

**ANÁLISIS TÉCNICO-AMBIENTAL DEL USO DE PILAS COMBUSTIBLES DE
HIDRÓGENO EN EL SECTOR TRANSPORTE**

NATALIA ALEJANDRA URICOCHEA NARVÁEZ

**Monografía para optar el título de Especialista en
Gestión Ambiental**

Orientador

Libardo Mendoza Geney

Ingeniero Mecánico

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.**

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Director de la Especialización

Firma del calificador

Bogotá D.C. febrero de 2021

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente Institucional de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de investigaciones

Dra. María Claudia Aponte González

Vicerrector administrativo y financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano de la Facultad de Ingeniería

Dr. julio cesar fuentes arismendi

Director programa Especialización en Gestión Ambiental

DRA. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestos en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres y a mi hermano.

AGRADECIMIENTOS

A mi incondicional director el profesor Libardo Mendoza Geney, a la Universidad Fundación Universidad de América y a todos aquellos profesores que durante la especialización me impartieron sus conocimientos.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN.....	15
INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL	19
1.1 Producción de CO2 en el sector transporte	19
1.2 Fuentes energéticas de origen renovable y no renovable	21
<i>1.2.1 Energías renovables utilizadas para obtención de hidrógeno.</i>	21
a. Energía solar	22
b. Energía eólica	23
c. Biomasa	24
1.3 Alternativas de infraestructura para medios de transporte	25
<i>1.3.1 Vehículos híbridos eléctricos.</i>	25
<i>1.3.2 Vehículos eléctricos con batería.</i>	26
<i>1.3.3 Vehículos eléctricos con pilas combustibles</i>	26
1.4 Generalidades del hidrógeno	28
2. PRODUCCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO.....	29
2.1 Producción de hidrógeno	29
<i>2.1.1 Reformado con vapor</i>	31
<i>2.1.2 Oxidación parcial</i>	32
<i>2.1.3 Gasificación del carbón.</i>	32
<i>2.1.4 Pirólisis de hidrocarburos</i>	33
<i>2.1.5 Electrólisis del agua</i>	33
<i>2.1.6 División termoquímica del agua y termólisis</i>	36
<i>2.1.7 División fotoelectroquímica del agua.</i>	36
<i>2.1.8 Craqueo termocatalítico</i>	36
<i>2.1.9 Procesos a partir de la biomasa</i>	38
<i>2.1.10 Hidrógeno a partir de fuente nuclear</i>	39
<i>2.1.11 Esquematzación de algunos procesos desde fuentes sostenibles.</i>	41
2.2 Almacenamiento de hidrógeno	44

2.2.1 Gas comprimido	44
2.2.2 Almacenamiento criogénico	46
2.2.3 Almacenamiento crio-comprimido	46
2.2.4 Diagrama temperatura-densidad-presión para los sistemas de almacenamiento común	47
2.2.5 Absorbentes de gran superficie y materiales a base de carbono	48
2.2.6 Almacenamiento químico	48
2.2.7 Características generales de todos los sistemas de almacenamiento	52
3. TECNOLOGÍAS EN PILAS COMBUSTIBLES	53
3.1 Tipologías generales de pilas combustibles.....	53
3.1.1 Proton Exchange membrane fuel cells (PEMFC)	54
3.1.2 Alkaline fuel cells (AFC)	54
3.1.3 Phosphoric acid fuel cells (PAFC).....	54
3.1.4 Solid oxide fuel cells (SOFC)	54
3.1.5 Molten carbonate fuel cells (MCFC).....	54
3.1.6 Direct methanol fuel cells (DMFC).....	55
3.1.7 Reversible fuel cells	55
3.1.8 Proton ceramic fuel cells.....	55
3.2 Enfoque de pilas combustibles para el sector transporte.....	56
3.2.1 PEMFC.....	56
a. Materiales.....	57
3.2.2 AFC.....	60
3.2.3 SOFC	62
4. CONSIDERACIONES TÉCNICO-AMBIENTALES EN EL PROCESO DE UTILIZACIÓN DE HIDRÓGENO EN PILAS COMBUSTIBLES	65
4.1 Consideraciones en producción.....	67
4.1.1 Emisiones asociadas a cada técnica	67
4.1.2 Factores técnicos asociados.....	70
4.1.3 Resumen técnico-ambiental.....	72
a. Ventajas y desventajas de las técnicas.....	73
4.1.4 Evolución futura del uso de las técnicas	74
4.2 Consideraciones en almacenamiento.....	77
4.2.1 Generalidades técnicas a considerar	77
4.2.2 Materiales.....	81

4.2.3 Riesgos	82
4.2.4 Dimensión ambiental	85
4.3 Consideraciones en los mecanismos de pilas combustibles	89
4.3.1 Limitaciones en PEMFC	90
4.3.2 Dispositivos, materiales y sus pesos	94
4.3.3 Costos	96
4.3.4 Dimensión ambiental de los materiales, elementos y procesos incluidos	97
a. Efectos ambientales durante el proceso de producción de la pila.....	101
b. Pilas SOFC	103
4.4 Contribución al impacto ambiental de los elementos de la estructura de un vehículo a base hidrógeno	104
4.5 Fase de uso de FCEV y su efecto ambiental	105
5. COMPARACIÓN ENTRE MOTORES DE COMBUSTIÓN Y PILAS COMBUSTIBLES DE HIDRÓGENO	107
5.1 A nivel ambiental.....	107
5.1.1 GWP.....	107
5.1.2 Acidificación	112
5.1.3 VOCs.....	113
5.1.3 CO.....	114
5.1.4 NOx.....	115
5.1.5 Toxicidad	116
5.1.6 Ecotoxicidad terrestre	118
5.1.7 PM	118
5.1.8 Alteración a capa de ozono	119
5.1.9 Eutrofización	120
5.1.10 Agotamiento abiótico.....	120
5.1.11 Cuantificación económica de los impactos ambientales	121
5.1.12 Contaminantes asociados a cada combustible y tecnología vehicular a lo largo del ciclo de vida.....	123
5.2 A nivel técnico.....	128
5.2.1 Costos de inversión.....	128
5.2.2 Consumo de combustible	129
5.2.3 Autosuficiencia	131

5.2.4 Precio de combustible	132
5.2.5 Eficiencia energética	133
5.2.6 Peso de los vehículos	133
CONCLUSIONES	135
PERSPECTIVAS	138
BIBLIOGRAFÍA.....	140

