

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS DE
CONVERSIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA A PARTIR DE
HIDRÓGENO VERDE Y AZUL**

SANDRA BIBIANA MORA ALVAREZ

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA**

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

PAMPLONA, diciembre de 2020

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS DE
CONVERSIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA A PARTIR DE
HIDRÓGENO VERDE Y AZUL**

SANDRA BIBIANA MORA ALVAREZ

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de
INGENIER(A)O QUÍMIC(A)O**

Director: ANA MARIA ROSSO CERON

Doctora en Ingeniería Química

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA**

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Pamplona, diciembre de 2020

Dedicatoria

Esta monografía está dedicada a mi familia, en especial a mi hermana menor la “enana”, a mi mamá y mi abuelo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente a mi mamá, papá, hermanas, abuelos y nonos, que siempre me han apoyado y me han guiado por el camino que me ha llevado a ser quien soy hoy en día.

Quiero agradecer a la universidad de Pamplona por permitirme desarrollar mis estudios de pregrado y al mismo tiempo pertenecer en el grupo de baloncesto femenino. De igual forma quiero agradecer a los docentes de la universidad por guiarme en el transcurso de mi formación profesional, en especial a la Dra Ana Rosso por ser mi guía en el desarrollo de este documento.

Finalmente me gustaría agradecer a mis compañeros de la universidad, que hicieron más agradable el transcurso de mis estudios, a mis amigos de pamplona por permitirme ser parte de sus vidas, por esos recuerdos que permanecerán en mi memoria y que hicieron mi estadía en Pamplona muy placentera.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. JUSTIFICACIÓN.....	7
3. OBJETIVOS.....	8
3.1 Objetivo general.....	8
3.2 Objetivos específicos.....	8
4. METODOLOGIA.....	8
5. EL HIDRÓGENO.....	9
5.1 FUENTES DE HIDRÓGENO.....	9
5.1.1 Hidrógeno verde.....	9
5.1.1.1 Celdas de electrolisis alcalinas.....	10
5.1.1.2 Celdas de electrolisis de membrana de intercambio de protones.....	10
5.1.1.3 Celdas de electrolisis de óxido sólido.....	11
5.1.1.4 Celdas de electrolisis microbiana.....	11
5.1.1.5 Celdas fotoelectroquímicas.....	11
5.1.1.6 Fermentación oscura.....	11
5.1.1.7 Fermentación fotográfica.....	12
5.1.1.8 Pirolisis.....	12
5.1.1.9 Biofotólisis.....	12
5.1.1.10 Gasificación.....	12
5.1.2 Hidrógeno azul.....	12
5.1.2.1 Reformado con vapor de metano.....	13
5.1.2.2 Oxidación parcial.....	13
5.1.2.3 Reformado autotérmico de metano.....	13
6. TECNOLOGÍAS DE CONVERSIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA A PARTIR DE HIDRÓGENO.....	13

6.1	Tecnologías de conversión.....	14
6.1.1	Pila de combustible de hidrógeno	15
6.1.1.1	Pila de combustible de membrana de intercambio de protones.....	16
6.1.1.2	Pilas de combustible de óxido sólido	17
6.1.1.3	Pilas de combustible de carbonato fundido	18
6.1.2	Motor de combustión interna de hidrógeno	18
6.1.3	Encendido por compresión de carga homogénea.....	18
6.1.4	Turbinas de gas	19
6.1.5	Sistemas de conversión químicos	19
6.2	Tecnologías de ALMACENAMIENTO	20
6.2.1	Almacenamiento en estado gaseoso.....	21
6.2.1.1	Hidrogeno comprimido a alta presión	21
6.2.1.2	Almacenamiento subterráneo natural	21
6.2.2	Almacenamiento hidrógeno líquido.....	22
6.2.2.1	Almacenamiento del hidrógeno criocomprimido	22
6.2.2.2	Portadores de hidrógeno orgánico líquido.....	22
6.2.3	Almacenamiento de hidrógeno sólido	23
6.2.3.1	Fisorción	23
6.2.3.2	Quimisorción	23
7.	COMPARACION DE LAS TECNOLOGIAS DE CONVERSION Y ALMACENAMIENTO DE HIDROGENO VERDE Y AZUL MEDIANTE ASPECTOS DE SOSTENIBILIDAD.....	24
7.1	Aspectos tecnológicos.....	24
7.1.1	Tecnologías de conversión.....	24
7.1.2	Tecnologías de almacenamiento.....	25
7.2	Aspectos económicos.....	26
7.2.1	Tecnologías de conversión.....	26

7.2.2	Tecnologías de almacenamiento.....	26
7.3	Aspectos ambientales.....	27
7.3.1	Tecnologías de conversión.....	27
7.3.2	Tecnologías de almacenamiento.....	28
7.4	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO Y CONVERSIÓN.....	29
8.	CONCLUSIONES.....	32
9.	RECOMENDACIONES.....	33
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Eficiencia eléctrica de las tecnologías de conversión de hidrógeno.	24
Tabla 2. Características de los tipos de celdas de combustible.....	24
Tabla 3. Capacidades de almacenamiento de las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno.	25
Tabla 4. Costos de las tecnologías de conversión.....	26
Tabla 5. Costo de las tecnologías de almacenamiento.....	26
Tabla 6. Costo de las tecnologías de almacenamiento.....	28
Tabla 7. Ventajas y desventajas de las tecnologías de almacenamiento y conversión de energía a partir de hidrógeno.	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tecnologías de conversión de energía a partir de hidrógeno y sus principales aplicaciones.....	15
Figura 2. Clasificación de las tecnologías de conversión de energía a partir de hidrógeno. ...	15
Figura 3. Sistema de una pila de combustible de membrana de electrolito de polímero PEMFC no lineal.....	16
Figura 4. Diagrama de una pila de combustible de óxido sólido SOFC.....	17
Figura 5. Clasificación de las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno.....	21
Figura 6. Impactos ambientales en las tecnologías de conversión.....	28

ABREVIATURAS

Minciencias: ministerio de ciencias, tecnología e innovación.

UPME: Unidad de planeación minero energética.

PEM: Membrana de intercambio de protones.

SOE: Electrólisis de óxido sólido.

SMR: Reformado con vapor de metano.

POX: Oxidación parcial.

ATR: Reformado autotérmico de metano.

HER: Reacción de desprendimiento de hidrógeno.

HOR: Reacción de oxidación de hidrógeno.

PEMFC: Pilas de membrana de intercambio de protones.

SOFC: Pilas de combustible de óxido sólido.

MCFC: Pilas de combustible de carbonato fundido.

HICE: Motor de combustión interna de hidrógeno.

ICE: Motor de combustión interna.

HCCI: Encendido por compresión de carga homogénea.

SI: Motores de ignición.

CI: Motores de compresión.

GT: Turbina de gas.

FER: Fuentes de energía renovables.

HPCH: Hidrógeno comprimido a alta presión.

LH: Hidrógeno líquido.

CCH: Hidrógeno criocomprimido.

LOHC: Portadores de hidrógeno orgánico líquido.

MOF: Estructura orgánica de metal.

NMHC: Hidrocarburos diferentes al metano.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el ecosistema terrestre se ve amenazado por el calentamiento global y la decadencia del sistema climático ocasionados por el uso masivo de combustibles fósiles (Han et al., 2020). Al mismo tiempo, la utilización de energías convencionales está incrementando un 1.1% por año en los países desarrollados, como resultado, se espera que para el 2025 se alcance un promedio de 3.2% en la utilización de energía primaria en las economías emergentes (Usman et al., 2020). Por otra parte, en 2017 los combustibles fósiles se utilizaron para la producción de energía de más del 85% de las fuentes a nivel mundial, conjuntamente, los combustibles fósiles como el petróleo, gas natural y carbón actúan como fuente primaria para varios medios energéticos (Singh et al., 2020). No obstante, se espera que las energías renovables tomen mayor importancia en los siguientes años, a pesar de que el pilar del desarrollo mundial siga siendo las energías fósiles (Morales et al., 2017).

Uno de los elementos más abundantes en la tierra es el hidrogeno, sin embargo, no se encuentra en estado libre, por esto, es necesario utilizar otras fuentes de energía para su obtención (Villa, 2013). No obstante, el hidrógeno tiene el potencial para desplazar el uso de combustibles fósiles en el transporte, la industria y edificios (Cloete et al., 2020).

Actualmente en Colombia, el ministerio de ciencia, tecnología e innovación (minciencias), en compañía de la unidad de planeación minero energética (UPME), promueven el desarrollo de las tecnologías del hidrógeno mediante la convocatoria 879 del 2020 “convocatoria energía sostenible y su aporte a la planeación minero energética” con el objetivo de fortalecer el conocimiento científico y tecnológico en los procesos de transición energética en Colombia, equilibrando sus ejes de desarrollo económico, ambiental y social, con las tendencias en ciencia, tecnología e innovación, mediante el desarrollo de proyectos que promuevan la incorporación y transferencia de nuevos conocimientos científicos y tecnológicos (convocatoria Colciencias).

Por consiguiente, la presente monografía se desarrolla mediante una metodología de investigación exploratoria de nivel básico, estructurada en tres secciones. En la primera sección se encuentra el hidrógeno y las tecnologías de producción; en la siguiente sección se detallan las tecnologías de conversión y almacenamiento de energía a partir del hidrógeno, teniendo en cuenta los sectores energéticos nacionales; finalmente, se encuentra una comparación entre las tecnologías mencionadas en la segunda sección, para lo cual se tienen en cuenta aspectos tecnológicos, ambientales y económicos.

2. JUSTIFICACIÓN

Los combustibles fósiles comprendidos por el carbón, gas natural y petróleo son los principales recursos para satisfacer la demanda energética de cualquier país, de manera que la evolución económica depende de ello. El crecimiento acelerado de la población mundial y por ende el de la industrialización han generado un gran incremento en la demanda mundial de energía; de ahí que los combustibles no convencionales se estén agotando por su naturaleza no renovable (Sharma et al., 2020). Se pronostica que el consumo mundial de energía alcanzará su clímax en el 2035, así mismo, se predice que después de 2040 la economía mundial entre en una prolongada depresión. Se especuló que las reservas actuales de combustibles fósiles pueden soportar un máximo de 40, 60 y 156 años para el petróleo, gas natural y carbón respectivamente (Abe et al., 2019).

El cambio climático se ha venido estableciendo como uno de los principales desafíos para la sociedad actual, la relación entre el cambio climático y el sector energético actual se ve contrastada, por un lado, las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes del ser humano, principalmente generados por el sector energético convencional tendrá efectos negativos importantes a nivel mundial, y por otra parte el sector energético garantiza el cubrimiento de las necesidades básicas de bienestar humano, tales como la comunicación, el transporte, la iluminación, etc. (Labandeira et al., 2012).

