and air pollutants. However, it underlines the importance of overcoming the challenges associated with the production and sustainable supply of hydrogen to ensure the long-term viability of this technology in aviation.

**Keywords:** Hydrogen; fuel cells; kerosene; aviation; emissions; renewable; pollution; air transport; energy sustainability.

## **Avaliação das células de hidrogénio como alternativa à parafina na aviação: uma abordagem para a sustentabilidade energética da aviação**

**Resumo:** Este estudo centra-se na análise pormenorizada da utilização de células de hidrogénio como uma possível alternativa à parafina, o combustível tradicional utilizado na aviação, a fim de enfrentar os desafios relacionados com a sustentabilidade energética na aviação. A investigação centra-se na avaliação do impacto ambiental e da viabilidade a longo prazo da adoção de células de hidrogénio na indústria da aviação.

Em primeiro lugar, é examinado o impacto ambiental das pilhas de hidrogénio em comparação com a parafina. São analisados os potenciais benefícios em termos de redução das emissões de carbono e de poluentes atmosféricos, que poderão contribuir significativamente para a atenuação das alterações climáticas e para a melhoria da qualidade do ar nas zonas próximas dos aeroportos e das rotas de voo. Estes benefícios baseiam-se no facto de as células de hidrogénio produzirem energia através de reacções químicas que geram vapor de água.

No entanto, são também considerados os desafios associados à produção e ao fornecimento sustentáveis de hidrogénio. Para que as células de hidrogénio sejam uma opção viável a longo prazo na aviação, é necessária uma infraestrutura adequada para produzir, armazenar e distribuir o hidrogénio de forma sustentável. Para tal, é necessário ultrapassar obstáculos como a produção de hidrogénio a partir de fontes renováveis, desenvolver tecnologias de armazenamento seguras e eficientes e implementar uma rede de abastecimento que abranja aeroportos e rotas de voo.

Os resultados obtidos neste estudo fornecem informações fundamentadas sobre a viabilidade das células de hidrogénio e comparam as emissões de gases com efeito de estufa associadas à utilização de células de hidrogénio em relação à parafina. Destacam o seu potencial para enfrentar os desafios da sustentabilidade no sector da aviação, o que pode levar a reduções significativas das emissões de carbono e de poluentes atmosféricos. No entanto, sublinha a importância de ultrapassar os desafios associados à produção e ao fornecimento sustentáveis de hidrogénio para garantir a viabilidade a longo prazo desta tecnologia na aviação.

**Palavras-chave:** hidrogénio; pilhas de combustível; parafina; aviação; emissões; renováveis; poluição; transporte aéreo; sustentabilidade energética.

## Introducción

En los últimos años, la búsqueda de alternativas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente en la industria de la aviación ha adquirido una importancia creciente. La quema de queroseno, principal combustible utilizado en las aeronaves convencionales, ha sido responsable de una gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero y de la contaminación atmosférica en todo el mundo, debido al gran número de aeronaves que operan diariamente.

Por lo anterior, las celdas de hidrógeno han surgido como una prometedora alternativa para reemplazar al queroseno en la aviación. Según Firestone (2023), las celdas de hidrógeno, también conocidas como celdas de combustible, son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química del hidrógeno y el oxígeno en electricidad y calor. Al ser un elemento que es posible encontrarlo en grandes cantidades en el planeta tierra, y al ser muy amigable con el medio ambiente, ya que no genera importantes cantidades de emisiones contaminantes durante todo su ciclo de vida, lo convierte en una muy buena opción de fuente de energía alternativa.

La idea de utilizar celdas de hidrógeno en el ámbito aeronáutico no es nueva. Desde hace varias décadas se han realizado investigaciones y desarrollos en este campo, pero ha sido en los últimos años que ha ganado mayor atención debido al aumento de la conciencia sobre la necesidad de abordar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Diversos estudios han demostrado que las celdas de hidrógeno pueden ofrecer beneficios significativos en términos de sostenibilidad energética aeronáutica. Al utilizar hidrógeno como combustible, los niveles de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), principales causantes del calentamiento global se reducirían considerablemente, ya que la única emisión producida por las celdas de hidrógeno es agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), es decir, a diferencia de los combustibles de origen fósil, no generarían, azufre, óxidos de nitrógeno, partículas de materia u otro tipo de contaminantes (Adler y Martins, 2023).

Es por lo anterior, que la evaluación de las celdas de hidrógeno como alternativa al queroseno en la aviación es un tema de vital importancia para avanzar hacia una industria aeronáutica más sostenible y respetuosa con el medio ambiente. El presente trabajo se enfocará en recopilar los aspectos clave relacionados con esta tecnología, con el objetivo de proporcionar información relevante y contribuir al desarrollo de soluciones energéticas más limpias y eficientes para la aviación del futuro.

Esta investigación tiene como objetivos específicos informar las diferentes alternativas que existen para poder almacenar y crear hidrógeno cuidando las propiedades de este y, a su vez, procurando la economía de este cumpliendo con los requerimientos para la aviación. De igual modo, se busca comparar entre los diferentes tipos de almacenamiento, la generación, tipos de celdas y costos para que el beneficiario pueda equiparar estas características y tomar la mejor alternativa dependiendo el producto que se busca realizar, teniendo en cuenta las ventajas y desventajas que se tiene al momento de producir hidrógeno.

## Metodología

La investigación adopta un enfoque cualitativo para explorar las perspectivas y experiencias de los actores relevantes, y se basa en una revisión teórica para proporcionar un marco conceptual sólido sobre la viabilidad del hidrógeno en la aeronáutica y el uso de celdas de hidrógeno como alternativa al queroseno en la aviación.

Este trabajo incluye una primera fase teórica, donde se realiza la búsqueda de información sobre los diversos mecanismos o procesos que se han desarrollado para la generación de hidrógeno, con sus ventajas y desventajas. La segunda fase describe las celdas de hidrógeno, los tipos, ventajas y contras de cada una. Posteriormente, se presentan los mecanismos existentes para el almacenamiento del hidrógeno. Luego se exponen algunos casos en los cuales ya se han

realizado ensayos con este componente y su viabilidad económica. Finalmente, se presentan las principales conclusiones a las que se llegó al realizar esta investigación netamente teórica.

Se recurre a diversas fuentes confiables, que incluye libros especializados en aeronáutica y tecnologías de propulsión, artículos científicos y técnicos sobre el tema, así como las páginas web de fabricantes de aeronaves y empresas aeronáuticas líderes. Estas fuentes proporcionan información integral sobre la viabilidad y los desafíos asociados con las celdas de hidrógeno en la aviación, además de ofrecer resultados actualizados de investigaciones y pruebas realizadas por la industria aeronáutica en este campo. En la figura 1 se presenta la metodología seguida en este trabajo.



Figura 1. Metodología proceso de investigación  
Fuente: elaboración propia.

## Hidrógeno: la alternativa aérea

### Generación del hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante en el planeta tierra, por tal motivo, puede obtenerse de distintas fuentes. De acuerdo con Venegas *et al.* (2016), los principales métodos para obtener este elemento son:

- Combustible fósil reformado:** es un método de producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles. Siendo el procedimiento menos costoso y más común para generar hidrógeno a partir de combustibles fósiles. Como indica Acar y Dincer (2013), se emite hidrógeno (H<sub>2</sub>), monóxido

de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En este procedimiento, el gas natural (CH<sub>4</sub>) debe ser limpiado de impurezas, se lo mezcla con carbón y se lo hace circular por un reactor (fuente de calor externa).