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 Emisiones de CO ₂ y AGR por parte de los siete países más emisores	20
Figura 2 Captador solar térmico.....	22
Figura 3 Sistema solar con torre central.....	23
Figura 4 Celdas fotovoltaicas para generar electricidad	23
Figura 5 Partes de un aerogenerador	24
Figura 6 Energía de la biomasa.....	25
Figura 7 Infraestructura de vehículos híbridos.....	25
Figura 8 Infraestructura de vehículos eléctricos con batería.....	26
Figura 9 Infraestructura de producción para vehículos con pilas combustibles	27
Figura 10 Tipos de infraestructura vehicular dependiente de la fuente	27
Figura 11 Sistemas de producción de hidrógeno según materia prima.....	29
Figura 12 Esquemas de procesos de producción de hidrógeno con aporte de calor	30
Figura 13 Esquemas de procesos de producción de hidrógeno con aporte de electricidad	31
Figura 14 Electrólisis de agua	34
Figura 15 Fotoelectrólisis.....	36
Figura 16 Proceso de craqueo termocatalítico	37
Figura 17 Procesos de producción a partir de los tipos de biomasa.....	39
Figura 18 Ciclos termoquímicos de Cu-Cl.....	40
Figura 19 Ciclo termoquímico de S-I.....	41
Figura 20 Sistemas de almacenamiento de hidrógeno	44
Figura 21 Microesferas capilares	45
Figura 22 Almacenamiento crio-comprimido	47
Figura 23 Diagrama densidad-presión-temperatura.....	47
Figura 24 Hidruros metálicos.....	50
Figura 25 Mecanismos de los diferentes tipos de pilas combustibles.....	56
Figura 26 PEMFC	57
Figura 27 Membrana de PEMFC	58
Figura 28 Esquemización de una PEMFC	60

Figura 29 SOFC	63
Figura 30 Límites del sistema a analizar.....	65
Figura 31 Comparación preliminar de técnicas	66
Figura 32 Emisiones de CO ₂ de los métodos de producción.....	68
Figura 33 Emisiones de CO ₂ Y SO ₂ por tecnología	69
Figura 34 Emisiones WTW de CH ₄ , CO, NO _x y PM por parte de algunos sistemas de producción.....	70
Figura 35 Comportamiento de la producción de hidrógeno.....	76
Figura 36 Reducción en huella de carbono por el cambio en sistemas de producción.....	77
Figura 37 Tipos de tanques para H ₂ comprimido	82
Figura 38 FRR.....	83
Figura 39 Incidentes asociados al hidrógeno líquido.....	84
Figura 40 Consecuencias de riesgo resultantes en el almacenamiento líquido de H ₂	84
Figura 41 Proceso de producción del tanque	86
Figura 42 Proceso de fabricación de fibra de carbono	87
Figura 43 Producción de fibra de carbono y sus impactos.....	88
Figura 44 Vida útil mejorada por cambio de materiales de la membrana	92
Figura 45 Reducciones en la productividad por variaciones de potencial	94
Figura 46 Equipos en un medio de transporte con pila combustible y su peso	95
Figura 47 Costos asociados a una PEMFC	97
Figura 48 Efectos ambientales de los elementos de la pila.....	98
Figura 49 Plásticos y materiales que causan impacto ambiental	99
Figura 50 Reciclaje de los metales y su efecto	100
Figura 51 Etapas de producción de la pila y su efecto ambiental	101
Figura 52 Impactos de una pila con membrana PFSA	103
Figura 53 Pilas de SOFC y los impactos ambientales de sus componentes.....	104
Figura 54 Impactos de la fabricación de un HFCV aportados por cada uno de sus elementos estructurales.....	105
Figura 55 Impactos ambientales de diferentes aspectos en la etapa de uso de un FCEV	106
Figura 56 GHG según el tipo de tecnología.....	108
Figura 57 Emisiones según porcentaje de introducción de energías renovables	109

Figura 58 GHG dependiente del tipo de sistema de producción de hidrógeno.....	110
Figura 59 Emisiones de CO2 comparativamente entre técnicas y sistemas productivos	111
Figura 60 Acidificación según tecnología.....	112
Figura 61 Contribución de procesos y materiales incorporados en los FCEV en la acidificación	113
Figura 62 Emisiones de compuestos orgánicos volátiles según sistema productivo	114
Figura 63 Emisiones de metano según tecnología y sistema productivo de hidrógeno.....	115
Figura 64 Emisiones NOx según tecnología y sistema productivo.....	116
Figura 65 Toxicidad humana según tecnología	117
Figura 66 Toxicidad dependiente del sistema productivo.....	117
Figura 67 Ecotoxicidad dependiente de la tecnología.....	118
Figura 68 Emisiones de material particulado 2.5 y 10 según mecanismo productivo.....	119
Figura 69 Agotamiento de capa de ozono según tecnología.....	119
Figura 70 Eutrofización dependiente de la tecnología.....	120
Figura 71 Agotamiento abiótico dependiente de la tecnología.....	121
Figura 72 CO2 dependiente de la opción vehicular, de la etapa y del proceso.....	125
Figura 73 CO,NOx,SOx,VOC y polvo dependiente de tecnología vehicular y procesos.....	126
Figura 74 Variación del sistema de almacenaje y su influencia	127
Figura 75 Costos de inversión.....	128
Figura 76 Discriminación de los gastos en los ICEV y HFCV	129
Figura 77 Consumo de combustible según tecnología.....	129
Figura 78 Consumo de energía fósil según tecnología y sistema productivo	130
Figura 79 Consumo de energía fósil actual y futura esperada	131
Figura 80 Autosuficiencia según tecnología	132
Figura 81 Precio del combustible según tecnología.....	132
Figura 82 Energía y exergía según tecnología	133
Figura 83 Comparación del peso de los FCV y ICEV	134

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1 Propiedades químicas, físicas y térmicas del hidrógeno a 25 C y 760 mmHg	28
Tabla 2 Tipos de electrolizadores.....	35
Tabla 3 Configuraciones de procesos de producción desde fuentes sostenibles.....	42
Tabla 4 Configuraciones de procesos de producción desde fuentes sostenibles II	43
Tabla 5 Capacidades gravimétricas de hidruros.....	50
Tabla 6 Características generales de los sistemas de almacenamiento	52
Tabla 7 Propiedades de los sistemas de pilas combustibles.....	53
Tabla 8 Entradas y salidas de energía de los sistemas de producción para determinar la eficiencia	72
Tabla 9 Resumen técnico-ambiental	73
Tabla 10 Ventajas y desventajas de algunos procesos de producción de H ₂	74
Tabla 11 Desarrollo de los mecanismos de producción a futuro	75
Tabla 12 Metas futuras en almacenamiento sólido	78
Tabla 13 Objetivos futuros en los diferentes sistemas de almacenamiento	79
Tabla 14 Retos y oportunidades de los sistemas de almacenamiento	80
Tabla 15 Fabricación de fibra de carbono y sus efectos ambientales	89
Tabla 16 STACK de la pila combustible y sus pesos.....	90
Tabla 17 Datos técnicos de las pilas combustibles a futuro	93
Tabla 18 Partes del stack de la pila combustible para cargobike 200W	96
Tabla 19 Aspectos ambientales de la manufactura y disposición de los elementos de la pila.....	97
Tabla 20 Total de emisiones incluyendo la etapa de manufactura.....	111
Tabla 21 Emisiones en manufactura de los vehículos.....	112
Tabla 22 Escenarios de análisis ambiental con cuantificación económica	122
Tabla 23 Emisiones reportadas del análisis económico por escenario y por etapa	122
Tabla 24 Cuantificación económica de los escenarios	123
Tabla 25 Consumo energético y emisiones GHG según proceso y tecnología.....	124
Tabla 26 Alternativas tecnológicas de movilidad para comparación de peso de los vehículos..	133