Como resultado, en los últimos años, algunos países han avanzado en el desarrollo de las tecnologías del hidrógeno, el principal líder de desarrollo de proyectos de hidrógeno es Japón, Alemania, estado unidos y china son otros países destacados en el desarrollo tecnológico del hidrógeno (Rodrigo Vásquez, Felipe Salinas, 2018).

En Colombia, el ministerio de ciencia y tecnología junto con la UPME (unidad de planificación minero energética) motivan el desarrollo de estas tecnologías, mediante la convocatoria 879 de 2020 “energía sostenible y su aporte a la planeación energética “con el fin de fortificar los conocimientos tecnológicos y científicos en los procesos de transición minero-energética en Colombia (*convocatoria energía sostenible*, n.d.).

Por consiguiente, el presente trabajo de monografía tiene como objetivo estudiar de manera comparativa las tecnologías de conversión y almacenamiento de hidrógeno verde y azul en energía para los sectores de la economía nacional.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio comparativo de las tecnologías de conversión y almacenamiento de energía a partir de hidrogeno verde y azul.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las tecnologías de conversión de energía a partir de hidrógeno verde y azul para los distintos sectores de la economía nacional.
- Identificar las tecnologías de almacenamiento de energía a partir de hidrógeno verde y azul para los distintos sectores de la economía nacional.
- Comparar las tecnologías de conversión de energía a partir de hidrógeno verde y azul mediante criterios tecnológicos, económicos y ambientales.
- Comparar las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno verde y azul mediante criterios tecnológicos, económicos y ambientales.

4. METODOLOGIA

Se realiza una investigación de tipo exploratoria de nivel básico, ya que se realiza un estudio comparativo de las tecnologías de conversión y almacenamiento de energía a partir de hidrógeno verde y azul, que se desarrolla de forma teórica.

Para llevar a cabo la investigación se desarrollan 5 actividades. Inicialmente, se realiza una revisión bibliográfica en las bases de datos virtuales Science direct y google Scholar proporcionadas por la Universidad de Pamplona, con el fin de tener la información necesaria para el desarrollo del documento, en este caso se revisan únicamente documentos en inglés y español; en la segunda actividad se delimita la información encontrada teniendo en cuenta los objetivos planteados al inicio de la investigación, tomando así la información de mayor valor.

La tercera actividad consiste en la organización bibliográfica, para esto se emplea la aplicación Mendeley, que permite gestionar y organizar las citas bibliográficas al igual que los documentos de investigación de forma gratuita, para las dos últimas actividades se analiza la información reunida y se redacta el documento final, para la cual se estructura la monografía en tres secciones, el hidrogeno, las tecnologías de conversión y almacenamiento de energía a partir de hidrogeno verde y azul y finalmente la comparación entre estas tecnologías.

5. EL HIDRÓGENO

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, constituyendo más del 90% de todos los átomos, además, también es el elemento más ligero con el contenido energético más alto conocido de cualquier combustible, es sostenible y no es tóxico (Abe et al., 2019), por otra parte, en el planeta tierra es el segundo elemento más abundante en los mares y océanos, y el noveno elemento más abundante en la superficie terrestre (Chen et al., 2020).

El hidrógeno no es una fuente de energía, sino un portador o vector energético como la gasolina o electricidad, el cual se encuentra en un estado combinado ya sea para formar petróleo, agua o biomasa, debido a que no se encuentra en estado libre en el planeta tierra; es por esto que el hidrógeno se debe producir mediante diferentes tecnologías a partir de distintas fuentes (Laborde et al., 2010).

5.1 FUENTES DE HIDRÓGENO

La producción de hidrógeno es muy amplia, esta puede ser a partir de materias primas renovables, no renovables o de líneas tecnológicas, de esta forma, las emisiones de gases de efecto invernadero pueden variar (Velazquez Abad & Dodds, 2020).

5.1.1 Hidrógeno verde.

El hidrógeno se considera un combustible prometedor capaz de satisfacer los requisitos de movilidad verde y limpia. Así mismo, el hidrógeno se puede retener de forma totalmente sostenible si la energía necesaria para su producción se suministra a partir de fuentes renovables, generando el llamado "hidrógeno verde" (Minutillo et al., 2020). La electricidad renovable se puede utilizar para producir hidrógeno verde mediante la electrólisis del agua, un proceso que divide el agua acidificada o alcalinizada en hidrógeno y oxígeno ultrapuros (hasta 99,998%) (Proost, 2020).

El hidrógeno electrolítico se puede utilizar como una materia prima limpia y verde en los sectores de la industria, que de otro modo serían difíciles de descarbonizar mediante electrificación. Estos incluyen tanto la propia industria química como las nuevas aplicaciones en el sector del transporte. El hidrógeno producido a partir de electricidad renovable, a través de energía a hidrógeno puede facilitar la integración de altos niveles de electricidad renovable variable en el sistema energético, cuando la electricidad se produce a partir de fuentes de energía renovables, el hidrógeno electrolítico puede considerarse ecológico. El hidrógeno verde también se considera un portador de electricidad renovable (Proost, 2020).

Dados sus múltiples usos, el hidrógeno se vende como combustible, que puede producir electricidad a través de pilas de combustible, y como materia prima en varios procesos

industriales. Solo la materia prima podría ser, a corto plazo, el principal mercado del hidrógeno basado en fuentes de energía renovables (Nicita et al., 2020).

La electrólisis del agua basada en electricidad derivada de fuentes renovables como: la energía solar, eólica, geotérmica o hidráulica, es el proceso más respetuoso con el medio ambiente. Este atractivo método para la generación de hidrógeno en la actualidad representa solo el 4% de la producción de hidrógeno, incluso siendo una tecnología bien establecida y madura; la principal razón de esta participación limitada es el costo del hidrógeno producido, que para estas tecnologías es más elevado que el obtenido por los métodos convencionales (Velazquez Abad & Dodds, 2020).

La electrólisis del agua se genera al pasar una corriente eléctrica (renovable) a través de una sustancia conductora (electrolito) para realizar una reacción no espontánea. La reacción de interés es la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno, que requiere un aporte energético por su naturaleza endotérmica para su realización. Un electrolizador de agua consta de un electrolito, electrodos, sistema de suministro de electricidad y sistemas auxiliares para el suministro y recogida de reactivos y productos (Barco-burgos et al., 2020).

Actualmente se desarrollan tres tecnologías de electrólisis principales: Celdas de electrólisis alcalinas, celdas de electrólisis de membrana de intercambio de protones y celda de electrólisis de óxido sólido (Velazquez Abad & Dodds, 2020).

5.1.1.1 Celdas de electrólisis alcalinas

La electrólisis alcalina es una tecnología confiable, eficiente y madura, sin embargo, es necesario una reducción de sus costos y un incremento de su eficiencia para que sea atractiva comercialmente. Una celda de electrólisis alcalina está constituida por un electrolito, que comúnmente es hidróxido de potasio a altas concentraciones, el cátodo, el ánodo y un diafragma (barrera sólida) que separa los gases producidos, que además, debe ser permeable a los iones de hidróxido y el agua (Allebrod et al., 2013).

5.1.1.2 Celdas de electrólisis de membrana de intercambio de protones

En los últimos años, el electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM) ha atraído mucha atención debido a su simplicidad, alta eficiencia energética, diseño de sistema compacto y capacidad de producción específica. La celda de electrólisis de membrana de intercambio de protones es esencialmente un conductor electrolítico entre un ánodo y un cátodo, las moléculas de agua y las partículas iónicas se transfieren a través de la membrana desde el ánodo hasta el cátodo, donde se descompone en oxígeno, protones y electrones. En el proceso de reacción se suministra energía eléctrica al sistema y se convierte en energía química, posteriormente los electrones salen de la celda a través de un circuito y, finalmente, los

electrones y protones se recombinan en el cátodo para producir el hidrógeno (Hernandez et al., 2020).

5.1.1.3 Celdas de electrolisis de óxido sólido

La electrólisis de óxido sólido SOE convierte la energía eléctrica en energía química, además produce hidrógeno ultrapuro. Esta tecnología funciona a altas temperaturas y presiones y utiliza agua en forma de vapor (Shiva Kumar & Himabindu, 2019).

5.1.1.4 Celdas de electrólisis microbiana

Es una novedosa tecnología biológica de producción de hidrógeno a partir de biomasa, que proporciona una producción completamente limpia y sostenible a partir de aguas residuales y biomasa renovable, esta tecnología utiliza microbios como biocatalizadores que producen otros productos de valor agregado como el metano, agua, etanol; además de esto, no se necesita una entrada alta de energía para llevar a cabo el proceso. Sin embargo, esta tecnología se encuentra aún en un período inicial, y plantea varios desafíos como la tasa de producción de hidrógeno, alta resistencia interna, materiales costosos y arquitectura complicada (Kadier et al., 2016).

Existen otras tecnologías para la producción de hidrógeno de fuentes renovables como lo son:

5.1.1.5 Celdas fotoelectroquímicas

La tecnología de la fotocatalisis tiene un potencial prometedor para el uso de la energía solar, siendo esta un tipo de energía limpia, gratuita e inagotable; las celdas fotoelectroquímicas proporcionan una nueva tecnología para la producción de hidrógeno a partir de la degradación de los desechos orgánicos, mediante la reducción fotoelectroquímica del hidrógeno en el cátodo y la fuerte oxidación de compuestos orgánicos en el ánodo, sin embargo, estos sistemas necesitan el suministro de energía eléctrica externa, haciendo que el sistema sea ineficaz (Zhang et al., 2021).

5.1.1.6 Fermentación oscura

Es una tecnología fácil de implementar y operar, en este proceso, una amplia variedad de bacterias anaerobias o facultativas descomponen los desechos orgánicos con altos niveles de carbohidratos para producir hidrógeno, dióxido de carbono y ácidos grasos volátiles. Estos procesos pueden avanzar de forma espontánea hacia la formación de productos sin necesidad de un suministro de energía externo, debido al cambio de energía libre negativo. El rendimiento de estos procesos son relativamente bajos, ya que la biomasa no se utiliza por completo y solo una fracción del sustrato orgánico se convierte en hidrógeno (Rezaeitavabe et al., 2020).

5.1.1.7 Fermentación fotográfica

La foto-fermentación emplea la luz como fuente de energía para la fotosíntesis. En comparación con otros procesos, la foto-fermentación tiene la ventaja de que la luz puede reemplazar a los azúcares como fuente de energía, reduciendo de esta forma la competencia con los cultivos alimentarios por el uso de la tierra. Comúnmente se aplican las bacterias fotosintéticas como *Rhodobacter Sphaeroides* y *Rhodospirillum* y utilizan ácidos orgánicos de moléculas pequeñas como fuentes de carbono (Baeyens et al., 2020).