- Gasificación de carbono:** durante este procedimiento, se lleva a cabo una oxidación parcial del carbono utilizando vapor y oxígeno en un reactor de alta presión y temperatura. En el proceso de gasificación, el carbón es parcialmente oxidado con vapor, lo que produce principalmente H<sub>2</sub>, y vapor, junto con CO<sub>2</sub> (gas de síntesis). Este gas de síntesis se somete a una reacción de desplazamiento para aumentar la cantidad de hidrógeno (Acar y Dincer, 2013). En la figura 2 se presenta de forma esquemática cómo se desarrolla este proceso.

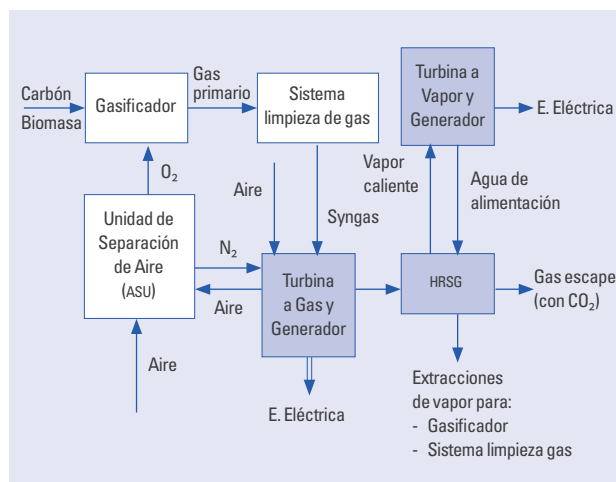


Figura 2. Gasificación de carbón para generación de energía eléctrica  
Fuente: Concha *et al.* (2009).

- c. En casos en los que sea necesario recuperar azufre elemental o ácido sulfúrico, el gas de producto puede ser procesado y purificado. A pesar de algunas ventajas de la gasificación de carbón, como el alto contenido de carbono presente, este método genera mayores emisiones de en comparación con otras tecnologías de producción de hidrógeno. Actualmente, el costo de este proceso es ligeramente mayor que el de la reforma de gas natural con vapor, pero los costos de la materia prima son más bajos, lo que hace que sea viable a gran escala.
- d. *División termoquímica del agua*: estos métodos incluyen la conversión térmica nuclear del agua a través de diferentes procesos químicos, como el ciclo de sodio-yodo y la electrólisis del agua utilizando energía nuclear. El ciclo de sodio-yodo es un ejemplo de un ciclo termoquímico que descompone el agua sin requerir catalizadores para llevar a cabo la reacción química. Con excepción del agua, que es la fuente de material para la producción de hidrógeno, todos los productos químicos utilizados en el proceso termoquímico pueden ser reciclados (Sharma, 2015).
- e. *Electrólisis a alta temperatura*: este método de electrólisis implica la disociación del vapor de agua en hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ) a temperaturas que oscilan entre los 700 y 1000 C. Se considera más eficiente en comparación con la electrólisis realizada a temperatura convencional. En este proceso, el agua se convierte en vapor utilizando energía térmica. Los componentes del sistema son calentados, ya sea directamente mediante el suministro de vapor o indirectamente a través de la transferencia de calor. Por lo tanto, la demanda de energía eléctrica en esta forma de electrólisis es menor que en la electrólisis convencional. Otra ventaja significativa de este método es la posibilidad de lograr emisiones de gases de efecto invernadero nulas cuando se dispone de una fuente de calor limpia, como la energía solar, geotérmica o nuclear (Acar y Dincer, 2015).
- f. *Electrólisis PV*: es uno de los métodos más costosos para la producción de hidrógeno, siendo

aproximadamente 25 veces más caro que las alternativas basadas en combustibles fósiles. Por otro lado, la fotocatalisis es un proceso que convierte la energía fotónica, proveniente de la irradiación solar, en energía química en forma de hidrógeno. La energía transportada por los fotones está relacionada con la frecuencia de la radiación, representada por “ $h\nu$ ”, donde “ $h$ ” es la constante de Planck y “ $\nu$ ” es la frecuencia. Cuando un fotón golpea el fotocatalizador, se genera un par electrón-hueco y se obtiene carga eléctrica que se utiliza para disociar el agua (Venegas et al., 2016). La electrólisis PV y la fotocatalisis utilizan la energía solar para producir hidrógeno, una alternativa relevante en la aviación para reducir emisiones y depender menos de combustibles fósiles. Aunque prometedoras, la electrólisis PV requiere espacio para paneles solares, y la fotocatalisis está en desarrollo y necesita mejoras para ser viable en aeronaves. Ambos métodos permiten un almacenamiento eficiente de hidrógeno, esencial para vuelos sostenibles.

- g. *Energía eólica*: este tipo de energía aprovecha la fuerza del viento para hacer girar una turbina y generar electricidad. El viento es una forma indirecta de energía solar, ya que aproximadamente el 2 % de la radiación solar que llega a la superficie terrestre se convierte en energía cinética del aire en movimiento. Según los informes más recientes del Departamento de Energía de Estados Unidos (2022), la energía eólica ha contribuido con el 22 % de la capacidad eléctrica recién instalada en el país. Además, estos informes confirman que la energía eólica continúa siendo una de las fuentes de electricidad de más rápido desarrollo y menor costo en Estados Unidos, y se encuentra en una posición propicia para un crecimiento aún más significativo en el futuro cercano.
- h. *Electrólisis de agua*: este método no requiere partes móviles y utiliza corriente eléctrica directa (CC), lo que lo hace muy simple para la producción de hidrógeno. La descomposición electroquímica del agua es confiable y no genera contaminantes. De acuerdo con Turner (2008), la eficiencia en

la obtención de hidrógeno es extremadamente alta, alcanzando el 99.999 %.

La electrólisis del agua se puede clasificar en dos tipos según el pH del medio acuoso: la AWE (electrólisis alcalina) ha sido ampliamente utilizada en aplicaciones industriales y existen numerosas unidades en funcionamiento; y PEWE (electrólisis ácida), la cual tiene una aplicación limitada en términos de capacidad de producción debido a su escasa vida útil y la tendencia a la corrosión de las celdas (Acar y Dincer, 2015).

- i. *Conversión termoquímica de biomasa, gasificación y reformado de biocombustible*: la biomasa es considerada como una opción altamente prometedora y posee un gran potencial para satisfacer las necesidades energéticas y garantizar el suministro de combustible en el futuro. De acuerdo con Sharma (2015), se estima que, para el año 2050, el potencial futuro de la biomasa podría representar hasta el 25 % de la energía primaria mundial. Esto se lograría mediante el aprovechamiento de recursos como los bosques, residuos urbanos y cultivos energéticos perennes.

Las tecnologías de conversión de biomasa se dividen en dos categorías principales: 1) los procesos bioquímicos, que tienden a ser menos costosos, ya que se pueden operar a temperaturas más altas, lo que aumenta la velocidad de reacción. De acuerdo con Balat (2010), entre estos procesos se encuentran la gasificación y la pirolysis, que consiste en calentar la biomasa en ausencia de oxígeno para producir un gas rico en hidrógeno conocido como “syngas” (una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono); 2) los procesos termoquímicos.

## Ventajas de producir hidrógeno

La producción de hidrógeno presenta varias ventajas significativas, que incluyen (Becherif *et al.*, 2015; Pérez *et al.*, 2015; Turner, 2004; Venegas *et al.*, 2016):

1. Es elemento químico más ligero, simple y abundante en el universo.

2. Se produce principalmente en combinación con otros elementos, como el oxígeno en el agua, y con carbono, nitrógeno y oxígeno en materiales vivos y combustibles fósiles.
3. Es un combustible muy limpio, lo que contribuye a mejorar la calidad del aire. En las celdas de combustible, cuando se combina con oxígeno, no genera dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrocarburos, gases de efecto invernadero ni emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). El único subproducto es el agua.
4. Contribuye a la seguridad energética al reducir la dependencia de las importaciones de petróleo.
5. Promueve la sostenibilidad al aprovechar fuentes de energía renovable para su producción.
6. Ofrece viabilidad económica en la formación de futuros mercados energéticos a nivel mundial.
7. Puede utilizarse en la generación de energía hidroeléctrica para abastecer zonas remotas o aisladas.
8. Tiene un alto contenido de energía por unidad de masa en comparación con el petróleo.