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó una investigación que busca estudiar a nivel técnico y ambiental los aportes que traería consigo la tecnología de pilas combustibles de hidrógeno en vehículos eléctricos. Como primer paso se llevó a cabo la recopilación de las bases teóricas de todos los subprocesos asociados a el ciclo productivo del hidrógeno, por lo cual, se incluyeron los mecanismos de producción y almacenamiento de hidrógeno y manufactura de pilas combustibles. Seguidamente, se introdujeron también algunas consideraciones técnico-ambientales asociadas a cada subproceso, las cuales ayudaron a la obtención de una visión más amplia de la tecnología que finalmente, y sumado a otros datos cuantificables, permitieron asociar los beneficios netos que se obtienen por el uso de estos vehículos a hidrógeno frente a los vehículos tradicionales a gasolina.

En términos generales, los mayores limitantes identificados por el uso del hidrógeno en el sector transporte fueron las emisiones desprendidas de algunos de los sistemas de producción, además de la baja eficiencia de conversión energética de algunas de estas técnicas. Por parte del almacenamiento, las desventajas vienen a partir de factores como la elevada utilización de fibras de carbono en equipos, la dificultad técnica por el indicado control de condiciones de presión y temperatura y particularmente el hecho de que en el almacenamiento en materiales solidos o de tipo químico existen bajas capacidades gravimétricas y cinéticas lentas. En cuanto a la manufactura de las pilas, la incorporación de algunos materiales, específicamente algunos metales, hacen de su uso una barrera ambiental.

Pese a lo anterior mencionado, los resultados que se pudieron obtener fueron que, dependiendo de factores como el tipo de tanque implementado y sus materiales, el tipo de pila con sus respectivos diseños y principalmente el sistema de producción de hidrógeno, los beneficios ambientales totales pueden alcanzar en algunos casos reducciones incluso del 96% para el VOC y el CO o del 88% para el caso de las emisiones CO₂. Técnicamente, por otro parte, se tiene que los HFCV en muchos de los requerimientos, como el consumo energético en operación, el precio del combustible y la energía o exergía vinculada al sistema, son parámetros que ya compiten con los vehículos convencionales y que en el caso de la autosuficiencia y la alta inversión habría que desarrollar más las técnicas de almacenamiento y la infraestructura de hidrógeno, respectivamente.

PALABRAS CLAVES: Pilas combustibles, producción de hidrógeno, almacenamiento de hidrógeno, análisis técnico-ambiental, impactos ambientales.

INTRODUCCIÓN

El esquema de movilidad actual se basa en el ampliamente desarrollado uso de motores de combustión interna, que funcionan mediante la utilización de un combustible bien sea gasolina o diesel, que ha sido previamente obtenido a partir de fuentes fósiles como el petróleo en refinerías. Debido a razones como la facilidad que aportan los medios de transporte de alcanzar grandes distancias rápidamente, la alta industrialización y por último a que día a día los precios de estos vehículos se ajustan más a las posibilidades económicas, la compra de éstos ha aumentado exponencialmente.

Pese al hecho de que el desarrollo tecnológico ha posicionado a este tipo de movilidad convencional como la de principal uso en dicho sector, el proceso de combustión de la fuente energética en los motores en su funcionamiento genera a diario grandes cantidades de CO₂, alcanzando a escala global para el 2020 un total de 8047 millones de toneladas métricas equivalentes emitidas (iea, 2020) que, a menos de que exista un sistema de captura (que en la mayoría de casos no aplica), se dirigirán directamente hacia la atmosfera afectando sus características. Este gas de efecto invernadero es el principal causante del calentamiento global que está sufriendo el planeta por ser el tipo de gas que más se emite, el de mayor correspondencia porcentual con aproximadamente un 76% entre todas las industrias. Por ese motivo y aunque los transportes con motores a gasolina son muy eficientes, no cumplen con los objetivos de desarrollo sostenible planteados como hoja de ruta para asegurar los estándares de calidad de vida, en particular, se estaría incumpliendo con los objetivos número siete y diez de energía no contaminante y acción por el clima, respectivamente.

Por lo cual, a pesar de las numerosas ventajas que proporciona el uso de los motores a gasolina, en el contexto ambiental no constituyen la opción correcta. La pretensión es entonces recurrir a opciones que, si cumplan todos los estándares, desde lo técnico, pasando por lo ambiental y tomando en cuenta finalmente lo económico. Para llegar a alcanzar esta meta se está llevando a cabo el desarrollo de investigaciones de mecanismos que consideren todas estas dimensiones. En un principio se pensó en incluir nuevos diseños y materiales, además mejorar las practicas operacionales y reducir la demanda de transporte, pero con el tiempo se empezó a ver que lo que en realidad ayudaría a mitigar más rápida y efectivamente los efectos sería empezar a hacer una transición a nuevas alternativas técnicas.

Entre estas alternativas, se pensó en primera medida en el uso de biocombustibles a partir de biomasa, la utilización de éstos ha sido considerada como buena opción para reducir la cantidad de emisiones (X. Wang et al., 2020). Por otra parte, desde hace aproximadamente unos cuarenta años se intensifica el avance e inversión en los sistemas eléctricos ya sea abastecidos únicamente con baterías, o los que funcionan de forma híbrida que incluyen ambos sistemas, tanto las baterías como los motores de combustión y además en este nuevo siglo ha recibido una gran atención los vehículos que mediante pilas combustibles transforman el hidrógeno en electricidad debido a los numerosos beneficios que según la literatura traen consigo (Bicer y Dincer, 2018). Las pilas combustibles pueden alcanzar buenas eficiencias de conversión energética y además pueden ser factibles económicamente si se estandariza una buena infraestructura tanto de producción como de abastecimiento, como ya se ha hecho con el esquema de uso de petróleo para obtener gasolina (Shell, 2017).