5.1.1.8 Pirolisis

La pirolisis es un proceso termoquímico que puede convertir materiales carbonosos en productos de mayor valor agregado en ausencia de oxígeno. El producto gaseoso que contiene hidrógeno se puede transformar mediante reformado de gas de agua para producir más hidrógeno (Lui et al., 2020).

5.1.1.9 Biofotólisis

La biofotólisis se utiliza durante el proceso de fotosíntesis utilizando la capacidad de las plantas (principalmente algas) para disociar el agua y producir hidrógeno. También es un proceso biológico en el que se dividen las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno en presencia de luz solar utilizando una membrana fotosintética aislada y otros catalizadores. Este proceso consiste principalmente en la descomposición del agua mediante fotones con catalizadores biológicos, lo que se conoce como fotólisis del agua; este proceso puede ser directo o indirecto (Sanchez *et al.*, 2020).

5.1.1.10 Gasificación

El proceso de gasificación es la conversión de material sólido entre temperaturas de 500°C y 1200°C en un ambiente deficiente en oxígeno a presión atmosférica. La oxidación autotérmica utiliza la oxidación parcial de los desechos dentro del reactor, en presencia de un oxidante en una cantidad menor que la requerida para la combustión estequiométrica, para proporcionar el calor requerido para la reacción, la condición de deficiencia de oxígeno reduce las pérdidas de calor y aumenta la eficiencia de recuperación de energía (Lui *et al.*, 2020).

5.1.2 Hidrógeno azul

El hidrógeno se puede producir a partir de una amplia variedad de procesos de biorrefinamiento convencionales que incluye métodos comunes a escala comercial, como la gasificación de carbón y el reformado de gas natural. Actualmente, el 96% del hidrógeno comercial mundial

se produce mediante estos métodos debido a sus bajos costos totales de producción (Sanchez et al., 2020), donde el reformado de metano con vapor es la ruta más común para producirlo a partir de gas natural, ninguno de los métodos convencionales utilizados para producir hidrógeno está libre de gases de efecto invernadero (Nicita *et al.*, 2020).

5.1.2.1 Reformado con vapor de metano

El reformado con vapor de metano SMR representa el 48% de la producción de hidrógeno mundial, siendo el proceso dominante en esta área (Noh *et al.*, 2019). El gas natural se mezcla con vapor a alta temperatura sobre una superficie de catalizador, donde se produce una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono, seguidamente, a mezcla se somete a una reacción de desplazamiento agua-gas para obtener finalmente hidrógeno y dióxido de carbono. Estos procesos tienen una eficiencia del 65-75% e incluso pueden alcanzar el 80% para los grandes reformadores (Olabi et al., 2020).

5.1.2.2 Oxidación parcial

La oxidación parcial POX ocurre cuando el aire y el combustible reaccionan parcialmente o se queman en un reactor para crear gas de síntesis rico en hidrógeno. La reacción de oxidación total de los hidrocarburos a dióxido de carbono y agua se inhibe con el aire alimentado al reactor, este es controlado para que la cantidad de oxígeno este muy por debajo del requisito estequiométrico para la oxidación total, dando como resultado una mezcla de monóxido de carbono, hidrogeno y otros oligoelementos. El hidrogeno y dióxido de carbono se forman en un reactor de desplazamiento de aguas siguiente a partir de agua y monóxido de carbono del gas de síntesis (Garcia *et al.*, 2020).

5.1.2.3 Reformado autotérmico de metano

El reformado autotérmico de metano ATR es un proceso económico que involucra una reacción altamente exotérmica (POX) y una reacción altamente endotérmica (SMR). Este proceso puede disminuir el costo de vapor adicional en el reformado con vapor, evitar los peligros de explosión en la oxidación parcial del metano, controlar la composición del producto y acortar el tiempo de arranque (Rezaei et al., 2011).

6. TECNOLOGÍAS DE CONVERSIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA A PARTIR DE HIDRÓGENO

A medida que la demanda energética está incrementando gradualmente, la energía del hidrógeno se está convirtiendo en la energía más importante en la actualidad, pues es una solución importante para hacer frente al aumento de la temperatura global. El factor clave de

la producción de hidrógeno es la economía del hidrógeno. Las tecnologías de producción de hidrógeno están disponibles comercialmente, mientras que algunas de estas tecnologías aún están en desarrollo, de modo que aumenta el interés mundial por minimizar los efectos de los gases de efecto invernadero, así como de otros gases contaminantes (Sazali, 2020).

El potencial del hidrógeno como combustible se basa en sus propiedades y el interés de la industria y los gobiernos por un combustible más limpio que reemplace los combustibles fósiles (Lui et al., 2020).

Los vehículos operados con hidrógeno tienen la capacidad de minimizar en gran medida la dependencia de los combustibles fósiles y de reducir las emisiones del tubo de escape. Esto indica la capacidad del hidrógeno para almacenar y entregar energía a partir de recursos disponibles en el país, que son abundantes, mientras que al mismo tiempo reduce la huella de carbono. Se considera que la aplicación del hidrógeno en el sector transporte como fuente de combustible para automóviles es fluida, ya que ofrece una eficiencia tres veces mayor en términos de energía sin emisiones contaminantes. Para el sector industrial, el hidrógeno también es muy buscado para su utilización en refinerías como sustancia en la síntesis de gas en la fabricación de amoníaco y metanol. Tanto las empresas privadas como el gobierno tienen que cooperar para acelerar las mejoras de la economía de producción de hidrógeno y la eficiencia (Sazali, 2020).

6.1 TECNOLOGÍAS DE CONVERSIÓN

El futuro de la energía mundial del hidrógeno depende en una gran medida del desarrollo efectivo de fuentes confiables y respetuosas con el medio ambiente capaces de producir grandes cantidades de energía eléctrica y térmica (Zhiznin et al., 2020).

Los sistemas de conversión de energía de hidrógeno siguen la producción, entrega y almacenamiento en el sistema de energía de hidrógeno general, posteriormente se utilizan tecnologías para convertir la energía del hidrógeno en energía química, eléctrica, mecánica o térmica. Los sistemas de conversión de energía de hidrógeno se pueden clasificar en combustión, otras formas de conversión electroquímica, conversión química y conversión física, como se puede observar en la figura 1, que muestra la clasificación de las principales tecnologías de conversión y sus aplicaciones resumidas. La principal ventaja de los sistemas de conversión de energía a partir de hidrógeno es la diversidad y cantidad de alternativas que tienen los usuarios finales para aprovechar el hidrógeno de diferentes formas (Acar & Dincer, 2018). En la figura 2 se observan las tecnologías de conversión de energía a partir de hidrógeno.

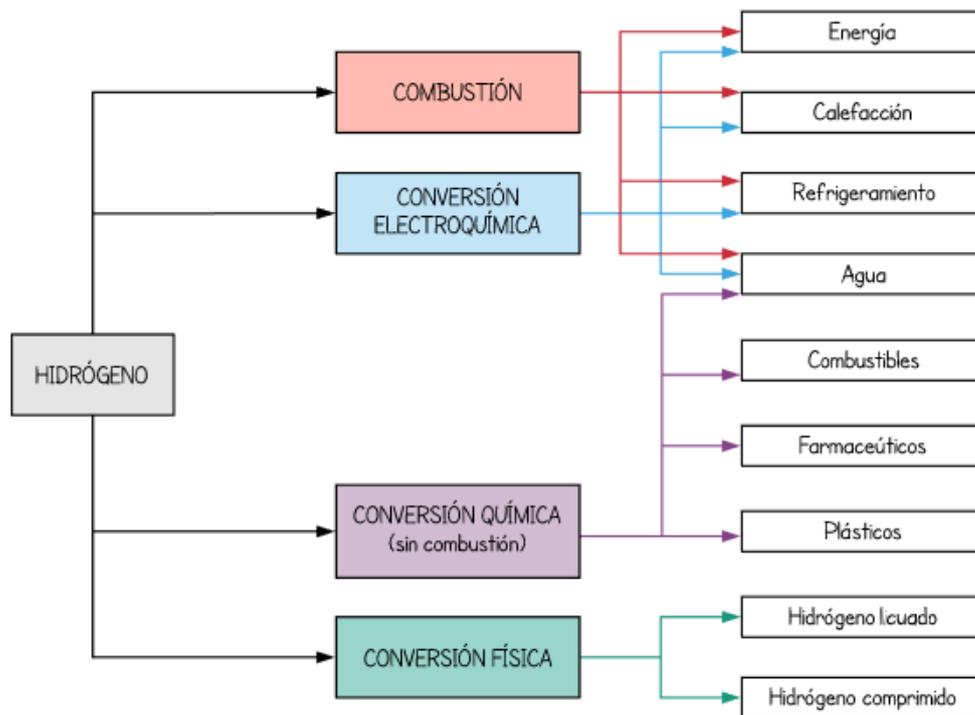


Figura 1. Tecnologías de conversión de energía a partir de hidrógeno y sus principales aplicaciones.

Fuente: (Acar & Dincer, 2018)

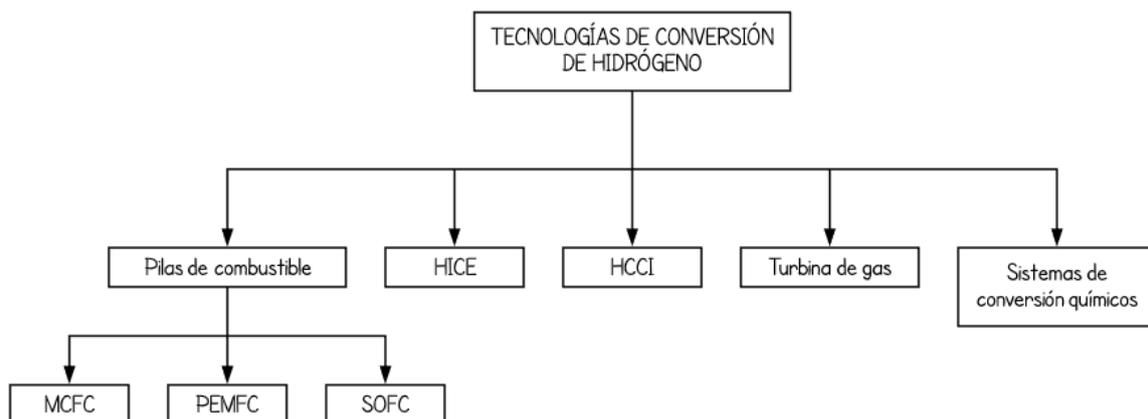


Figura 2. Clasificación de las tecnologías de conversión de energía a partir de hidrógeno.

Fuente: Elaboración propia

6.1.1 Pila de combustible de hidrógeno

La pila de combustible de hidrógeno, fue inventada en 1839, y permite la generación de energía eléctrica con alta eficiencia a través de un proceso electroquímico sin combustión y, lo que es más importante, sin la emisión de CO₂ en su punto de uso (Thomas et al., 2020).