## Desventajas de producir hidrógeno

La generación de hidrógeno trae consigo diversos desafíos o inconvenientes por vencer, entre los que se encuentran (Balat, 2010; Beach, 2005; Shahid, 2012):

1. Desarrollar una técnica de producción económicamente viable.
2. El almacenamiento de hidrógeno representa uno de los principales desafíos que afectan la economía futura del hidrógeno. Tanto para aplicaciones estacionarias como móviles, las instalaciones de almacenamiento de hidrógeno son complicadas debido a su muy bajo punto de ebullición (20.2 K) y su baja densidad, tanto en forma gaseosa (0.09 kg/Nm<sup>3</sup>) como líquida (70.9 kg/Nm<sup>3</sup>). El hidrógeno puede almacenarse físicamente mediante cambios en sus condiciones de temperatura, presión y fase, así como química o fisicoquímicamente en varios compuestos sólidos y líquidos, como hidruros metálicos, nanoestructuras de

carbono, borohidruros, metano, metanol e hidrocarburos ligeros.

3. Debido a que el hidrógeno tiene la molécula más pequeña, tiene una mayor tendencia a escapar a través de aberturas pequeñas en comparación con otros combustibles líquidos o gaseosos. Basándonos en propiedades como la densidad, viscosidad y coeficiente de difusión del hidrógeno en el aire, su propensión a fugarse a través de agujeros o uniones en líneas de combustible a presión puede ser solo de 1.26 a 2.8 veces más rápida que una fuga de gas natural a través del mismo agujero.
4. Algunos aceros de alta resistencia pueden sufrir fragilización por hidrógeno. La exposición prolongada al hidrógeno, especialmente a altas temperaturas y presiones, puede causar la pérdida de fuerza del acero y eventualmente provocar su ruptura. La fragilización por hidrógeno es una preocupación específica en industrias y aplicaciones donde se utilizan aceros de alta resistencia en condiciones extremas de presión y temperatura, y donde la integridad estructural es crítica. Sin embargo, no es una preocupación generalizada en todos los contextos de uso del hidrógeno. En aplicaciones más comunes, como el almacenamiento y transporte de hidrógeno, esta fragilización suele ser menos relevante.
5. El riesgo a una explosión violenta debido a la expansión de vapor en caso de falla de la válvula de alivio de presión en un líquido con punto de ebullición bajo.

## Celdas de hidrógeno

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que transforman el combustible y el oxidante en electricidad y calor mediante una reacción química. A diferencia de las pilas convencionales, que dependen de la cantidad de reactivos contenidos en ellas, las celdas de combustible requieren un suministro constante de combustible y oxidante para generar energía eléctrica de manera continua. Estas celdas están compuestas por dos electrodos: el ánodo, donde se encuentra

el combustible; y el cátodo, donde se encuentra el oxidante. Entre estos electrodos se coloca una membrana que permite el paso de los electrones desde el ánodo hacia el cátodo (Aguirre, 2013).

La celda de combustible consta de dos electrodos ubicados dentro de un electrolito. El ánodo es alimentado con hidrógeno o combustible, mientras que el cátodo recibe oxígeno u oxidante. Un catalizador separa los electrones de las moléculas de hidrógeno, permitiendo que los iones de hidrógeno pasen a través de una membrana por el electrolito, mientras que los electrones se desplazan hacia el ánodo, donde se recombinan con el oxígeno y el hidrógeno, formando agua. Las celdas de combustible se pueden conectar en serie para obtener el voltaje deseado, creando así una pila de combustible (Aguirre, 2013).

## Tipos de celdas de combustible

Existen diversos tipos de celdas de combustible que varían según el electrolito utilizado, ya sea sólido o líquido. La elección del electrolito determina las características de funcionamiento de la celda, y factores como la temperatura de operación, los gases reactivos y los materiales de construcción influyen en su durabilidad y aplicaciones específicas.

- a. *Celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico (CCMIP)*: de acuerdo con Tibquirá (2009), este tipo de celda utiliza hidrógeno como combustible y una membrana de polímero como electrolito. En el ánodo, el hidrógeno fluye y se descompone en protones y electrones en la capa catalizadora. Los protones atraviesan la membrana, la cual está diseñada para permitir el paso de cationes, pero es impermeable a la corriente eléctrica, gases y aniones. De esta manera, los electrones son forzados a circular a través del circuito externo, generando energía eléctrica. Posteriormente, los electrones y protones reaccionan en el cátodo con el oxígeno presente en el aire, junto con la ayuda de la capa catalizadora del cátodo, formando agua.



b. *Celdas de combustible de óxido sólido (SOFC)*: según Mayén (2011), las celdas de combustible de óxido sólido funcionan mediante la generación de energía eléctrica a partir de una reacción química que involucra un intercambio de electrones. Estas reacciones, conocidas como reacciones de oxidación-reducción (RedOx), implican que uno de los reactivos se reduce al recibir electrones del otro reactivo, que a su vez se oxida. Aunque las reacciones RedOx son comunes en la naturaleza, es necesario controlarlas para obtener una corriente eléctrica útil. La clave reside en separar los reactivos en compartimentos independientes y conectarlos mediante un conductor eléctrico. De esta manera, los electrones liberados por el reactivo que se oxida fluyen a través del conductor hacia el reactivo que se reduce.

En este sistema, donde los reactivos están en compartimentos separados, es importante evitar la acumulación de especies iónicas en cada uno de ellos, ya que podría resultar en la cancelación inmediata de la reacción. En la práctica, los compartimentos se interconectan mediante una membrana de intercambio iónico. Esta membrana, como su nombre indica, permite el paso de las especies cargadas (oxidadas y/o reducidas), pero no el paso de los reactivos en su forma original. De esta manera, las cargas generadas se neutralizan entre sí y la reacción puede continuar su curso de manera efectiva.

c. *Celdas de combustible de carbonatos fundidos (MFC)*: son celdas que operan a altas temperaturas. Su electrolito consiste en una mezcla de sales de carbonatos fundidos, suspendidos en una matriz cerámica porosa compuesta de beta-alúmina, un material químicamente inerte. En el ánodo, tiene lugar una reacción entre el combustible (hidrógeno) y los iones de carbonato, los cuales reaccionan para producir dióxido de carbono, agua y electrones. Las ventajas y desventajas asociadas a este tipo de celdas están estrechamente relacionadas con su alta temperatura de funcionamiento. Estas celdas pueden ser alimentadas directamente con hidrógeno,

monóxido de carbono, gas natural y propano. No requieren catalizadores de metales nobles para las reacciones de oxidación y reducción electroquímica (Alvarado, 2013).

d. *Celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC)*: son consideradas como uno de los sistemas más prometedores para la generación de electricidad. Según lo señalado por Alvarado (2013), estas celdas utilizan electrodos de papel carbón y un electrolito líquido compuesto por ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ). El ácido fosfórico, que es una solución transparente e incolora, se utiliza comúnmente en fertilizantes, detergentes, saborizantes de alimentos y productos farmacéuticos. La conductividad iónica de este electrolito es baja a temperaturas más bajas, entre 150 y 220 °C.