Específicamente, las pilas combustibles permiten la producción de energía eléctrica a través de la conversión electroquímica, emplean la energía almacenada en el hidrógeno y utilizan oxígeno y los transforman en electricidad y calor; la única emisión que se genera es vapor de agua, lo que constituye el mayor factor positivo de la técnica (Thomas et al., 2020). El dispositivo consiste en un conjunto de capas que se conectan en serie, sin embargo, el mecanismo de funcionamiento fundamental es el conjunto formado por la membrana y los electrodos. Por ende, como tal el equipo está conformado por un ánodo, un cátodo y un electrolito; en los electrodos se producen las reacciones fundamentales de las pilas y la función del electrolito es separar los gases entre sí. El objetivo es que el gas de hidrógeno se divida en iones y emita electrones para que éstos viajen al cátodo generando electricidad por medio de un circuito externo para que finalmente el oxígeno se ionice (Spazzafumo, 2018). En términos generales, el principio básico es el flujo de electrones cuando se utilizan dos electrodos sumergidos en un electrolito, esto pasa porque en uno de los electrodos ocurre una reacción catalítica del hidrógeno y en el otro se observa una reacción del oxígeno (Thomas et al., 2020).

Es así, como estos equipos se pueden usar como fuente de energía para el suministro de potencia en el sector del transporte. Además, el uso de hidrógeno como material de insumo o fuente de energía en estos sistemas permite que la producción de energía eléctrica no genere emisiones contaminantes que puedan afectar el medio ambiente.

Sin embargo, es necesario determinar la viabilidad que tiene esta iniciativa de pilas de hidrógeno de ser integradas en la industria de la movilidad. Esto se hace a partir de llevar a cabo estudios integrales que permitan evaluar si a lo largo de la cadena de procesos, ya sea en la producción y almacenamiento de hidrógeno o en la instalación y funcionamiento de la pila combustible, se logra reducir la generación general de emisiones y el impacto ambiental de forma comparativa con el uso de combustibles de origen fósil como fuente de energía de movilidad.

El alcance de este proyecto se enfocará entonces en llevar a cabo un análisis del uso de pilas combustibles de hidrógeno partiendo del estudio de la fundamentación teórica del principio de funcionamiento, las fuentes de producción de hidrógeno, la identificación de los parámetros operacionales de mayor influencia en el desempeño y en los procesos y llegando finalmente hasta el análisis que incluya la dimensión técnico-ambiental y que exponga sus posibilidades como opción “limpia” de producción de energía en el sector transporte.

Para alcanzar este objetivo final se abordarán los capítulos con un orden secuencial de entendimiento. Para empezar el desarrollo del proyecto se iniciará con un capítulo de marco teórico, donde se expondrá un contexto teórico general que resalte conceptos claves para el entendimiento de los capítulos sucesivos. Luego, se abordarán los dos siguientes capítulos, donde se desarrollarán las bases teóricas de los sistemas de producción, de almacenamiento y de las pilas combustibles que ayudará a tener un conocimiento de los procesos correspondientes al uso del hidrógeno. Para el cuarto capítulo se revisará algunas consideraciones técnico-ambientales que son importantes a tener en cuenta en cada uno de los subprocesos, para los futuros avances en los medios de transporte a base hidrógeno. Finalmente, en el quinto y último capítulo se cerrará el análisis elaborando una comparación en términos ambientales y técnicos del uso de los motores a gasolina de uso convencional y las pilas de hidrógeno para este sector. Es importante tomar en cuenta que, al ser una tecnología relativamente nueva, el estudio incorporará información y datos cuantificables a nivel mundial de las experiencias realizadas.

1. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

De manera generalizada el fin de este marco teórico es introducir algunos conceptos claves que servirán para lograr una mejor comprensión de los siguientes capítulos. Por lo cual, se abordarán las temáticas de impacto de movilidad a gasolina en la calidad del aire, seguido de una breve explicación de las energías renovables asociadas al hidrógeno, para continuar con las alternativas de infraestructura en los vehículos que existen actualmente y finalizando con unas características generales del hidrógeno.

1.1 Producción de CO₂ en el sector transporte

El elevado crecimiento de la población a nivel global ha generado que el consumo energético se vea incrementado constantemente y con ello consecuentemente los impactos ambientales también; continuamente se están observando alteraciones negativas en las diferentes categorías ambientales como el agua, el suelo y específicamente una de las que más se han visto deterioradas es la calidad del aire. El calentamiento global que se está presentando en el planeta está directamente asociado a los gases de efecto invernadero como el óxido de nitrógeno, el metano y el dióxido de carbono, con porcentajes de contribución del 6%, 16% y 76%, respectivamente. Estos gases de efecto invernadero son generados por una amplia variedad de sectores económicos, los más destacados son la agricultura, la producción de calor y electricidad, la industria y manufactura y el sector transporte (IPCC,2014).

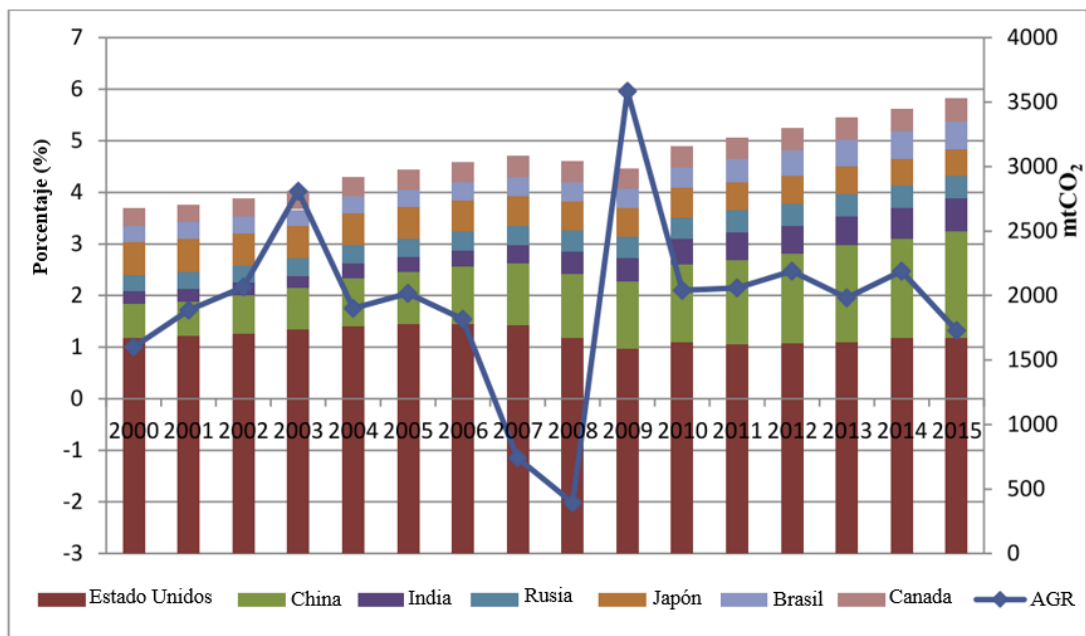
Actualmente, la fuente energética de primordial consumo es el petróleo, con un porcentaje del 80%, del cual solo el sector transporte gasta el 65%. Además, la quema de combustibles fósiles en los diversos transportes aporta un 24% de las emisiones de efecto invernadero a escala mundial debido al proceso de combustión de la fuente energética durante el funcionamiento de los vehículos, por lo cual se emite constantemente CO₂ a la atmosfera, esto sin contar que exista una combustión incompleta y se generen otros gases adicionales como el metano y los óxidos de nitrógeno y azufre (Solaymani, 2019).