Las pilas de combustible son dispositivos que transforman directamente la energía química en energía eléctrica, estos dispositivos compuestos por un ánodo, un cátodo y un electrolito adecuado que permite la transferencia de iones entre ellos, siendo en el ánodo donde ocurre la oxidación del combustible. Las pilas de combustible son dispositivos muy eficientes, con eficiencias que pueden variar entre 60-70%. Existen muchos tipos de pilas de combustibles, entre las cuales se encuentran las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones -PEMFC, pilas de combustible de óxido sólido-SOFC, pilas de combustible de carbonato fundido-MCFC, entre otras; siendo las PEMFC las más comercializadas (Olabi et al., 2020).

6.1.1.1 Pila de combustible de membrana de intercambio de protones

La PEMFC es un dispositivo que convierte la energía química en energía eléctrica mediante reacciones redox, entre sus principales ventajas se encuentra una alta eficiencia, alta densidad de potencia, y que es una tecnología amigable con el medio ambiente. Sin embargo, debido a la temperatura de funcionamiento bajo cero, el encendido y apagado frecuente de los dispositivos, las variaciones de demanda energética aceleran la degradación del dispositivo y su rendimiento, esto ocasiona un envejecimiento irreversible del material del PEMFC y así una durabilidad limitada, haciendo limitada su comercialización (He et al., 2020).

Los complejo sistemas de PEMFC no lineales consisten en un tanque de hidrógeno, una bomba de circulación de hidrógeno, una válvula de control de flujo, un colector de suministro, un canal de ánodo, un colector de retorno y una válvula de purga como se muestra en la figura 2. En estos sistemas no hay flujo de agua, por lo tanto, es fundamental mantener el flujo de hidrógeno en el sistema. Si bien el hidrógeno no emite ningún subproducto peligroso durante la combustión, su producción y almacenamiento es altamente reactivo frente a la presencia de oxígeno, que puede ocasionar una explosión (Sazali, 2020) .

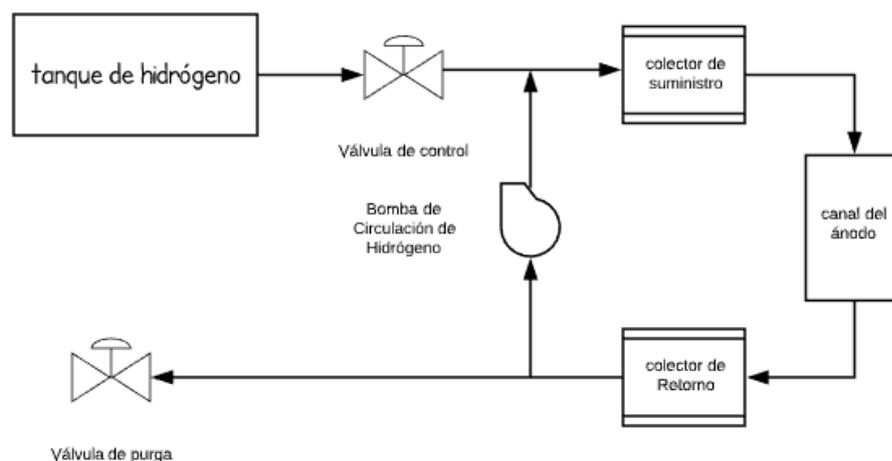


Figura 3. Sistema de una pila de combustible de membrana de electrolito de polímero PEMFC no lineal.

Fuente: (Sazali, 2020).

6.1.1.2 Pilas de combustible de óxido sólido

Las SOFC son una tecnología alternativa para la generación de energía modular de alta eficiencia, combustible flexible y bajas emisiones (Eveloy et al., 2016). Estas tecnologías generalmente utilizan combustibles como el monóxido de carbono, el hidrogeno o gas de síntesis para generar electricidad mediante reacciones electroquímicas, sin embargo, estas tecnologías son propensas a degradarse, por lo que tienen un tiempo de vida útil de aproximadamente un año y medio cuando se mantiene una salida de energía constante (Lai et al., 2020). Por otro lado, los SOFC son dispositivos compactos, que funcionan a altas temperaturas, gracias a la flexibilidad de su arquitectura se pueden tener algunas ventajas operacionales como la alta eficiencia en operaciones a altas temperaturas, además, estas tecnologías pueden suministrar energía térmica para muchos procesos industriales que pueden integrarse a recursos energéticos renovables como la energía solar, geotérmica y biomasa (Inac et al., 2020). La pila de combustible de óxido de sólido tiene una estructura tipo sándwich como se puede observar en la figura 3. La parte electromagnéticamente activa del SOFC está conformada por el electrodo positivo, electrodo negativo y electrolito. Las geometrías planas y tubulares de SOFC son las más simples investigadas por la industria y los centros de educación (Zeng et al., 2020).

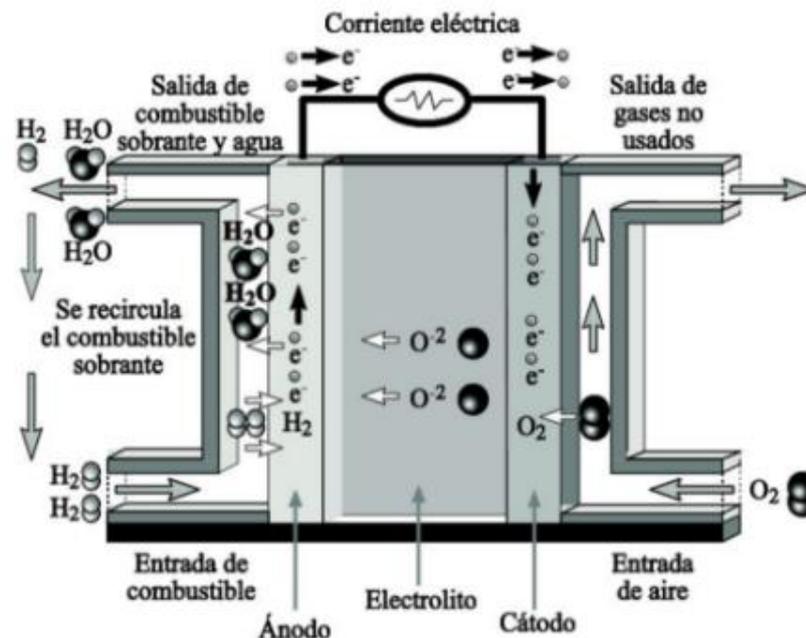


Figura 4. Diagrama de una pila de combustible de óxido sólido SOFC.

Fuente: (Rodríguez, 2019).

Las SOFC operan a temperaturas alrededor de los 1000°C por lo que no es necesario utilizar metales nobles como catalizadores, reduciendo así los costos, al mismo tiempo, las elevadas

temperaturas hacen que tengan un arranque lento además de necesitar abundante protección para evitar el escape de calor (Rodríguez, 2019).

6.1.1.3 Pilas de combustible de carbonato fundido

Las MCFC son más maduras que las SOFC, las tecnologías MCFC han demostrado aplicaciones prácticas en las centrales eléctricas a gran escala y sistemas de producción de buques (Ahn et al., 2018). Las MCFC son celdas de combustible de altas temperaturas que operan dentro de un rango de 853-973 K, debido a esto, la corrosión de los componentes de la celda y el consumo de electrolitos son los principales contratiempos. El rendimiento de un MCFC se ve afectado principalmente por el tipo y la cantidad de electrolito utilizados, composición del gas, componentes de la celda, densidad de corriente y temperatura (Koomson & Lee, 2020).

6.1.2 Motor de combustión interna de hidrógeno

El motor de combustión interna de hidrógeno HICE se considera un sistema de generación de energía primaria, ya que ofrece una solución provisional viable que utiliza la tecnología y la inversión de capital existentes de manera más eficaz que un motor de pila de combustible. También se considera una alternativa limpia y competitiva en cuanto a costos al motor de combustión interna de gasolina convencional. Además, el uso de hidrógeno como combustible ofrece el potencial de contribuir a la reducción de los gases de efecto invernadero y la contaminación atmosférica local. El mayor problema de la combustión HICE de encendido por chispa es la ocurrencia de una combustión contraria y / o pre-ignición cuando la relación combustible pobre / aire se acerca al valor estequiométrico, lo que limita la salida de par del motor (Yamada & Anuar, 2010).

El motor de combustión interna de hidrógeno es una tecnología confiable y de bajo costo. El motor de combustión interna-ICE es una máquina compleja, debido a que los gases de escape y el sistema de enfriamiento absorben aproximadamente 2/3 de la energía total del combustible, solo una parte de la energía total del combustible se utiliza de forma efectiva en forma de trabajo efectivo en la salida del ICE (Wang et al., 2018).

6.1.3 Encendido por compresión de carga homogénea

El encendido por compresión de carga homogénea -HCCI es un tipo especial de combustión de hidrógeno, por lo cual se considera un tipo de tecnología diferente, que pueden alcanzar eficiencias de hasta 43% al utilizar una variedad de combustibles, como el hidrógeno. Además, emiten cantidades mínimas o casi cero de NO_x, material particulado o contaminantes. Estos sistemas son muy prometedores para varias industrias, incluyendo el transporte y la generación

de energía, por lo cual, algunas industrias han demostrado un gran interés en el diseño, desarrollo y prueba de sistemas HCCI (Acar & Dincer, 2018).

La principal ventaja de los sistemas HCCI es la capacidad de integrar los motores de chispa de ignición-SI y los motores de compresión-CI en uno solo, combinando así la tecnología de bajas emisiones y limpia del motor de chispa SI con la tecnología de alta eficiencia del motor CI, obteniendo una tecnología limpia y eficiente, y por lo tanto una tecnología más sostenible. Para los HCCI la mezcla del combustible y el aire es casi que completamente homogénea, por lo que la variación de la tasa de combustión local y global dentro del reactor es casi cero, como resultado de eso, la mezcla entre aire y combustible debe ser muy pobre para evitar una tasa de combustión extremadamente alta. Cuando la mezcla es muy rica en combustible, se quema muy rápido causando un incremento dramático repentino de la presión en la cámara de combustión, ocasionando niveles de ruido y estrés en el sistema crítico; por otro lado, cuando la mezcla de aire y combustible no es suficiente, el proceso de combustión resulta muy lento, terminando usualmente como una combustión incompleta (Acar & Dincer, 2018).