En este tipo de celdas de combustible, el ion hidrógeno ( $H^+$  o protón) actúa como el portador de carga. Los protones se desplazan desde el ánodo hacia el cátodo a través del electrolito, mientras que los electrones generados regresan al cátodo a través del circuito externo, generando así corriente eléctrica. En el electrodo catódico, se forma agua 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 calentamiento. Sin embargo, es importante destacar que la operación continua del sistema a 40 °C es un desafío constante debido a la solidificación del ácido fosfórico a esta temperatura (Alvarado, 2013).

e. *Celdas de combustible de electrolito alcalino (AFC)*: son una de las primeras tecnologías desarrolladas para generar energía eléctrica y agua a bordo de naves espaciales. Como menciona Aguirre (2013), estas celdas se caracterizan por utilizar un electrolito alcalino, como hidróxido de potasio, y pueden emplear catalizadores no preciosos en los electrodos. Operan a temperaturas que oscilan entre 230 °C y 700 °C. Una ventaja de las celdas AFC es que su electrolito acuoso permite una reacción química más rápida en el cátodo, lo que resulta en una eficiencia cercana al 70 %.

Además, los materiales necesarios para su funcionamiento, como el electrolito y los catalizadores, son más económicos en comparación con las celdas PEMFC. Aunque las AFC utilizan tanto metales preciosos como no preciosos, como el níquel, se enfrentan al desafío del envenenamiento y son altamente sensibles al  $CO_2$ , lo que ha llevado a un declive en el interés por esta tecnología en favor de las celdas PEM. La principal desventaja de las celdas AFC es su susceptibilidad al envenenamiento por  $CO_2$ , lo que reduce su vida útil y requiere la purificación del hidrógeno y el oxígeno suministrados. Además, las AFC tienen tiempos de vida cortos, lo que afecta su fiabilidad.

- f. *Celdas de combustible de metanol directo (DMFC)*: el funcionamiento de las DMFC se lleva a cabo de una reacción electroquímica en el ánodo, produciendo dióxido de carbono, protones y electrones, que son portadores de energía en forma de trabajo eléctrico. Esta reacción es resultado de la interacción previa entre el metanol y el agua. Por otro lado, el cátodo recibe los iones positivos transportados por el electrolito de polímero, los cuales reaccionan con el oxígeno para generar agua. Aunque las celdas de combustible de metanol directo se consideran sistemas básicos, se dividen en dos modelos utilizados en la actualidad: el modelo DMFC y el modelo RMFC (celda de combustible de metanol reformado), que ofrece una alta densidad de potencia. Es importante destacar que es necesario utilizar una mezcla de metanol y agua para que el proceso de reformado pueda llevarse a cabo en el modelo RMFC (Rincón, 2020).
- g. *Celdas de combustible de zinc (Z AFC)*: estas celdas están equipadas con un electrodo de difusión de gas conocido como *gas diffusion electrode (GDE)*, un ánodo de zinc separado del GDE por una membrana electrolítica y un separador mecánico que asegura la rigidez del sistema. El GDE actúa como una membrana que permite el paso del oxidante, y el ion  $OH^-$  reacciona con el agua para formar hidróxido de zinc, el cual reacciona con el zinc del ánodo para generar corriente eléctrica. Las

celdas Z AFC comparten muchas características con otros dispositivos similares, pero en términos de suministro de combustible, se asemejan más a las baterías. Estos dispositivos cuentan con un depósito que contiene zinc en forma de polvo o limaduras, las cuales se regeneran después de su uso en la celda. Cuando se consume el combustible, los electrones liberados reaccionan con el oxígeno del aire, generando una serie de compuestos intermedios del zinc. Después de aprovechar la circulación de los electrones en la carga, se utiliza la electrólisis para devolver estos compuestos a su estado original en forma de polvo de zinc y oxígeno (Aguirre, 2013).

- h. *Celdas de combustible cerámicas (PCFC)*: es un avance reciente en el campo de los generadores electroquímicos de potencia. De acuerdo con Aguirre (2013), estas celdas se basan en un electrolito cerámico con una alta conductividad protónica a temperaturas elevadas. A diferencia de otros tipos de celdas de combustible, las PCFC son capaces de transportar protones a través del electrolito a temperaturas mucho más altas. Gracias a esta propiedad, las celdas de combustible cerámicas ofrecen no solo las mismas ventajas cinéticas y térmicas que las celdas de carbonatos fundidos y óxidos sólidos, sino también características eléctricas similares a las de las celdas PEM y PAFC.

La operación a temperaturas muy altas es crucial en estos dispositivos para lograr una alta eficiencia en el consumo de combustible, ya que este se oxida rápidamente en el ánodo, eliminando la necesidad de un paso intermedio de reformado para obtener hidrógeno, lo cual puede resultar costoso. Después de la oxidación, los átomos de hidrógeno se liberan y son absorbidos por el electrolito cerámico. La generación de energía eléctrica se logra mediante la reacción de oxidación del hidrógeno obtenido directamente a partir de la oxidación del combustible. Es importante mencionar que, a diferencia de otras celdas de combustible de alta temperatura, la oxidación ocurre en el ánodo de la pila (Aguirre, 2013).

- i. *Celdas de combustible biológicas (BFC)*: son dispositivos bioelectroquímicos en los cuales el ánodo, y a veces también el cátodo, contienen microorganismos que tienen la capacidad de generar y mantener un gradiente electroquímico, que se utiliza principalmente para generar energía eléctrica. En la configuración más estudiada, el ánodo alberga bacterias heterótrofas en un entorno anaeróbico, las cuales son capaces de oxidar moléculas orgánicas, liberando protones, electrones y otros subproductos. Los protones liberados pueden alcanzar el cátodo, generalmente a través de una membrana o un puente salino, mientras que los electrones viajan a través de un circuito externo, generando un flujo de corriente que puede ser fácilmente medido (Saavedra, 2014).

De acuerdo con la información anterior, es posible afirmar que, para la industria aeronáutica, las celdas de combustible de hidrógeno más idóneas son: la de tecnología de las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico, que se destaca por su alta eficiencia, respuesta rápida y densidad de potencia. Estas celdas utilizan una membrana de intercambio protónico como electrolito, lo que les permite operar a temperaturas más bajas y arrancar rápidamente. Estas características las hacen adecuadas para aplicaciones de alta potencia en la aviación. Y, por otro lado, las celdas de combustible de óxido sólido, que, aunque su uso en la aviación es menos común debido a su temperatura de operación relativamente alta, las SOFC ofrecen ventajas como alta eficiencia y flexibilidad en la elección del combustible, permitiendo la utilización de hidrógeno o biogás como fuente de energía (Mayén, 2011).

Con base en lo anterior, las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico son una tecnología prometedora para la aviación debido a su eficiencia, capacidad de respuesta y densidad de potencia. Sin embargo, la elección de la tecnología más adecuada para una aplicación específica dependerá de diversos factores, como los requisitos de rendimiento, los costos, la infraestructura de abastecimiento de combustible y la disponibilidad de tecnología y materiales en el momento de su implementación.

## Ventajas y desventajas de las celdas de hidrógeno

Las celdas de hidrógeno en la aviación presentan una serie de ventajas y desventajas que deben considerarse al evaluar su implementación en el sector aeronáutico. De acuerdo con Alvarado (2013), en términos de ventajas, se destaca su sostenibilidad ambiental, ya que generan electricidad sin emitir contaminantes ni gases de efecto invernadero. Esto se logra mediante la reacción química entre hidrógeno y oxígeno, que produce agua como único subproducto. Al utilizar hidrógeno producido a partir de fuentes renovables, las celdas de hidrógeno pueden contribuir significativamente a la reducción de las emisiones de carbono en la aviación. Además, estas celdas ofrecen una alta eficiencia energética al convertir directamente la energía química del hidrógeno en electricidad, lo que puede resultar en una mejor utilización de la energía y una mayor autonomía de vuelo de las aeronaves. Otro beneficio importante es la reducción del ruido, ya que las celdas de hidrógeno son más silenciosas que los motores de combustión interna.