En cuanto a los países que más contribuyen a este impacto ambiental se encuentran Estados Unidos, China, India, Rusia, Japón, Brasil, Canadá, Alemania, México y Arabia Saudita; y a pesar de que en estos países se exijan unos estándares altos tecnológicos y de calibración, para lograr las mejores eficiencias y menos emisiones en los vehículos a gasolina, el problema con el CO₂ en el sector continua (Choi et al., 2020). En la **figura 1** podemos observar las emisiones de CO₂ por

parte de siete países y la tasa de crecimiento promedio anual (AGR), allí se puede identificar que las emisiones totales de CO₂ pertenecientes a los 7 países pasaron de 2676 millones de toneladas en 2000 a 3531 millones de toneladas en 2015 y para la tasa de crecimiento promedio anual se obtiene un resultado general del 1,9%. También se conoce que al sumar las contribuciones de estos siete países se alcanza un porcentaje de participación del 45,6%, en relación al total mundial de emisiones de CO₂ del transporte; y que solamente en Estados Unidos y China las emisiones acumuladas registradas de CO₂ fueron de 26998.6 y 8190.9 millones de toneladas (entre el mismo periodo del 2000 al 2015) (Solaymani, 2019).

Figura 1

Emisiones de CO₂ y AGR por parte de los siete países más emisores



Nota. La cantidad de CO₂ emitida esta por lo general en constante crecimiento. Tomado de *CO₂ emissions patterns in 7 top carbon emitter economies: The case of transport sector*, Solaymani, 2019, *Energy*

A manera de ejemplificación, únicamente en Estados Unidos en el 2019 las emisiones de CO₂ provenientes del transporte fueron de 1902 millones de toneladas métricas (eia, 2020). Desde otro ángulo, particularmente en Colombia que es un país en desarrollo, algunos factores como que el transporte aún no cumple los requisitos de normatividad para reducir los impactos y la creciente demanda vehicular por el desarrollo visto en ciudades con superpoblación, desembocan en que este

sector es el principal contribuyente a las emisiones de CO₂, que representa aproximadamente el 10% del inventario nacional de éstas (Espinosa Valderrama et al., 2019).

Entonces, como ya se mencionó con anterioridad, la consecuencia directa del incremento de las emisiones de CO₂ es el calentamiento global que se está presentando, investigaciones mencionan que para el año 2100 la temperatura media global aumentaría entre 1.4 °C y 5.8 °C, generando así implicaciones importantes en el ciclo del agua, las líneas costeras, los diferentes ecosistemas y la salud de la población (Chanda y Bose, 2020). Así mismo, en la calidad del aire, se tienen datos de que más de un 80 % de la población está sujeta actualmente a un ambiente por debajo de las características indicadas (Ajanovic y Haas, 2020).

1.2 Fuentes energéticas de origen renovable y no renovable

En física se considera a la energía como esa posibilidad que tiene un cuerpo de generar bien sea trabajo o calor. A partir del primer principio de la termodinámica se sabe que la energía se transforma y es por esta razón que se puede manifestar en la vida cotidiana de diversas formas, como gravitacionalmente, en cinética, en química y de forma nuclear o radiante, entre otras (Schallenberg et al., 2008). Según la disponibilidad de la energía pueden existir energías renovables, que nos proporcionan una fuente inagotable y están son debidas directa o indirectamente a la radiación solar o en último a la atracción gravitacional de cuerpos. El otro tipo de energías son las no renovables como el petróleo, que son fuentes agotables y actualmente, pese a ser las más contaminantes por la emisión de gases efecto invernadero, son consideradas como el combustible fundamental de uso en el sector transporte. Como se ha podido identificar a lo largo de los años, dicho sector puede servirse para funcionar de cualquiera de los dos tipos de energía, el punto es analizar cuál fuente proporciona unas mayores ventajas globales en los aspectos técnicos, ambientales, sociales y económicos.

Particularmente, el hidrógeno en su forma diatómica es un combustible que puede ser utilizado por medio de las pilas para brindar la energía requerida para el transporte, sin desencadenar en las emisiones de CO₂ atribuidas a la movilidad convencional. El proceso de obtención de hidrógeno se origina a través de diferentes mecanismos que, como ya se analizó, pueden requerir de fuentes fósiles o también pueden transformar la energía contenida en alguna fuente renovable y es cuando éste recibe el nombre de hidrógeno verde (Moradi y Groth, 2019).

1.2.1 Energías renovables utilizadas para obtención de hidrógeno. Existen diferentes tipos de energías renovables, cada una de ellas en diferentes estados de implementación y en

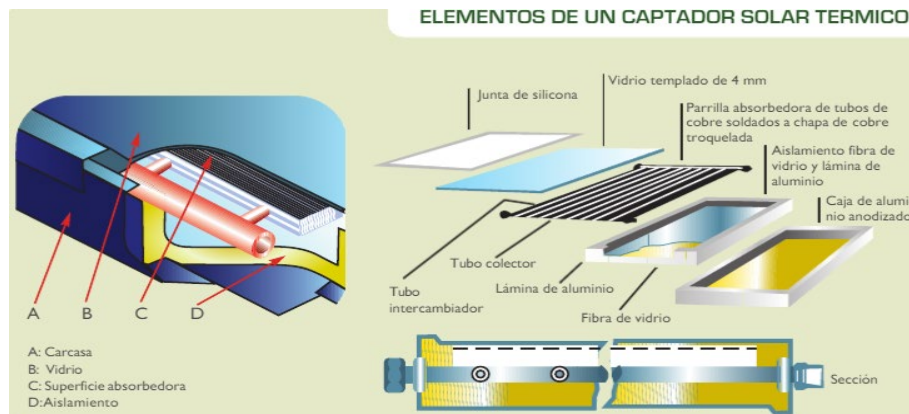
constante desarrollo e investigación debido a su gran potencial para suplir las necesidades energéticas a futuro, entre ellas se destacan la energía solar, la eólica y la biomasa, enfocadas a la producción de hidrógeno. La utilización de estas fuentes energéticas supone un avance en términos de dependencia energética, en términos ambientales, sociales y económicos.

a. Energía solar. Consiste en el aprovechamiento de la energía proveniente del sol. La radiación solar puede presentarse en la tierra de forma directa cuando no se ha producido ninguna desviación, de forma difusa cuando previamente se ha producido un cambio de dirección de los rayos y la reflejada por la superficie terrestre (Schallenberg et al., 2008). Este aprovechamiento se puede hacer de las siguientes formas:

✓ Como fuente de calor debido a aplicaciones de baja y media temperatura: Manejo de temperaturas por debajo a 250 °C, lo que se desea es calentar un fluido por medio de los dispositivos llamados captadores térmicos como se puede ver en la **figura 2**.