6.1.4 Turbinas de gas

Las turbinas de gas-GT son una alternativa viable a las celdas de combustible con respecto a la fiabilidad, vida útil y costo, además, permiten utilizar el hidrógeno con impurezas como el monóxido de carbono, por lo cual es posible incrementar el valor de muchos residuos sólidos o combustibles a base de carbono que se pueden utilizar para producir gas de síntesis rico en hidrógeno. Aunque la turbina de gas de síntesis con bajo contenido de hidrógeno es una tecnología madura, para el caso del hidrógeno más puro es aún desafiante. La cámara de combustión es el único componente de una turbina de gas convencional que requiere un rediseño para el funcionamiento con hidrógeno al 100%. Actualmente el uso de hidrógeno como combustible está limitado a turbinas de gas equipadas por difusión de llama combustores (Cappelletti et al., 2017).

Las GT son una tecnología madura y simple, que permite operar con combustible con presencia de contaminantes como por ejemplo el monóxido de carbono, sin embargo, cuando se operan con hidrógeno puro aún presentan dificultades en su operación como lo menciona (Wang et al., 2018).

6.1.5 Sistemas de conversión químicos

Las principales aplicaciones industriales de los sistemas de conversión químicos son en la fabricación de alimentos, hospitales o semiconductores, con pequeños clientes que pagan precios elevados (Acar & Dincer, 2018).

Las refinerías producen hidrógeno como subproducto del reformado catalítico y consumen hidrógeno para reducir el contenido de azufre de las fracciones del petróleo (hidrotratamiento)

y mejorar el crudo pesado de baja calidad (hidrocraqueo). Cada refinería se caracteriza por su balance de hidrógeno, compuesto por producción, consumo y pérdidas. Para aumentar la relación hidrógeno-carbono de las materias primas, las refinerías se basan en tecnologías de conversión ya sea para extraer y eliminar carbono (craqueo catalítico fluido), dando lugar a emisiones, o para añadir hidrógeno (hidrocraqueo), aumentando el rendimiento (Acar & Dincer, 2018).

Por consiguiente, clasificar el crudo pesado con hidrógeno electrolítico puede ayudar a crear un combustible de transporte más limpio y evitar emisiones. En la práctica, es poco probable que el hidrógeno electrolítico compita a corto plazo con el reformado de metano a vapor debido a sus costos de producción. Sin embargo, puede proporcionar a las refinerías en riesgo de escasez de suministro de hidrógeno con flexibilidad operativa adicional. El hidrógeno comercial obtenido por encima de la cerca tiende a ser más caro que el hidrógeno de instalaciones especializadas (Acar & Dincer, 2018).

6.2 TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO

El almacenamiento de hidrógeno parece ser una de las soluciones más prometedoras para almacenar el excedente de energía de las fuentes de energía renovables-FER, debido a su flexibilidad y variedad de usos. Por lo tanto, el hidrógeno se considera actualmente una tecnología clave para un futuro almacenamiento sostenible a gran escala y a largo plazo de energía renovable verde (Velazquez Abad & Dodds, 2020).

El uso de hidrógeno como medio de almacenamiento de energía es muy prometedor, sin embargo, se ve obstaculizado por la falta de convertidores de hidrógeno a electricidad disponibles comercialmente (Vajihinejad, 2017). A pesar de las grandes ventajas que ofrece el hidrógeno como combustible, actualmente no es utilizado ampliamente como combustible, principalmente porque su almacenamiento sigue siendo un desafío para la industria. Los tres modos de almacenamiento comúnmente utilizados para el hidrógeno son en estado líquido, gaseoso a alta presión y sólido, siendo este último el de mayor eficiencia y seguridad (Pandey et al., 2020). En la figura 4 se puede observar la clasificación de las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno en tres categorías, almacenamiento líquido, almacenamiento gaseoso y almacenamiento en materiales.

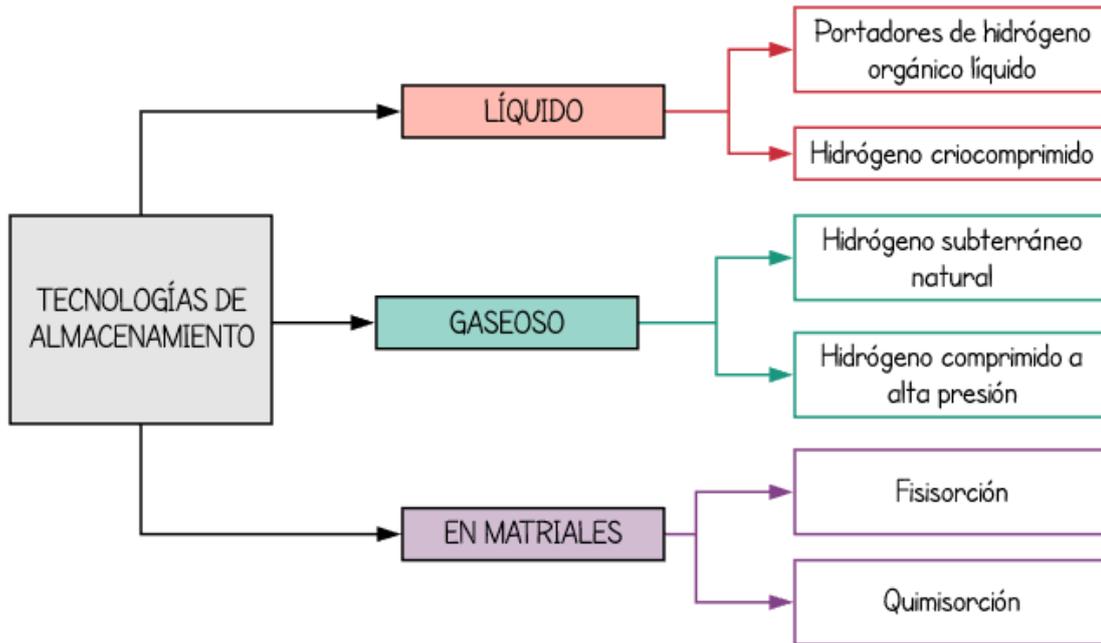


Figura 5. Clasificación de las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.1 Almacenamiento en estado gaseoso

6.2.1.1 Hidrógeno comprimido a alta presión

Es la tecnología más madura para el almacenamiento de hidrógeno, en la cual el hidrógeno es almacenado en cilindros de alta presión, sin embargo, las medidas de seguridad y reducción de costos de estas tecnologías siguen siendo un desafío tecnológico para la economía del hidrógeno que se aproxima (Chen et al., 2020).

6.2.1.2 Almacenamiento subterráneo natural

Las formaciones subterráneas como las cavernas de sal, acuíferos, campos de gas agotados y otras, son opciones de almacenamiento de hidrógeno estacionario viables. El conocimiento adquirido por décadas para el almacenamiento de gas natural en cavidades subterráneas se puede aplicar para el hidrógeno debido a la similitud en el diseño, construcción y operación de la caverna (Gulcin et al., 2020).

El almacenamiento de hidrógeno en depósitos de petróleo y gas agotados a pesar de reducir los esfuerzos de explotación geológica, requieren de un gas colchón para prevenir la ruptura de la roca del yacimiento, además de necesitarse unidades de control y mejora de gas para la purificación debido a los residuos contaminantes que contengan los depósitos. Es por esto que actualmente se consideran las cavernas de sal como la opción de almacenamiento subterránea

más prometedora, además, tienen un bajo requerimiento de gas colchón, gran capacidad de sellado de la sal y la naturaleza inerte de la sal, evitando la contaminación del hidrógeno almacenado (Gulcin et al., 2020).

6.2.2 Almacenamiento hidrógeno líquido

6.2.2.1 Almacenamiento del hidrógeno criocomprimido

El almacenamiento de hidrógeno criocomprimido-CCH corresponde al almacenamiento de hidrógeno a temperaturas criogénicas en un recipiente que se puede presurizar, en comparación con los recipientes criogénicos actuales que almacenan el hidrógeno líquido a presiones casi ambientales. Los tanques de almacenamiento criocomprimido pueden almacenar hidrógeno líquido, criocomprimido supercrítico o hidrógeno en una región de dos fases (R.K et al., 2016).

Así pues, el principio más básico para el almacenamiento de hidrógeno líquido es su capacidad de operar a temperaturas extremadamente bajas de 253 °C. Normalmente está diseñado para manejar líquido criogénico y no resistir la presión interna (Singh et al., 2020). Debido a su bajo punto de ebullición, el hidrógeno líquido-LH experimenta temperaturas más bajas para la tecnología de enfriamiento y absorbe aproximadamente el 30% de su contenido total de energía. Por tanto, para solucionar los problemas de fugaz de calor, se puede utilizar un recipiente de doble pared con sistemas de aislamiento. El CCH tiene aplicaciones potenciales en vehículos de pila de combustible debido a su gran densidad de almacenamiento y resistencia térmica (Chen et al., 2020).

6.2.2.2 Portadores de hidrógeno orgánico líquido

Las tecnologías con portadores de hidrógeno orgánico líquido-LOHC utiliza compuestos orgánicos insaturados como heterociclos y cicloalcanos para almacenar el hidrógeno a temperatura ambiente (Chen et al., 2020).

El almacenamiento tradicional de hidrógeno en estado líquido plantea varios desafíos, como la seguridad y el costo del portador de energía a bordo. Por lo tanto, no lograron enfrentar los desafíos energéticos futuros. Los portadores de hidrógeno orgánico líquido-LOHC proporcionan una ruta flexible para el almacenamiento y transporte de energía de hidrógeno.

El hidrógeno se puede almacenar en condiciones ambientales a través de LOHC. Además, son operaciones económicas, seguras y fáciles de administrar. Así mismo, los LOHC permiten el almacenamiento de hidrógeno durante un período de tiempo prolongado y eliminan el proceso de evaporación y otras pérdidas operativas. El concepto de almacenamiento en LOHC sigue a la hidrogenación y deshidrogenación reversibles de dobles enlaces de carbono. En la hidrogenación se produce una saturación de dobles enlaces con hidrógeno de forma exotérmica.

Generalmente tiene lugar en condiciones de temperatura y presión elevadas. Por el contrario, el hidrógeno se puede liberar de nuevo en la presión (Singh et al., 2020).

6.2.3 Almacenamiento de hidrógeno sólido

6.2.3.1 Fisisorción

La fisisorción o adsorción física es un proceso en el que los átomos o moléculas se mueven desde una fase de masa a una superficie sólida o líquida. Se producen interacciones atractivas entre la superficie y las moléculas que se adsorben. Se alcanza un punto de equilibrio cuando las fuerzas atractivas y repulsivas se compensan entre sí.

La fisisorción se debe principalmente a las fuerzas de interacción de Van der Waals. Las moléculas adsorbidas permanecen intactas y el proceso es completamente reversible. El grado de adsorción depende de las propiedades intrínsecas del material, como el área de superficie específica del adsorbente y la afinidad del par adsorbente / adsorbato. También depende de las condiciones operativas como la temperatura, la presión y la concentración en la fase de volumen. Las presiones altas, las concentraciones altas, las áreas superficiales altas, las afinidades altas y las temperaturas bajas generalmente fomentan el proceso de adsorción (Kuznik et al., 2018).