No obstante, también existen desafíos asociados con las celdas de hidrógeno en la aviación. Según Alvarado (2013), uno de ellos es la infraestructura limitada de abastecimiento de hidrógeno, que requiere una red de producción, almacenamiento y distribución a gran escala para respaldar su adopción generalizada en el sector. Esto implica superar desafíos logísticos y de inversión para establecer una infraestructura adecuada. Asimismo, el almacenamiento y la distribución de hidrógeno plantean desafíos debido a su baja densidad energética en comparación con los combustibles fósiles. Se necesitan sistemas de almacenamiento y distribución especializados, como el almacenamiento a alta presión o en forma líquida criogénica, lo que puede requerir un mayor espacio en las aeronaves y plantear desafíos adicionales en términos de seguridad. Por último, los costos iniciales de las tecnologías de celdas de hidrógeno suelen ser más altos que los sistemas convencionales basados en queroseno, lo que incluye los costos de desarrollo, fabricación y la infraestructura asociada. Sin embargo, se espera

que los costos disminuyan a medida que se realicen avances tecnológicos y se logre una mayor escala de producción.

## Almacenamiento de hidrógeno

El almacenamiento es una fase crucial en el desarrollo de la economía del hidrógeno, ya que dependiendo de las aplicaciones en las que se consume, se debe seleccionar el método más apropiado para cada caso. El hidrógeno se caracteriza por una densidad muy baja a temperatura ambiente, lo que requiere volúmenes de almacenamiento muy grandes y tanques pesados (Massaro *et al.*, 2023).

*Tanques a presión:* la forma convencional de almacenar hidrógeno gaseoso es en botellas de acero o en tanques de fibra de carbono ligeros que han demostrado su capacidad para operar a presiones de 350 bar. Una solución prometedora es el uso de botellas de almacenamiento a 700 bar, aunque actualmente se encuentran en fase de demostración. Sin embargo, antes de que se pueda iniciar la producción comercial de sistemas de almacenamiento de hidrógeno a alta presión, es necesario abordar varios aspectos, incluyendo la seguridad, la resistencia (efecto de los ciclos de carga en la vida útil del tanque) y el costo, considerando el alto costo actual de los tanques compuestos para alta presión y la energía requerida para comprimir hasta esos niveles. Además, la forma cilíndrica ideal dificulta la adaptación del almacenamiento al espacio disponible en el vehículo (González, s.f.).

*Microesferas de vidrio:* representan una opción interesante para el almacenamiento de hidrógeno, ya que son económicas y pueden retener hidrógeno a muy baja presión. Estas esferas de vidrio se calientan, lo que aumenta la permeabilidad de sus paredes, luego se llenan sumergiéndolas en gas hidrógeno a alta presión. Posteriormente, las esferas se enfrían a temperatura ambiente y el hidrógeno queda atrapado en su interior. Un aumento adicional en la temperatura libera el hidrógeno contenido en estas esferas. El principal desafío radica en comprender cómo activar y desactivar todo el proceso de manera controlada. Este enfoque tiene el potencial de ser un método de

almacenamiento de hidrógeno portátil, seguro, económico y recargable/reciclable (Izkarate, 2010).

*Hidruros recargables:* el hidrógeno tiene la capacidad de reaccionar con varios metales de transición, formando compuestos conocidos como hidruros. Durante décadas se ha estudiado a fondo los hidruros y se conocen bien sus propiedades. Estas reacciones son reversibles bajo condiciones adecuadas de presión y temperatura, lo que permite cargar y descargar una masa determinada de metal un número prácticamente ilimitado de veces, convirtiéndolo en un sólido depósito de almacenamiento de hidrógeno. La mayoría de los hidruros operan a presiones moderadas, no presentan pérdidas y también permiten la purificación del hidrógeno. El hidrógeno se libera al aplicar calor a los materiales, como calentar el tanque, o al reducir la presión. Este tipo de almacenamiento es seguro y manejable, y permite almacenar una mayor cantidad de hidrógeno por unidad de volumen en comparación con el hidrógeno líquido. Sin embargo, debido a los bajos niveles de retención de hidrógeno, el sistema resulta pesado, lo que lo hace menos adecuado para aplicaciones móviles. Sin embargo, es especialmente útil en aplicaciones estacionarias aisladas que requieren energía eléctrica proveniente de fuentes renovables (González, s.f.).

*Bulk amorphous materials (BAM):* son materiales metálicos compuestos principalmente de titanio, aluminio y hierro, que tienen la capacidad de almacenar altas cantidades de hidrógeno, llegando hasta un 5 % o 6 % de su peso total. Estos materiales están basados en aleaciones multicomponente, como las basadas en Ti-Al-Fe, y se presentan en forma de empaquetados con porosidad controlada en una fase líquida superenfriada. Se ha observado que tienen una alta resistencia a la fragilización y desintegración, y podrían ser producidos a gran escala a un bajo costo. Actualmente, se está trabajando en verificar su capacidad de almacenamiento y liberación de hidrógeno (Azkarate, 2010).

*Hidrógeno líquido:* el hidrógeno puede ser almacenado en forma líquida a temperaturas criogénicas. Una de las principales ventajas del hidrógeno líquido es su alta densidad de energía por unidad de volumen, incluso a presiones relativamente bajas, lo cual

lo diferencia del hidrógeno gaseoso. Sin embargo, también presenta desventajas. Durante el proceso de licuefacción del hidrógeno, se pierde aproximadamente entre el 30 % y el 40 % de la energía. Además, hay pérdidas por evaporación durante los periodos en los que el sistema no se utiliza, y se requiere el uso de contenedores criogénicos altamente aislados para su almacenamiento (González, s.f.).

*Hidruros metálicos:* son aleaciones que actúan como una especie de esponja, absorbiendo hidrógeno gaseoso y formando compuestos sólidos de hidrógeno mediante una reacción química bajo presión. Este método de almacenamiento en materiales sólidos ofrece una alternativa segura y eficiente para almacenar grandes volúmenes de hidrógeno. Cuando se necesita utilizar el hidrógeno, se libera del hidruro en condiciones específicas de temperatura y presión. Este proceso puede repetirse sin que se pierda la capacidad de almacenamiento del material. Un factor clave es la facilidad con la que se puede recuperar el hidrógeno, lo cual está determinado por la presión de disociación del material, una propiedad dependiente de la temperatura. Sin embargo, es necesario mejorar la comprensión del mecanismo y la termodinámica de la formación del hidruro a partir del hidrógeno gaseoso (Azkarate, 2010).

*Hidrógeno comprimido:* es un método utilizado para almacenar hidrógeno en estado gaseoso en cilindros o tanques a alta presión. Consiste en comprimir el hidrógeno a presiones superiores a la presión atmosférica, generalmente en el rango de 200 a 700 bares (bar), para reducir su volumen y aumentar su densidad de energía. En este proceso, el hidrógeno gaseoso es introducido en un recipiente especialmente diseñado y sellado, que puede ser un cilindro de acero o una estructura similar, capaz de soportar las altas presiones. El hidrógeno se comprime utilizando sistemas de compresión, donde se aplican fuerzas para reducir el volumen del gas y aumentar su densidad. Una vez comprimido, el hidrógeno se almacena en el cilindro o tanque hasta que se necesite su uso posterior (Sastresa y Bribián, 2011).

Lo anterior, ha permitido identificar que las dos opciones más prometedoras para el almacenamiento son las de hidrógeno comprimido y el almacenamiento

de hidrógeno líquido. El hidrógeno comprimido implica almacenar el hidrógeno gaseoso a alta presión en cilindros o tanques especialmente diseñados. Este método es ampliamente utilizado y se considera seguro y maduro en términos de tecnología. Ofrece un acceso rápido y una recarga conveniente, lo que es beneficioso en la aviación para minimizar el tiempo de inactividad entre vuelos. Según Sastresa y Bribián (2011), su principal limitación es la baja densidad de energía, lo que significa que se requiere un mayor volumen para almacenar la misma cantidad de energía en comparación con otros métodos.