Figura 2

Captador solar térmico



Nota. Partes de un captador térmico. Tomado de *Energías renovables y eficiencia energética*, Schallenberg et al., 2008, Instituto Tecnológico de Canarias, S.A

✓ Como fuente de electricidad debido a aplicaciones de energía solar fotovoltaica y térmica de alta temperatura: Manejo de temperaturas mayores a 250 °C para la obtención de por ejemplo vapor. Para esta opción de aprovechamiento se necesita dispositivos como las torres centrales, los colectores cilindro-parabólicos y los discos parabólicos que concentren los rayos solares como se ve en la **figura 3** (Schallenberg et al., 2008).

Figura 3

Sistema solar con torre central

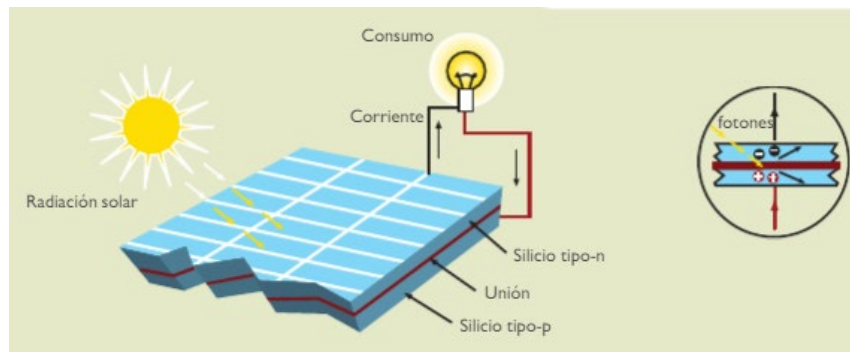


Nota. Tomado de *Energías renovables y eficiencia energética*, Schallenberg et al., 2008, Instituto Tecnológico de Canarias, S.A

Específicamente, la energía solar fotovoltaica se sirve de celdas fotovoltaicas para generar electricidad directamente como se ve en la **figura 4**. Mediante el uso de materiales semiconductores es posible que se genere un flujo de electrones cuando inciden los rayos luminosos, algunos de estos materiales son silicio monocristalino, silicio policristalino o silicio amorfo (Schallenberg et al., 2008).

Figura 4

Celdas fotovoltaicas para generar electricidad



Nota. Tomada de *Energías renovables y eficiencia energética*, Schallenberg et al., 2008, Instituto Tecnológico de Canarias, S.A

b. Energía eólica. La heterogeneidad con la que llega los rayos luminosos a la tierra genera corrientes de aire que poseen energía cinética que se puede transformar en electricidad o energía

mecánica con aerogeneradores o con aeromotores (Schallenberg et al., 2008). Las partes fundamentales de un aerogenerador son: rotor, torre, góndola, multiplicador y generador eléctrico como se ve en la **figura 5**.

Figura 5

Partes de un aerogenerador



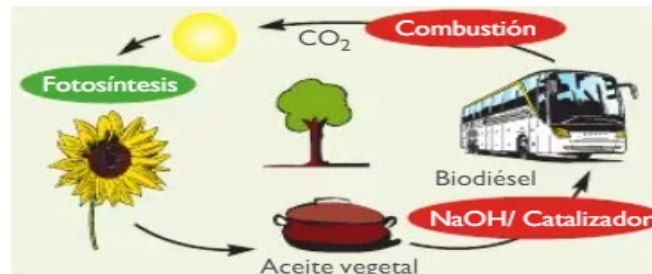
Nota. Tomada de *Energías renovables y eficiencia energética*, Schallenberg et al., 2008, Instituto Tecnológico de Canarias, S.A

El enfoque con estas energías renovables, tanto la solar como la eólica será obtener suficiente energía para producir electricidad que posteriormente será utilizada para la electrólisis de agua y así generar hidrógeno.

c. Biomasa. A partir de la fotosíntesis se origina materia orgánica que almacena la energía en forma química, ver **figura 6**. Existe biomasa natural, biomasa residual y cultivos energéticos. A partir de ésta se obtienen los biocombustibles estableciendo procesos químicos, físicos o biológicos, aprovechando así de esta forma la energía. Estos biocombustibles se pueden encontrar en cualquier estado, bien sea líquido (biodiesel y bioetanol), gaseoso (biogas) o sólido (Schallenberg et al., 2008). Además, en otra visión, la biomasa al ser sometida a otros procesos específicos, los cuales van a ser discutidos más adelante, también puede ser transformada con el fin de obtener hidrógeno.

Figura 6

Energía de la biomasa



Nota. Se representa el ciclo donde la biomasa se convierte en combustible. Tomado de *Energías renovables y eficiencia energética*, Schallenberg et al., 2008, Instituto Tecnológico de Canarias, S.A

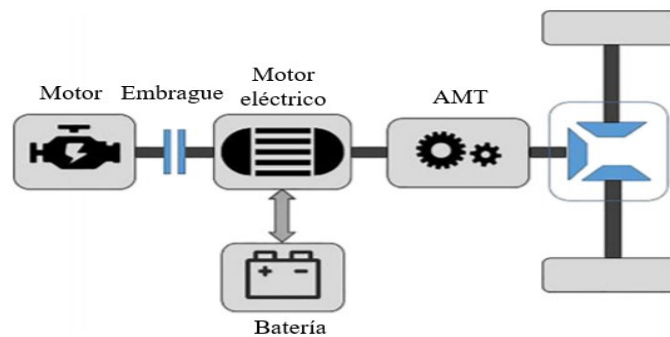
1.3 Alternativas de infraestructura para medios de transporte

Debido al desarrollo tecnológico y a la visión generalizada de impacto ambiental en las últimas décadas se han generado diversas formas alternativas de infraestructura de abastecimiento para medios de transporte que sustituyan en parte o completamente a los motores convencionales. Entre estas técnicas innovadoras se encuentran:

1.3.1 Vehículos híbridos eléctricos. Este mecanismo se sirve tanto de los motores de combustión interna a base gasolina o diesel como de baterías para suplir eléctricamente, de esta forma se implementa ambas técnicas de forma más eficiente como se ve en la **figura 7** (Zhang et al., 2020).