Para aplicaciones tecnológicas, la cinética rápida y la reversibilidad total permiten tiempos de repostaje cortos y un ciclo de vida alto, por lo que la exploración de la fisisorción en materiales es un área importante. El almacenamiento de hidrógeno por fisisorción en materiales porosos, utilizando sistemas clásicos como carbones activados y zeolitas, tiene una larga historia. Las capacidades máximas de almacenamiento están estrechamente relacionadas con el área de superficie accesible a H_2 . La captación gravimétrica de H_2 a presiones superiores a 20 bar y a 77 K, para todos los materiales porosos, es proporcional al área de superficie, lo que indica que el área de superficie específica es crucial para lograr altas capacidades de almacenamiento gravimétrico. El problema es que los materiales porosos de gran área superficial tienden a tener densidades de material bajas y, por lo tanto, solo capacidades de almacenamiento de hidrógeno volumétricas modestas. Los materiales porosos también se pueden utilizar como sustratos para nanopartículas metálicas.

6.2.3.2 Quimisorción

La quimisorción de forma general, involucra la creación y rompimiento de enlaces, por lo cual no se conserva la configuración electrónica del estado gaseoso inicial de la molécula disociada y posteriormente quimisorbida. Así pues, las moléculas de hidrógeno son disociadas para ser adsorbidas sobre un material y mantenerse unidas mediante enlaces químicos fuertes, el proceso culmina cuando se forma una monocapa sobre la superficie. A pesar de solo tener una

capa quimisorbida sobre la superficie, es posible producir adsorción física de nuevas capas sobre la primera capa quimisorbida (TEC, 2013).

7. COMPARACION DE LAS TECNOLOGIAS DE CONVERSION Y ALMACENAMIENTO DE HIDROGENO VERDE Y AZUL MEDIANTE ASPECTOS DE SOSTENIBILIDAD

7.1 ASPECTOS TECNOLÓGICOS.

7.1.1 Tecnologías de conversión.

En la tabla 1 se muestran las eficiencias eléctricas de las tecnologías de conversión de hidrógeno, se puede observar que la tecnología GT es la de mayor eficiencia eléctrica y la tecnología HICE la de menor eficiencia eléctrica, así mismo, se observa que las tecnologías de conversión se encuentran en un rango de 40-70 % de eficiencia eléctrica, de las que las tecnologías HICE, HCCI y celdas de combustible coinciden con un 50% de eficiencia eléctrica.

Tabla 1. Eficiencia eléctrica de las tecnologías de conversión de hidrógeno.

Tecnología	Eficiencia eléctrica (%)
Celda de combustible	50-55
Combustión interna	40-50
Encendido de compresión de carga interna	50-60
Turbinas de gas	60-70

Fuente: (Usman et al., 2020).

Los autores (Olabi et al., 2020) reportan eficiencias del 60-70% para el caso de las pilas de combustible, esta tecnología al igual que las turbinas de gas son maduras, sin embargo, se encuentran muchos tipos de celdas disponibles en el mercado, por lo cual es importante resaltar sus características principales. En la tabla 2 se observan las principales características de los tipos de celdas de combustible como es la temperatura de operación, producción del sistema, eficiencia y aplicaciones de cada una de estas tecnologías.

Tabla 2. Características de los tipos de celdas de combustible.

Tipo de celda de combustible	Temperatura de operación (°C)	Producción del sistema	Eficiencia (%)	Aplicaciones
Celda de combustible alcalina	90-100	10-100 KW	60-70 (eléctrica)	Militar Espacial
Celda de combustible de ácido fosfórico	150-200	50 KW- 1MW	80-85 (entre calor y energía) 36-42 (eléctrica)	Generación distribuida

Membrana de intercambio de protones	50-100	< 250 KW	50-60 (eléctrica)	Energía de respaldo Energía portátil Pequeña generación distribuida Transporte
Celda de combustible de carbonato fluido	600-700	< 1MW	85 (entre calor y energía) 60 (eléctrica)	Utilidad eléctrica Gran generación distribuida
Celda de combustible de óxido sólido	650-1000	5 KW- 3MW	85 (entre calor y energía) 60 (eléctrica)	Fuente auxiliar Utilidad eléctrica Gran generación distribuida

Fuente: (Usman et al., 2020).

De la tabla 2 se puede decir que las eficiencias pueden variar dependiendo del tipo de celda que se utilice, estas tecnologías permiten trabajar con un gran rango de temperatura, siendo la menor temperatura de operación 50°C y la mayor 1000°C, se producen desde 10 KW para la celda de combustible alcalina, hasta 3 MW para las celdas de combustible de óxido sólido, además, esta tecnología presenta eficiencias de hasta 85% entre calor y energía y tienen un amplio campo de aplicaciones.

7.1.2 Tecnologías de almacenamiento.

En la tabla 3 se muestran las capacidades de almacenamiento de las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno.

Tabla 3. Capacidades de almacenamiento de las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno.

Tecnología de almacenamiento	Capacidad de almacenamiento
Hidrógeno líquido	70 kg H ₂ /m ³
Hidrógeno gaseoso	8-40 kg H ₂ /m ³
Portadores de hidrógeno orgánico líquido (metanol)	98 kg H ₂ /m ³
Hidrógeno sólido (adsorción)	48 kg H ₂ /m ³
Portadores de hidrógeno	
AlH₃	85 kg H ₂ /m ³
MgH₂	85 kg H ₂ /m ³
NaAlH₄	55 kg H ₂ /m ³
NaBH₄	43 kg H ₂ /m ³

Fuente: (Olabi et al., 2020).

De la tabla 3 se puede decir que las tecnologías con mayor capacidad de almacenamiento son los portadores de hidrógeno orgánico líquido, con una capacidad de almacenamiento de 98 kg H₂/m³, por otro lado, la tecnología con menor capacidad de almacenamiento es el hidrógeno gaseoso, con una capacidad de almacenamiento de 8 a 40 kg H₂/m³, esto es causado por la baja densidad del hidrógeno y su alta volatilidad, por lo cual una pequeña cantidad de hidrógeno gaseoso va a ocupar un gran volumen en el recipiente de almacenamiento.

7.2 ASPECTOS ECONÓMICOS.

7.2.1 Tecnologías de conversión.

En la tabla 4 se muestran los costos de la energía de entrada, electricidad y el costo total de la inversión para las tecnologías de conversión.

Tabla 4. Costos de las tecnologías de conversión.

Tecnología	Energía de entrada (KW)	Costo de la electricidad (\$/KWh)	Costo total de la inversión (\$/h)
APC-PEM	1076	0,034	7,33
ORC-AE	3709	0,035	20,01
ST-MgCl	2482	0,019	48,75
ST-CuCl	9974	0,015	148,1
GT-HyS	13611	0,043	140,1

. Fuente: (Ates & Ozcan, 2020).

Las tecnologías de conversión del hidrógeno requieren un alto alimento energético como se observa en la tabla 4, además, se observa que la tecnología de celdas PEM es la de menor costo de inversión, y las tecnologías de mayor costo de inversión son las tecnologías ST-CuCl, por otro lado las tecnologías ST-MgCl requieren un menor suministro de energía de entrada en comparación y la tecnología GT-HyS un mayor suministro de energía, de esta forma, las ST-MgCl tienen un menor costo de electricidad y las GT-HyS un mayor costo, por lo que se puede decir que el costo de la electricidad está relacionado directamente con la energía a la entrada para cada tecnología.

7.2.2 Tecnologías de almacenamiento.

En la tabla 5 se muestran los costos para las tecnologías de almacenamiento, uso principal, volumen y ciclado, los costos de almacenamiento actuales y en el futuro, además de la disponibilidad geográfica de estas tecnologías.

Tabla 5. Costo de las tecnologías de almacenamiento.

Estado gaseoso				Estado líquido			Estado sólido	
Cavernas de sal	Campos de gas agotado	Cavernas rocosas	Contenedores presurizados	Hidrogeno líquido	Amonio	Portador de hidrógeno orgánico líquido	de	Metales híbridos

Uso principal (volumen ciclado)	Volumen y grande, meses-semanas	Volumen grande, temporal	Volumen mediano, meses-semanas	Volumen pequeño, diario	Pequeño-mediano volumen, días-semanas	Volumen grande, meses-semanas	Volumen grande, semanas	Volumen meses-pequeño, días-semanas
Costo de almacenamiento nivelado de referencia (\$/Kg)	\$0,23	\$1,90	\$0,71	\$0,19	\$4,57	\$2,83	\$4,50	No evaluado
Costo de almacenamiento nivelado posible futuro	\$0,11	\$1,07	\$0,23	\$0,17	\$0,95	\$0,87	\$1,86	No evaluado
Disponibilidad geográfica	Limitado	Limitado	Limitado	No limitado	No limitado	No limitado	No limitado	No limitado

Fuente: (Bloomberg NEF, 2020)

Las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno sólido mediante metales híbridos tienen un volumen pequeño y un ciclado de hasta semanas, estas tecnologías no cuentan con un costo fijo de almacenamiento. La tecnología de almacenamiento gaseoso cuenta con un volumen pequeño y ciclado diario al igual que para el almacenamiento sólido, sin embargo, esta es la tecnología con menores costos de almacenamiento nivelado. Para el almacenamiento de hidrógeno líquido, las tecnologías tienen un costo de almacenamiento más alto, siendo el amonio el de menor costo y el hidrógeno líquido el de mayor costo, además de un volumen pequeño a mediano y ciclado de hasta semanas, las otras tecnologías de almacenamiento de hidrógeno líquido tienen volúmenes grandes y ciclado de hasta meses.