De acuerdo con González (s.f.), el almacenamiento de hidrógeno líquido implica enfriar el hidrógeno gaseoso a temperaturas muy bajas para convertirlo en líquido y almacenarlo en tanques criogénicos. Este método ofrece una mayor densidad de energía en comparación con el almacenamiento de hidrógeno comprimido. Esto es especialmente ventajoso en la aviación, donde el espacio disponible en las aeronaves es limitado. Sin embargo, el almacenamiento de hidrógeno líquido requiere sistemas de almacenamiento y manipulación criogénicos más complejos, lo que implica costos adicionales y requisitos de seguridad más estrictos.

El almacenamiento de hidrógeno comprimido ofrece una recarga conveniente, mientras que el almacenamiento de hidrógeno líquido proporciona una mayor densidad de energía. La elección entre estos métodos dependerá de factores como los requisitos específicos de la aeronave, el rango de vuelo, la eficiencia, la infraestructura disponible y los costos asociados.

## Compañías precursoras de las celdas de hidrógeno

En el ámbito de la aviación, algunas compañías que hoy en día han desarrollado, aplicado y realizado ensayos con celdas de hidrógeno son:

- a. *ZeroAvia:* es una empresa con sede en el Reino Unido y en Estados Unidos, que se dedica al desarrollo de tecnologías de propulsión de hidrógeno

para aviones comerciales. Han trabajado en la adaptación de motores de aviones existentes para utilizar celdas de hidrógeno, con el objetivo de lograr vuelos comerciales de cero emisiones. Tal como afirma Pérez (2021), se logró comprobar la efectividad y el funcionamiento del motor de hidrógeno diseñado para aviones de tamaño medio, con capacidad de generar 600 kW de potencia. Específicamente, este motor está destinado a aviones con hasta 19 asientos. La prueba y demostración se llevaron a cabo en tierra, donde se ubicó el motor sobre una plataforma móvil de 15 toneladas proporcionada por la empresa HyperTruck. Dicha plataforma se basa en un camión militar M977 HEMTT diseñado para soportar sistemas eléctricos de hidrógeno para aviones de 40 a 80 asientos. El nuevo motor, parte del proyecto HyFlyer II de ZeroAvia, se colocó sobre esta plataforma, sentando así las bases para futuros vuelos con emisiones cero. Esta prueba no solo demostró la resistencia del HyperTruck, sino que también validó el potencial de la futura mecánica ZA-600 para aviones de 19 pasajeros desarrollados por ZeroAvia. Una vez que se haya demostrado su validez, este motor será instalado en los próximos meses en un avión Dornier 228 como parte del proyecto HyFlyer II. Las pruebas en condiciones reales se llevarán a cabo a finales de este mismo año en las instalaciones de ZeroAvia en Kemble, Reino Unido.

- b. *Universal Hydrogen*: es una empresa con sede en Estados Unidos, que se enfoca en crear una cadena de suministro de hidrógeno para la aviación. Su objetivo es proporcionar hidrógeno de forma segura y rentable para su uso en aviones, trabajando en colaboración con aerolíneas, fabricantes de aviones y proveedores de infraestructura. Según lo señalado por Urrea (2023), un avión regional de 40 pasajeros, perteneciente a Universal Hydrogen, realizó un vuelo de prueba utilizando propulsión de celda de combustible de hidrógeno. Durante el vuelo, conocido como *Lightning McClean*, la aeronave alcanzó una altitud de 3500 metros sobre el nivel del mar y voló durante

15 minutos. El despegue tuvo lugar a las 8:41 de la mañana en el Aeropuerto Internacional del Condado de Grant, Washington. Este vuelo, realizado bajo un certificado de aeronavegabilidad especial otorgado por la FAA, marca el inicio de una serie de pruebas que se llevarán a cabo durante dos años.

Como menciona Urrea (2023), la compañía tiene como objetivo finalizar estas pruebas en 2025, con el lanzamiento del servicio de pasajeros en el avión regional ATR 72, que ha sido modificado para funcionar con hidrógeno. En el vuelo histórico estuvieron presentes representantes y clientes de Universal Hydrogen, así como de otras empresas que están incursionando en la tecnología de aviones de hidrógeno en Estados Unidos y Europa. Este hito marca un paso importante hacia la implementación de aviones propulsados por hidrógeno en la industria aeronáutica.

- c. *Airbus*: es uno de los principales fabricantes de aviones a nivel mundial, ha estado explorando el uso de celdas de hidrógeno en la aviación. Han presentado conceptos de aviones propulsados por hidrógeno, como el Airbus ZEROe, que podrían ser impulsados por celdas de hidrógeno y emitir cero emisiones de carbono. De acuerdo con Forbes Staff (2022), Airbus se encuentra en proceso de desarrollar un motor de celda de combustible de hidrógeno como parte de su estrategia para lanzar un avión comercial propulsado por este tipo de combustible en 2035. Este sistema es una de las opciones consideradas para un posible avión basado en hidrógeno de emisiones cero. Aunque esta es la primera vez que el principal fabricante de aviones del mundo se embarca directamente en el desarrollo de tecnología de motores, Glenn Llewellyn, jefe del proyecto de cero emisiones de Airbus, afirmó que la empresa no necesariamente llevaría a cabo el desarrollo del sistema por sí sola si otra compañía lo implementara. Airbus explicó que existen dos formas de utilizar el hidrógeno como combustible para la propulsión de aeronaves: mediante la combustión del hidrógeno en una turbina de gas o utilizando celdas de combustible que convierten el

hidrógeno en electricidad para alimentar un motor eléctrico. También es posible combinar ambas técnicas.

- d. *Boeing*: empresa que está explorando soluciones de propulsión de hidrógeno para la aviación. Han realizado investigaciones y estudios de viabilidad sobre el uso de celdas de hidrógeno en aviones comerciales y han presentado conceptos como el Boeing ecoDemonstrator, que evalúa tecnologías sostenibles para la aviación, incluyendo celdas de hidrógeno. En consonancia con María (2021), Boeing fue responsable del diseño del primer prototipo de avión de hidrógeno, el cual fue sometido a pruebas por primera vez en el 2008. Sin embargo, el vuelo de su pequeño avión monomotor de prueba tuvo una duración de solo 20 minutos. Recientemente, Boeing reconoció que las celdas de combustible no pudieron suministrar la energía primaria necesaria para aviones comerciales de gran tamaño. El nuevo concepto de FlyZero difiere de esto, ya que opera alimentando directamente los motores con hidrógeno, en lugar de utilizar varios motores eléctricos. Se estima que los primeros vuelos de prueba de esta tecnología tendrán lugar en el año 2030.
- e. *Rolls-Royce*: conocida por sus motores aeroespaciales, está investigando y desarrollando tecnologías de propulsión de hidrógeno para aviones. Han presentado conceptos de aviones propulsados por hidrógeno y están trabajando en la adaptación de sus motores existentes para utilizar celdas de hidrógeno. También están colaborando con otras compañías y entidades para impulsar la adopción de tecnologías de hidrógeno en la aviación.

Según Fuentes (2022), Rolls-Royce continúa avanzando en su compromiso con el hidrógeno y ha anunciado una colaboración con Hyundai para llevar la tecnología de pilas de combustible al ámbito de los taxis voladores, es decir, en el campo de los viajes aéreos urbanos y regionales.