Figura 7

Infraestructura de vehículos híbridos

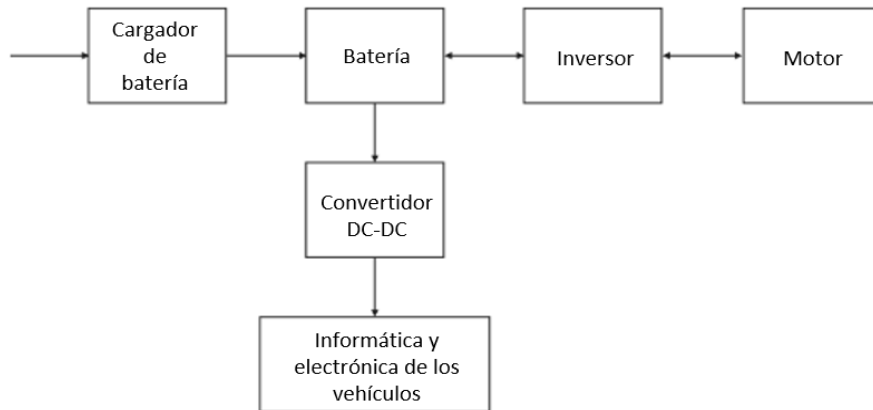


Nota. AMT: transmisión automática. Tomado de *Develop of a fuel consumption model for hybrid vehicles*, Zhang et al., 2020, *Energy Conversion and Management*

1.3.2 Vehículos eléctricos con batería. Se basan únicamente en energía eléctrica. Para un correcto funcionamiento, los componentes principales del diseño son el motor, el controlador eléctrico de potencia, el sistema de almacenamiento de energía, el sistema de carga y el convertidor (Sharma et al., 2020), en la **figura 8** se esquematiza el proceso.

Figura 8

Infraestructura de vehículos eléctricos con batería

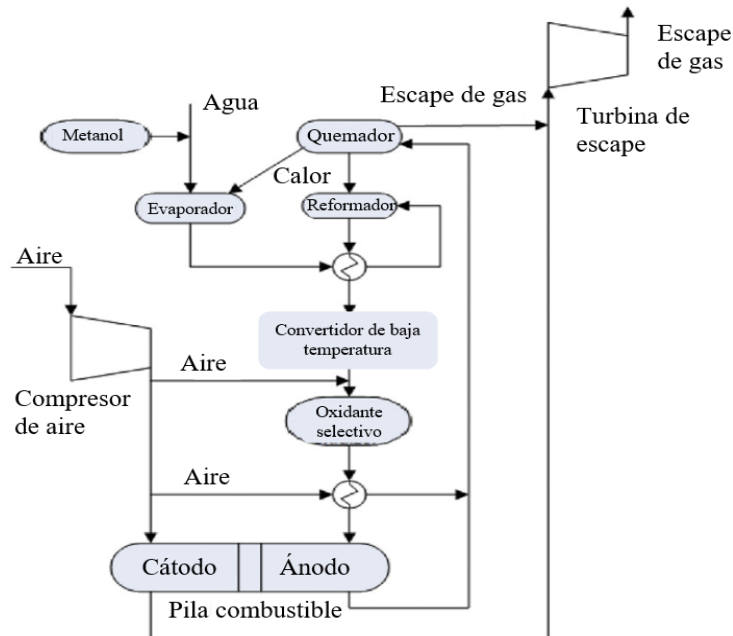


Nota. Tomado de *Storage technologies for electric vehicles*, Sharma et al., 2020, *Traffic and Transportation Engineering*

1.3.3 Vehículos eléctricos con pilas combustibles. Aquellos vehículos que utilizan un combustible como por ejemplo el hidrógeno como fuente de energía, en este caso dentro de los vehículos no se encontraran baterías, en su lugar existirá un sistema de almacenamiento que proveerá este combustible a una pila de combustible que generará electricidad (Shusheng et al., 2020). En la siguiente **figura 9**, se muestra un esquema de un ejemplo de un sistema de pila combustible montado en un vehículo.

Figura 9

Infraestructura de producción para vehículos con pilas combustibles

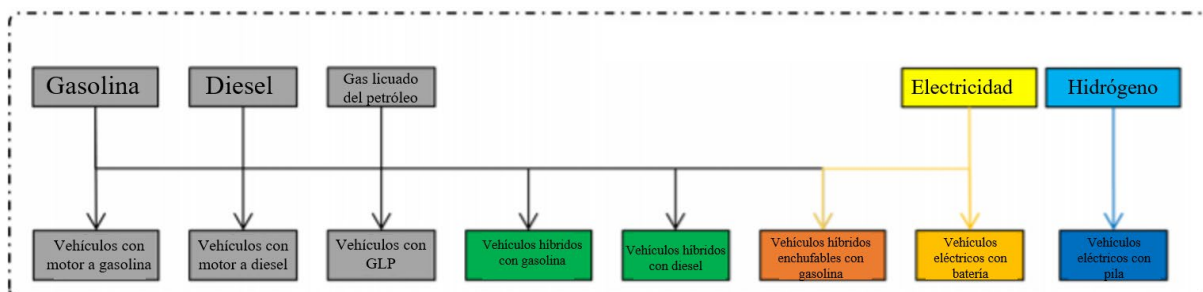


Nota. Ejemplo de pila combustible con metanol como combustible. Tomado de *Research and development of on-board hydrogen-producing fuel cell vehicles*, Shusheng et al., 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*

Como se ve en la **figura 10**, según el tipo de fuente y proceso se puede clasificar la infraestructura de abastecimiento que se dispondría.

Figura 10

Tipos de infraestructura vehicular dependiente de la fuente



Nota. Tomado de *Greenhouse gas emissions of conventional and alternative vehicles: Predictions based on energy policy analysis in South Korea*, Choi et al., 2020, *Applied Energy*

1.4 Generalidades del hidrógeno

El hidrogeno es considerado uno de los elementos más abundantes existentes en la tierra, se caracteriza por tener un núcleo que consiste en un protón y alrededor orbita un electrón, sin embargo, no suele encontrarse aislado, sino formando otras moléculas con diferentes elementos y es por esto que existen numerosos procesos para su obtención. En su forma diatómica es un gas incoloro, inodoro, no es toxico, además es fácilmente inflamable y es utilizado en muchos procesos (Sundén, 2019). Algunas de sus propiedades más relevantes a 25 °C y presión atmosférica de 760 mmHg se encuentran en la **tabla 1**:

Tabla 1

Propiedades químicas, físicas y térmicas del hidrógeno a 25 C y 760 mmHg

Propiedad/Unidad	Valor
Peso molecular (kg/Kmol)	2.013
Volumen específico (m ³ /kg)	12.1
Densidad (kg/m ³)	0.0824
Viscosidad (kg/ms)	9*10 ⁽⁻⁶⁾
Velocidad del sonido en gas(m/s)	1315
Calor específico Cp (J/(kg*K))	14310
Razón de calor específico	1.405
Constante del gas (J/(kg*K))	4126
Conductividad térmica (W/(Km))	0182
Presión de saturación del punto de ebullición 760 mmHg (K, °C)	20.4, -252.6
Calor latente de vaporización al punto de ebullición (J/kg)	447000
Punto de fusión a 760 mm Hg	-259.1
Calor latente de fusión (J/kg)	58000
Temperatura crítica	-240.0
Presión crítica	1.3
Calor de combustión (kJ/kg)	144000