7.3 ASPECTOS AMBIENTALES.

7.3.1 Tecnologías de conversión

En la figura 5 se muestran los impactos ambientales asociados con el potencial de calentamiento global, energía primaria, eutrofización, acidificación, hidrocarburos diferentes al metano-NMHC y emisiones para las tecnologías de conversión

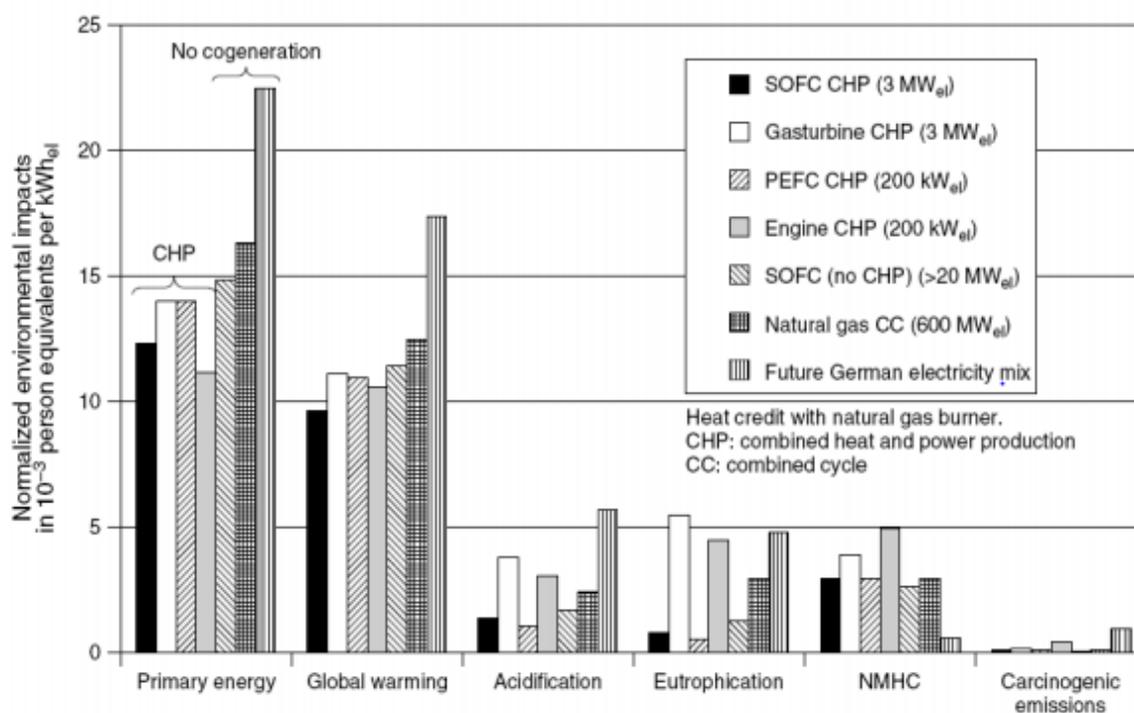


Figura 6. Impactos ambientales en las tecnologías de conversión.

Fuente:(Upadhyaya et al., 2018).

De la figura 5 se puede observar que las mezclas de futuras generaciones presentan mayores impactos, mientras que las SOFC, GT, PEFC, CHP presentan impactos menores para la energía primaria y calentamiento global. Para la acidificación y eutrofización las tecnologías SOFC CHP y PEFC CHP tienen impactos muy bajos, mientras que las demás tienen un impacto ambiental mayor.

7.3.2 Tecnologías de almacenamiento

En la tabla 6 se muestran los impactos ambientales para las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno gaseoso, líquido y sólido.

Tabla 6. Costo de las tecnologías de almacenamiento.

Tecnología	Impacto ambiental
Gaseoso	
Cavernas de sal	Moderado
Hidrógeno comprimido	Grande
Líquido	
Criocomprimido	Grande
Portador líquido orgánico	Variado

Sólido

Variado

Fuente: Adaptado de (World Energy Council, 2020)

De la tabla 6 se observa que las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno comprimido y criocomprimido tienen grandes impactos ambientales, sin embargo, es importante resaltar que todas las tecnologías de almacenamiento tienen impactos ambientales bajos, el principal factor del impacto en el almacenamiento es la proveniencia del hidrógeno, teniendo un mayor impacto ambiental las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno azul en comparación con el hidrógeno verde.

7.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO Y CONVERSIÓN

La tabla 6 muestra un cuadro comparativo de las tecnologías de almacenamiento y conversión, mostrando las principales ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías.

Tabla 7. Ventajas y desventajas de las tecnologías de almacenamiento y conversión de energía a partir de hidrógeno.

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CONVERSIÓN		
Celdas de combustible		
PAFC	Confiable Tolerancias superiores al 1% de CO	Eficiencias relativamente bajas Duración limitada Pérdida de electrolito Muy sensible a CO
PEM	Opera a temperatura ambiente Alta densidad de potencia Inicio rápido Electrolito sólido	Suministro de agua Durabilidad limitada Calor residual a bajas temperaturas Requiere aleaciones costosas
MCFC	Reformado interno Combustible flexible Calor residual a altas temperaturas Sin metales nobles	Electrolito líquido corrosivo Dióxido de carbono requerido en el cátodo Baja densidad de potencia
SOFC	Reformado interno Combustibles flexibles Calor residual a altas temperaturas Electrolito sólido Muy duraderas Sin metales nobles	Problemas de sellado Ciclo termal Inicio lento
Motor de generación interna	Efícaz	Pre ignición
HICE	Confiable Bajo costo	Dispositivo complejo Alto consumo de energía
HCCI	Combustibles flexibles Capacidad de integrar motores CI y SI en uno solo	Mezcla de combustible y aire con mucho combustible generan niveles de ruido y estrés críticos

	Tecnología limpia y eficiente	Mezcla de combustible y aire insuficiente provoca una combustión lenta o incompleta
GT	Fiabilidad Vida útil Tecnología madura	Uso de hidrógeno con impurezas
Conversión química	Incrementa el rendimiento hidrocraqueo Flexibilidad operativa adicional	Costo alto
ALMACENAMIENTO		
Comprimido	Madurez	Medidas de seguridad Capacidad de almacenamiento limitada Costos
Cavernas	Sin fugas Eficiente Almacenamiento alto	Ubicación
Criocomprimido	Presiones ambientales Densidad de almacenamiento alta Resistencia térmica	No resistir presión interna Costos Temperaturas extremadamente bajas
LOHC	Temperatura ambiente Operaciones económicas Seguras Fáciles de administrar Periodo de almacenamiento prolongado	Tecnología no madura
Fisorción	Ciclo de vida alto Larga historia Tiempos de repostaje cortos	Tecnología no madura Capacidades máximas de almacenamiento relacionadas con el área de superficie accesible de hidrógeno Materiales con gran área superficial tienen captaciones modestas
Materiales MOF	Estructura de poro abierto Altas captaciones	Tecnologías no maduras Producción de los materiales

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 6 se observa que para las tecnologías de conversión de hidrógeno se tiene que las celdas de combustible son tecnologías versátiles para la conversión del hidrógeno, ya que existen varios tipos de celdas en el mercado, sin embargo, son tecnologías no muy maduras, por lo que presentan varias desventajas como la sensibilidad al monóxido de carbono, durabilidad limitada, altos costos, entre otras. Por otro lado, las tecnologías HICE y HCCI son tecnologías eficientes, cuya principal desventaja es la complejidad de los dispositivos. La tecnología GT, por el contrario, presentan simplicidad en la operación, además de ser tecnologías maduras y confiables.

Para las tecnologías de almacenamiento, se tiene menos madurez tecnológica en comparación con la conversión, como se observa para la tecnología LOHC que presenta ventajas como

operaciones económicas, períodos de almacenamiento prolongados y operar a temperaturas ambientales, sin embargo, la madurez tecnológica no es suficiente para su amplia aplicación.

8. CONCLUSIONES

La revisión bibliográfica nos muestra que las tecnologías de conversión y almacenamiento de hidrógeno están cogiendo cada vez más fuerza, incrementando los estudios y el desarrollo de las mismas a nivel mundial. La implementación de las tecnologías del hidrógeno verde permite la ejecución de una transición energética de las tecnologías convencionales a tecnologías renovables, ayudando de esta forma a la producción de energías más limpias y eficientes, y de esta forma disminuir la contaminación ambiental, siendo también una solución tentadora para el agotamiento de los recursos fósiles en el mundo.

A nivel nacional no se tiene una madurez tecnológica en las tecnologías del hidrógeno, sin embargo, el país está promoviendo este desarrollo. La UPME junto con el ministerio de ciencias desarrollan la convocatoria 879 “energía sostenible y su aporte a la planeación energética” donde se promueve la investigación de estas tecnologías.

Las celdas de combustible son las tecnologías de conversión con mayor importancia en la actualidad, debido a la madurez creciente de sus tecnologías y sus aplicaciones principalmente en el sector transporte. El principal desafío se encuentra en las tecnologías de almacenamiento, que aún presenta grandes desafíos para la industria, haciendo costosa la implementación, para el caso de las tecnologías de almacenamiento gaseoso y líquido el principal desafío son las características volátiles del hidrógeno, para las tecnologías sólidas el desafío se encuentra en los materiales portadores y la capacidad de captación de estos.

De los análisis comparativos, se encontró que, para los aspectos tecnológicos, la GT tienen una mayor eficiencia para la conversión, y para el almacenamiento la mayor capacidad de almacenamiento la tienen los LOHC, con respecto al análisis económico se observa que de celdas PEM tienen un menor costo de inversión y energía de entrada, por otra parte, las tecnologías de almacenamiento gaseoso son menos costosas, siendo las tecnologías de compresión y almacenamiento en cavernas las menos costosas, y las tecnologías de almacenamiento de LOHC las más costosas. Por último, los impactos ambientales generados por las tecnologías de conversión y almacenamiento son bajos.

Finalmente, la transición energética hacia una economía basada en hidrógeno es una solución prometedora para el calentamiento global, la disminución de los gases de efecto invernadero, y el agotamiento de los combustibles fósiles, sin embargo, se necesita todavía más investigaciones y desarrollo de las tecnologías de almacenamiento y conversión, principalmente para las tecnologías de almacenamiento, para que sea más rentable su implementación.