Además, la compañía está llevando a cabo un nuevo proyecto para demostrar que el hidrógeno será el combustible que impulsará los aviones

del futuro, y ya ha establecido una fecha para la primera prueba en un motor Rolls-Royce AE 2100. De acuerdo con la empresa británica, Rolls-Royce y Hyundai Motor Group tienen como objetivo introducir la propulsión totalmente eléctrica y la tecnología de celdas de combustible de hidrógeno en el mercado de la movilidad aérea avanzada, con un primer prototipo programado para el año 2025. De esta manera, ambas compañías se dedican a desarrollar celdas de combustible de hidrógeno, sistemas de almacenamiento e infraestructura para la movilidad aérea sostenible, impulsando así la adopción de esta tecnología en aeronaves y sistemas de propulsión totalmente eléctricos e híbridos de la reconocida empresa especializada en aviación y automóviles de lujo.

De lo anterior, se destaca que varias compañías de la industria de la aviación están llevando a cabo investigaciones y desarrollos en el campo de las celdas de hidrógeno como una alternativa sostenible para la propulsión de aviones. Empresas como ZeroAvia, Universal Hydrogen, Airbus, Boeing y Rolls-Royce están trabajando en diferentes proyectos y colaboraciones para explorar y demostrar la viabilidad de esta tecnología.

Estos avances y colaboraciones demuestran el creciente interés de la industria aeronáutica en el uso del hidrógeno como combustible, con el objetivo de lograr vuelos de emisiones cero y reducir el impacto ambiental de la aviación en el futuro.

## Costos de las celdas de combustibles

El costo de las celdas de combustible de hidrógeno para la aviación puede variar ampliamente dependiendo de varios factores, como el tamaño y la capacidad de las celdas, el nivel de producción y la tecnología utilizada.

De acuerdo con Aguirre (2013), las celdas de combustible de hidrógeno son tecnologías aún en desarrollo y se consideran relativamente costosas en comparación con los sistemas de propulsión convencionales basados en combustibles fósiles. Sin embargo, se espera

que a medida que la tecnología avance, los costos disminuyan debido a la mejora de la eficiencia y la escala de producción.

La evaluación de costos generalmente se realiza en términos de la inversión de capital por unidad de potencia instalada, expresada en dólares por kilovatio (\$/kW). Dado que el hidrógeno como vector energético puede ser producido mediante diversas tecnologías, esto también afecta significativamente su precio.

En línea con Aguirre (2013), en el caso de los sistemas estacionarios basados en celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) y de carbonato fundido (MCFC), otros estudios indican que los costos de unidades con una potencia de 200-300 kW están alrededor de los 12.000 US\$/KW. Nuevas tecnologías y técnicas de producción a gran escala se espera que reduzcan sustancialmente los precios en el futuro. Las celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC) tienen dificultades para reducir sus costos debido a su tecnología madura y a los requerimientos de platino. Algunas empresas que fabricaban estas celdas han optado por cambiar a otra tecnología con un mayor potencial de reducción de costos.

Para hacer una primera comparación de paridad, se puede contrastar el costo de inversión en celdas de combustible con el de centrales de ciclo combinado alimentadas con gas natural, que tienen costos de inversión alrededor de 600-700 US\$/kW y una eficiencia del 60 %. Las centrales de ciclo combinado son consideradas los principales competidores de esta tecnología en aplicaciones estacionarias, mientras que para aplicaciones móviles se estima que el rango competitivo en el sector automotriz se encuentra entre 50 y 200 US\$/kW.

El costo de las celdas de combustible de hidrógeno para la aviación es un aspecto clave para considerar en la adopción de esta tecnología. Si bien actualmente se consideran relativamente costosas en comparación con los sistemas convencionales, se espera que los avances tecnológicos, la escalabilidad de la producción y la mejora de la eficiencia contribuyan a reducir significativamente los costos en el futuro.

Los estudios sugieren que el costo de las celdas PEMFC podría reducirse por debajo de los 100 US\$/kW en unos 15 a 20 años, mientras que se espera que las celdas SOFC y MCFC para sistemas estacionarios también experimenten una disminución sustancial en los precios a medida que se desarrollen nuevas tecnologías y se implementen técnicas de producción a gran escala.

A pesar de los desafíos actuales en cuanto a los costos, es importante tener en cuenta que la adopción de celdas de hidrógeno en la aviación puede ofrecer beneficios significativos en términos de reducción de emisiones y sostenibilidad ambiental. A medida que la tecnología madure y se implementen economías de escala, es posible que las celdas de combustible de hidrógeno se vuelvan más favorables en términos de costos y competitividad.

Es necesario seguir impulsando la investigación y el desarrollo en este campo, así como fomentar la colaboración entre industrias y gobiernos para acelerar la adopción de tecnologías de celdas de combustible de hidrógeno en la aviación y alcanzar los objetivos de movilidad sostenible y reducción de emisiones en el sector aeronáutico.

Tabla 1.  
Comparación de las celdas de combustible con otros sistemas de generación eléctrica

	Motor alternativo: diésel	Generador de turbina	Fotovoltaica	Turbina de viento	Celda de combustible
<b>Rango de capacidad</b>	500 kW – 50 MW	500 kW – 5 MW	1 kW – 1 MW	10 kW- 1 kW	200 kW – 2MW
<b>Eficiencia</b>	35 %	29-42 %	6-19 %	25 %	40-85 %
<b>Costo de capital (\$/kW)</b>	200-350	450-870	6600	1000	1500-3000
<b>Costo de operación y mantenimiento (\$/kW)</b>	0.005-0.015	0.005-0.0065	0.001-0.004	0.01	0.0019-0.0153

Fuente: Alvarado (2013).



## Conclusiones

La presente investigación se centró en la obtención de hidrógeno como fuente de energía primaria para la aviación, evaluando diversos métodos y fuentes para su producción. Se identificaron diferentes enfoques, como el reformado de combustible fósil, la gasificación de carbono, la división termoquímica del agua, la electrólisis a alta temperatura, la electrólisis fotovoltáica entre otros, cada uno con características particulares en términos de eficiencia, costos y emisiones de gases.

Los resultados mostraron que la transición hacia un futuro más sostenible requiere la exploración y desarrollo de tecnologías que permitan la producción eficiente, limpia y económica de hidrógeno. Se destacó la abundancia de hidrógeno en el universo y su carácter limpio, lo que contribuye a mejorar la calidad del aire y promueve la seguridad energética, sostenibilidad y viabilidad económica a nivel mundial. Sin embargo, se identificaron desafíos significativos en relación con el almacenamiento de hidrógeno, debido a su baja densidad y punto de ebullición, así como los riesgos asociados con fugas, fragilización de aceros y posibles explosiones. Estos desafíos representan obstáculos que deben abordarse para establecer una producción de hidrógeno económicamente viable y segura.

Se examinaron dos tecnologías principales de celdas de combustible de hidrógeno: las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico y las celdas de combustible de óxido sólido. Cada una mostró ventajas y aplicaciones específicas, dependiendo de los requisitos de rendimiento, costos, infraestructura y disponibilidad tecnológica y de materiales en el momento de su implementación en la aviación. Para el almacenamiento de hidrógeno en aviación, se consideraron dos opciones prometedoras: el almacenamiento de hidrógeno comprimido y el almacenamiento de hidrógeno líquido, ambas con ventajas y desventajas en términos de densidad de energía y complejidad de los sistemas.

El análisis de costos de las celdas de combustible de hidrógeno en la aviación reveló que, si bien

actualmente son relativamente costosas en comparación con los sistemas convencionales, se espera que los avances tecnológicos, la producción a gran escala y las mejoras en eficiencia contribuyan a reducir significativamente los costos en el futuro. La proyección sugiere que las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico podrían alcanzar precios competitivos en 15 a 20 años, mientras que las celdas de óxido sólido para sistemas estacionarios también experimentarán reducciones de precios con el tiempo.