9. RECOMENDACIONES

El documento de monografía se elaboró con el fin de ser base para estudios posteriores, por esto se recomienda:

- Realizar investigaciones más detalladas de cada una de las tecnologías de conversión y almacenamiento, con el fin de reducir sus costos, incrementar sus eficiencias y capacidades de almacenamiento, para hacer más competitivas las tecnologías del hidrógeno con respecto a otras tecnologías.
- Profundizar los estudios económicos, ambientales y tecnológicos de las tecnologías de conversión y almacenamiento de energía a partir de hidrógeno verde y azul.
- Investigar nuevos portadores de hidrógeno orgánico que puedan incrementar las capacidades de almacenamiento y reducir los costos de estas tecnologías.
- Realizar estudios a nivel nacional sobre la viabilidad de la implementación de las tecnologías de conversión y almacenamiento, y posteriormente realizar una ruta del hidrógeno para Colombia, con el fin de incursionar de una forma temprana en la transición energética temprana en el país y ser competitivos en este aspecto a nivel internacional.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abe, J. O., Popoola, A. P. I., Ajenifuja, E., & Popoola, O. M. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
- Acar, C., & Dincer, I. (2018). 4 . 24 *Hydrogen Energy Conversion Systems* (Vol. 4, pp. 947–984). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00441-7>
- Ahn, J., Park, S. H., Lee, S., Noh, Y., & Chang, D. (2018). Molten carbonate fuel cell (MCFC)-based hybrid propulsion systems for a liquefied hydrogen tanker. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(15), 7525–7537. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.015>
- Allebrod, F., Chatzichristodoulou, C., & Mogensen, M. B. (2013). *Alkaline electrolysis cell at high temperature and pressure of 250 C and 42 bar*. 229, 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.11.105>
- Ates, F., & Ozcan, H. (2020). Turkey ' s industrial waste heat recovery potential with power and hydrogen conversion technologies : A techno-economic analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.059>
- Baeyens, J., Zhang, H., Nie, J., Appels, L., Dewil, R., Ansart, R., & Deng, Y. (2020). Reviewing the potential of bio-hydrogen production by fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131(July), 110023. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110023>
- Barco-burgos, J., Eicker, U., Saldaña-robles, N., Saldaña-robles, A. L., & Alcántar-camarena, V. (2020). Thermal characterization of an alkaline electrolysis cell for hydrogen production at atmospheric pressure. *Fuel*, 276(December 2019), 117910. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117910>
- Bloomberg NEF. (2020). *Hydrogen Economy Outlook*.
- Cappelletti, A., Martelli, F., & Marta, V. S. (2017). Investigation of a pure hydrogen fueled gas turbine burner. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(15), 10513–10523. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.104>
- Chen, Z., Ma, Z., Zheng, J., Li, X., Akiba, E., & Li, H. (2020). Perspectives and challenges of hydrogen storage in solid-state hydrides. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.08.024>
- Cloete, S., Ruhnau, O., & Hirth, L. (2020). On capital utilization in the hydrogen economy: The quest to minimize idle capacity in renewables-rich energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.197>
- convocatoria energía sostenible*. (n.d.). Retrieved October 9, 2020, from https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/tdr_energia_sostenible_y_su_aporte_a_la_planeacion_minero_energetica-2020_firmados.pdf
- Eveloy, V., Karunkeyoon, W., Rodgers, P., & Al Alili, A. (2016). Energy, exergy and economic analysis of an integrated solid oxide fuel cell – gas turbine – organic Rankine power generation system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(31), 13843–

13858. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.146>

- Garcia, G., Arriola, E., Chen, W., & Luna, M. D. De. (2020). A comprehensive review of hydrogen production from methanol thermochemical conversion for sustainability. *Energy*, 119384. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119384>
- Gulcin, D., Weber, N., Heinrichs, H. U., Linßen, J., Robinius, M., Kukla, P. A., & Stolten, D. (2020). Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(11), 6793–6805. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.161>
- Han, M., Lao, J., Yao, Q., Zhang, B., & Meng, J. (2020). Carbon inequality and economic development across the Belt and Road regions. *Journal of Environmental Management*, 262(February), 110250. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110250>
- He, K., Zhang, C., He, Q., Wu, Q., Jackson, L., & Mao, L. (2020). Effectiveness of PEMFC historical state and operating mode in PEMFC prognosis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(56), 32355–32366. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.149>
- Hernandez, Á., Ramirez, V., Guilbert, D., & Saldivar, B. (2020). Development of an adaptive static-dynamic electrical model based on input electrical energy for PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.182>
- Inac, S., Ozen, S., & Midilli, A. (2020). Global warming , environmental and sustainability aspects of a geothermal energy based biodigester integrated SOFC system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(60), 35039–35052. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.224>
- Kadier, A., Sahaid, M., Abdeshahian, P., Chandrasekhar, K., Mohamed, A., Farhana, N., Logroño, W., Simayi, Y., & Abdul, A. (2016). Recent advances and emerging challenges in microbial electrolysis cells (MECs) for microbial production of hydrogen and value-added chemicals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 501–525. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.017>
- Koomson, S., & Lee, C. (2020). Lifetime Expectancy of molten carbonate fuel cells : Part I . Effect of temperature on the voltage and electrolyte reduction rates. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.218>
- Kuznik, F., Johannes, K., Obrecht, C., & David, D. (2018). A review on recent developments in physisorption thermal energy storage for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94(June), 576–586. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.038>
- Labandeira, X., Linares, P., & Würzburg, K. (2012). Energías renovables y cambio climático. *Cuadernos Económicos de ICE*, 83. <https://doi.org/10.32796/cice.2012.83.6032>
- Laborde, M., Lombardo, E., Bellot, F., Boaventura, J., García, J., & Gonzáles, M. (2010). *Potencialidades del hidrógeno como vector de energía en Iberoamérica*.
- Lai, H., Farida, N., Tucker, D., & Adams, T. A. (2020). Design and eco-technoeconomic analyses of SOFC / GT hybrid systems accounting for long-term degradation effects. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.032>

- Lui, J., Chen, W. H., Tsang, D. C. W., & You, S. (2020). A critical review on the principles, applications, and challenges of waste-to-hydrogen technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *134*(August), 110365. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110365>
- Minutillo, M., Perna, A., & Sorce, A. (2020). Green hydrogen production plants via biogas steam and autothermal reforming processes: energy and exergy analyses. *Applied Energy*, *277*(June), 115452. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115452>
- Morales, A., Pérez, M., Pérez, J., & DE león, S. (2017). *Energías renovables y el hidrógeno: un par prometedor en la transición energética de México*.
- Nicita, A., Maggio, G., Andaloro, A. P. F., & Squadrito, G. (2020). Green hydrogen as feedstock: Financial analysis of a photovoltaic-powered electrolysis plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(20), 11395–11408. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.062>
- Noh, Y. S., Lee, K. Y., & Moon, D. J. (2019). Hydrogen production by steam reforming of methane over nickel based structured catalysts supported on calcium aluminate modified SiC. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(38), 21010–21019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.287>
- Olabi, A. G., Bahri, A. Saleh, Abdelghafar, A. A., Baroutaji, A., Sayed, E. T., Alami, A. H., Rezk, H., & Abdelkareem, M. A. (2020). Large-vs scale hydrogen production and storage technologies: Current status and future directions. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.110>
- Pandey, A. P., Bhatnagar, A., Shukla, V., Soni, P. K., Singh, S., Verma, S. K., Shaneeth, M., Sekkar, V., & Srivastava, O. N. (2020). Hydrogen storage properties of carbon aerogel synthesized by ambient pressure drying using new catalyst triethylamine. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(55), 30818–30827. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.145>
- Proost, J. (2020). Critical assessment of the production scale required for fossil parity of green electrolytic hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, *2050*(xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.259>
- R.K, A., J.K, P., & T.Q, H. (2016). 5 - Cryo-compressed hydrogen storage. In *Compendium of Hydrogen Energy* (pp. 119–145). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00005-5>
- Rezaei, M., Meshkani, F., Ravandi, A. B., Nematollahi, B., Ranjbar, A., Hadian, N., & Mosayebi, Z. (2011). Autothermal reforming of methane over Ni catalysts supported on nanocrystalline MgO with high surface area and plated-like shape. *International Journal of Hydrogen Energy*, *36*(18), 11712–11717. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.06.056>
- Rezaeitavabe, F., Saadat, S., Talebbeydokhti, N., & Sartaj, M. (2020). Enhancing bio-hydrogen production from food waste in single-stage hybrid dark-photo fermentation by addition of two waste materials (exhausted resin and biochar). *Biomass and Bioenergy*, *143*(October), 105846. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105846>

- Rodrigo Vásquez, Felipe Salinas, D. G. für I. Z. (GIZ) G. (2018). *tecnologías del hidrógeno y perspectivas paara chile*.
- Sanchez, A., Ayala, O. R., Hernandez-sanchez, P., & Valdez-vazquez, I. (2020). An environment-economic analysis of hydrogen production using advanced biorefineries and its comparison with conventional technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.135>
- Sazali, N. (2020). Emerging technologies by hydrogen : A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.021>
- Sharma, S., Basu, S., Shetti, N. P., & Aminabhavi, T. M. (2020). Waste-to-energy nexus for circular economy and environmental protection : Recent trends in hydrogen energy. *Science of the Total Environment*, 713. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136633>
- Shiva Kumar, S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 442–454. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>
- Singh, R., Singh, M., & Gautam, S. (2020). Hydrogen economy, energy, and liquid organic carriers for its mobility. *Materials Today: Proceedings*, xxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.065>
- TEC, J. (2013). *ADSORCIÓN DE HIDRÓGENO EN MATERIAL COMPUESTO POR NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED MÚLTIPLE, DIÓXIDO DE TITANIO Y POLI(ANILINA)*.
- Thomas, J. M., Edwards, P. P., Dobson, P. J., & Owen, G. P. (2020). Decarbonising energy : The developing international activity in hydrogen technologies and fuel cells. *Journal of Energy Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.03.087>
- Upadhyaya, J., Peters, R., & Fouad, F. (2018). *Environmental impact of fuel cell technology for electric power generation: an overview and case studies*. 14, 63–65. <https://doi.org/10.15900/j.cnki.zylf1995.2018.02.001>
- Usman, M., Makhdam, M. S. A., & Kousar, R. (2020). Does financial inclusion, renewable and non-renewable energy utilization accelerate ecological footprints and economic growth? Fresh evidence from 15 highest emitting countries. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102590>
- Vajihinejad, V. (2017). Biological conversion of hydrogen to electricity for energy storage. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.110>
- Velazquez Abad, A., & Dodds, P. E. (2020). Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. *Energy Policy*, 138(February), 111300. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111300>
- Villa, K. (2013). ESTUDIO DE LA PRODUCCION DE HIDROGENO MEDIANTE FOTOCATALISIS HETEROGENEA. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(1), 1689–1699. <http://ir.obihiro.ac.jp/dspace/handle/10322/3933%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.004%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-25369-w%0Ahttps://www.bertelsmann->

stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/MT_Globalization_Report_

- Wang, X., Sun, B., & Luo, Q. (2018). Energy and exergy analysis of a turbocharged hydrogen internal combustion engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(11), 5551–5563. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.047>
- World Energy Council. (2020). *Five Steps to Energy Storage. Innovation Insights Brief 2020*. 62. www.worldenergy.org
- Yamada, N., & Anuar, N. (2010). Efficiency of hydrogen internal combustion engine combined with open steam Rankine cycle recovering water and waste heat. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(3), 1430–1442. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.088>
- Zeng, Z., Qian, Y., Zhang, Y., Hao, C., Dan, D., & Zhuge, W. (2020). A review of heat transfer and thermal management methods for temperature gradient reduction in solid oxide fuel cell (SOFC) stacks. *Applied Energy*, 280(September), 115899. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115899>
- Zhang, J., Zheng, J., & Yang, W. (2021). Green supercapacitor assisted photocatalytic fuel cell system for sustainable hydrogen production. *Chemical Engineering Journal*, 403(July 2020), 126368. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126368>
- Zhiznin, S. Z., Timokhov, V. M., & Gusev, A. L. (2020). Economic aspects of nuclear and hydrogen energy in the world and Russia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(56), 31353–31366. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.260>