En conclusión, los resultados de esta investigación enfatizan la importancia de continuar la investigación y desarrollo de tecnologías de celdas de combustible de hidrógeno en la aviación. Asimismo, subrayan la necesidad de fomentar la colaboración entre industrias y gobiernos para acelerar la adopción de estas tecnologías y alcanzar los objetivos de movilidad sostenible y reducción de emisiones en el sector aeronáutico. Con el tiempo y a medida que la tecnología madure y se implementen economías de escala, se espera que las celdas de combustible de hidrógeno se vuelvan más competitivas en términos de costos y desempeñen un papel clave en la promoción de una aviación más limpia y respetuosa con el medio ambiente.

## Referencias

- Acar, C. & Dincer, I. (2013). Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. *Int. J. Hydrogen Energy*, 39(1), 1-12.
- Acar, C. & Dincer, I. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *Int. J. Hydrogen Energy*, 40(34), 11094-11111.
- Aguirre, O. (2013). *Celdas de hidrógeno y su potencial de aplicación*. Universidad Veracruzana.
- Adler, E. J. & Martins, J. R. (2023). *Hydrogen-powered aircraft: fundamental concepts, key technologies, and environmental impacts*. Progress in Aerospace Sciences.
- Alvarado, J. (2013). Estudio comparativo de las diferentes tecnologías de celdas de combustible. *Cerámica y Vidrio*, 53, 105-117. <https://doi.org/10.3989/cyv.142013>
- Azkarate, I. (2010). *Almacenamiento de hidrógeno*. Asociación Nacional de Ingenieros de ICAI.

- Beach, P. (2005). *Towards a hydrogen economy n.º 5*.
- Becherif, M., Ramadan, H., Cabaret, K. & Bethoux, O. (2015). Hydrogen Energy Storage: New Techno-Economic Emergence Solution Analysis. *Energy Procedia*, 74, 371-380.
- Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. (s.f.). *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad*. <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%20%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>
- Concha, A., Andalaft, A. y Farías, Ó. F. (2009). Gasificación de carbón para generación de energía eléctrica: análisis con valoración de opciones Reales. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 17(3). <https://doi.org/10.4067/s0718-33052009000300008>
- Departamento de Energía de Estados Unidos. (2022). *El Departamento de Energía de EE. UU. proyecta un fuerte crecimiento en el sector de la energía eólica*. <https://www.energy.gov/articles/el-departamento-de-energia-de-eeuu-proyecta-un-fuerte-crecimiento-en-el-sector-de-la#:~:text=La%20edici%C3%B3n%20de%202023%20del,2.5%20millones%20de%20hogares%20estado unidenses>.
- Firestone. (2023). *Conoce las celdas de hidrógeno: el combustible del futuro*. <https://www.firestone.com.mx/tips-firestone/tecnologia-de-llantas/conoce-las-celdas-de-hidrogeno/>
- Fuentes, P., Samuel, Á. & Arboleda, A. (s.f.). *Celdas de hidrógeno: impacto de la implementación de estaciones de combustible de hidrógeno frente a las ventas de estos vehículos*. [https://repository.cesa.edu.co/bitstream/handle/10726/3263/ADM\\_1018496788\\_2020\\_2.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://repository.cesa.edu.co/bitstream/handle/10726/3263/ADM_1018496788_2020_2.pdf?sequence=4&isAllowed=y)
- Fuentes, V. (2022). *Rolls-Royce quiere llevar la pila de combustible de hidrógeno a los taxis voladores, y ya ha elegido a una marca para hacerlo*. Motor Pasión. <https://www.motorpasion.com/tecnologia/rolls-royce-quiere-llevar-pila-combustible-hidrogeno-a-taxis-voladores-ha-elegido-a-marca-para-hacerlo>
- González, A. (s.f.). *Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno*. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.
- Llorca, J. (2010). *El hidrógeno y nuestro futuro energético* (1.ª ed.). Editions UPC.
- María, F. (2021). *El avión de hidrógeno hará viajes sin emisiones de carbono*. Ok Diario <https://okdiario.com/ciencia/avion-hidrogeno-hara-viajes-sin-emisiones-carbono-8286624>
- Massaro, M. C., Biga, R., Kolisnichenko, A., Marocco, P., Monteverde, A. H. & Santarelli, M. (2023). Potential and technical challenges of on-board hydrogen storage technologies coupled with fuel cell systems for aircraft electrification. *Journal of Power Sources*, 555, 232397.
- Mayén, R. (2011). Celdas de combustible de óxido sólido. ¿Una de las soluciones al problema energético? *Ide@s Concyteg*, 6(72), 647-661.
- Naciones Unidas. (2022). *Las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> repuntaron en 2021 hasta su nivel más alto de la historia*. <https://unfccc.int/es/news/las-emisiones-mundiales-de-co2-repuntaron-en-2021-hasta-su-nivel-mas-alto-de-la-historia>
- Nuevo, D. (2022). *Tipos de celdas de combustible*. Es Hidrógeno. <https://eshidrogeno.com/celda-combustible/>
- Pérez, A. (2021). Éxito para ZeroAvia en la primera prueba en tierra de su motor de hidrógeno. Híbridos y Eléctricos. [https://www.hibridosyelectricos.com/aviones/zeroavia-exito-primer-prueba-tierra-nuevo-motor-hidrogeno\\_48128\\_102.html](https://www.hibridosyelectricos.com/aviones/zeroavia-exito-primer-prueba-tierra-nuevo-motor-hidrogeno_48128_102.html)
- Pérez, C. F., Di Caprio, D., Mahé, É., Damien, F. & Lamare, J. (2015). Cyclic voltammetry simulations with cellular automata. *Journal of Computational Science*, 11, 269-278.
- Rincón, E. D., García, J. J. y Bermúdez, J. R. (2020). Estado del arte de las celdas de combustible. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 1(33), 36-49. <https://ojs.unipamplona.edu.co/ojsviceinves/index.php/rcta/article/view/8333>.
- Rozo, Q. S. y Tibaquirá, G. E. (2007). Celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico. *Scientia et Technica*, vol. XIII(37), 279-283. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Saavedra, A. U., Figueredo, F. y Cortón, E. (2014). Celdas de combustible biológicas basadas en el metabolismo fotosintético. *Química Viva*, 3(12), 174-186. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Química Biológica.
- Sastresa, L. y Bribián, I. (2011). *Hidrógeno: producción, almacenamiento y usos energéticos*.
- Shahid, M. (2012). Production and enhancement of hydrogen from water. *A Review Systems*, 134, 1-4.
- Forbes Staff. (2022). *Airbus desarrolla un motor de celda de combustible para un avión de hidrógeno*. Forbes Chile. <https://forbes.cl/sostenibilidad/2022-12-01/airbus-desarrolla-un-motor-de-celda-de-combustible-para-un-avion-de-hidrogeno>

- Tibaquirá, J. y Posner, J. (2009). Diseño y construcción de una celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico. *Revistas UTP*, 2(42). <https://doi.org/10.22517/23447214.2569>
- Turner, J. A. (2004). Sustainable hydrogen production. *Science*, 305(5686), 972-974. <https://doi.org/10.1126/science.1103197>
- Turner, G., Severdrup, M. K., Mann, P., Maness, B., Kroposki, M., Ghirardi, R. J. & Blake, D. (2008). *Renewable hydrogen production*.
- Urrea, D. I. (2023). *Vuela el primer avión con combustible de hidrógeno ¿Comienzo de la descarbonización?* Enter.co <https://www.enter.co/cultura-digital/ciencia/vuela-el-primer-avion-con-combustible-de-hidrogeno-comienzo-de-la-descarbonizacion/>
- Venegas, D., Meléndrez, M., Celi, S. y Ayabaca, C. (2016). Métodos amigables de producción de hidrógeno como fuente de energía limpia. II Jornadas Iberoamericanas de Motores Térmicos y Lubricación. Universidad Nacional de La Plata.