Nota. Tomado de *Hydrogen, batteries and fuel cells*, Sundén, 2019

2. PRODUCCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

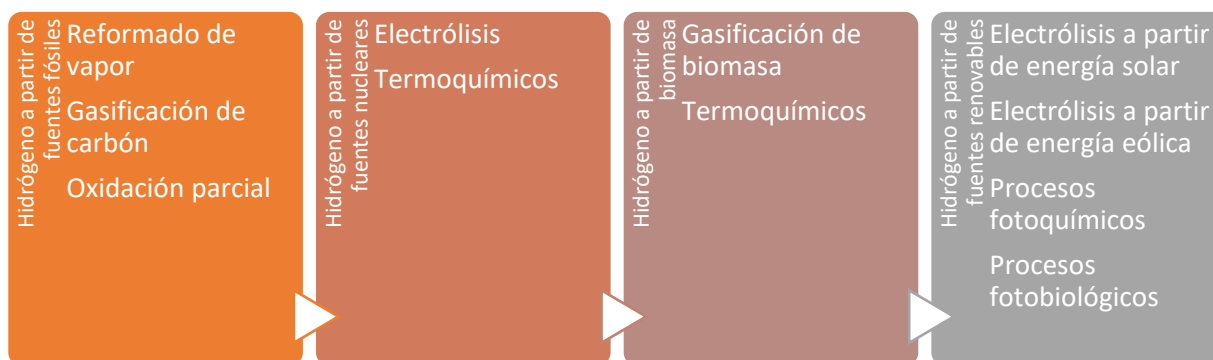
Para este capítulo se abordarán los aspectos teóricos más fundamentales para el procesamiento y el almacenamiento del hidrógeno, mediante la explicación de cada uno de los mecanismos existentes.

2.1 Producción de hidrógeno

El hidrógeno puede ser obtenido a partir de diversas materias primas cuyo origen puede ser de recursos fósiles, bien sea derivados del petróleo, gas o carbón o mediante recursos renovables como el agua o la biomasa. Según sea la materia prima hay diversos procesos para la producción, esto se muestra en la **Figura 11**, que señala entonces el proceso a seguir en función de la fuente (Dagdougui et al., 2018).

Figura 11

Sistemas de producción de hidrógeno según materia prima



Nota. Tomado de *Hydrogen Infrastructure for Energy Applications*, Dagdougui et al., 2018

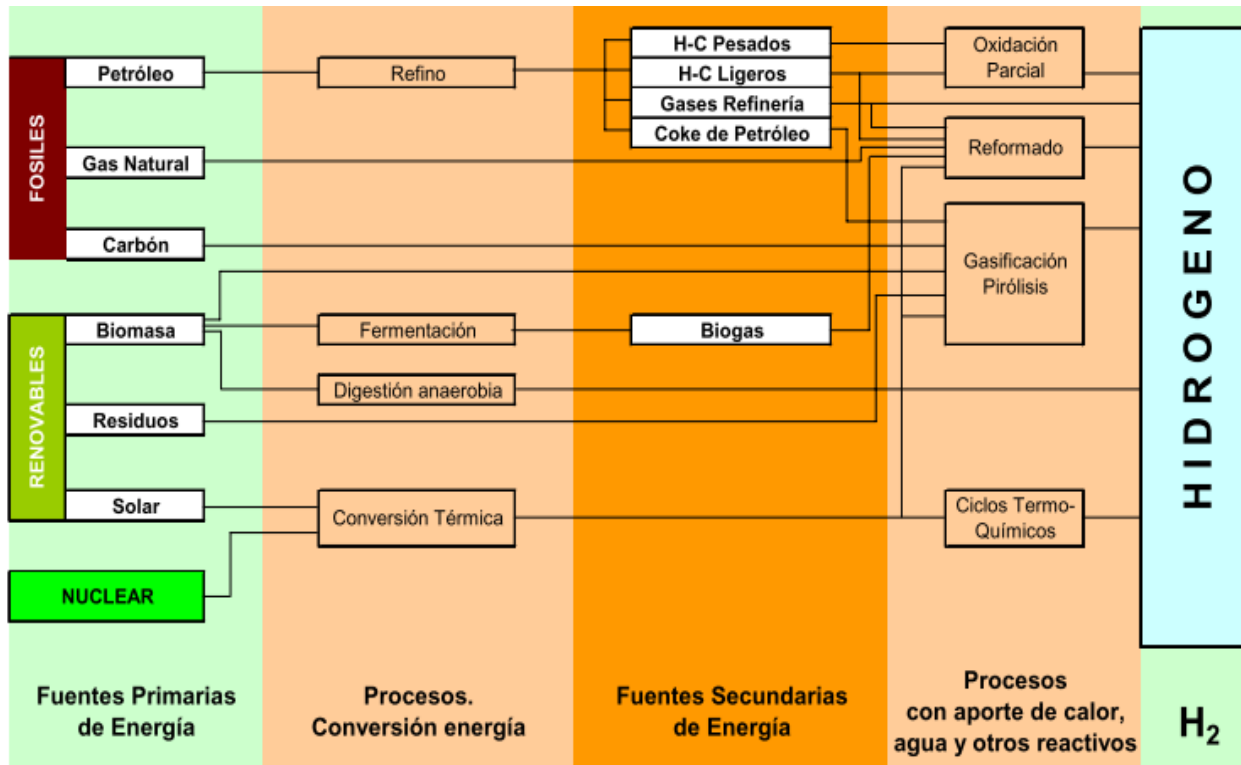
Para que puedan ser llevados a cabo, la mayoría de estos procesos están en la necesidad de aporte de energía. Se puede clasificar las formas de producción de hidrógeno de la siguiente forma (García, 2008):

- ✓ Procesos de conversión química: reformado, gasificación y pirólisis.
- ✓ Procesos termolíticos: termólisis directa y ciclos termoquímicos.
- ✓ Procesos electrolíticos: electrólisis.
- ✓ Procesos biológicos: fermentación, digestión anaerobia
- ✓ Procesos fotónicos: fotoelectrólisis, fotobiólisis y fotocatalisis

En las **figuras 12 y 13** se pueden observar los esquemas de los procesos de producción, en este caso se detalla más a profundidad el proceso desde las fuentes primarias, pasando por la correspondiente conversión energética para obtener la fuente secundaria de energía a la cual se le aplicará ya sea calor o electricidad, según corresponda, para en última instancia producir hidrógeno.

Figura 12

Esquemas de procesos de producción de hidrógeno con aporte de calor

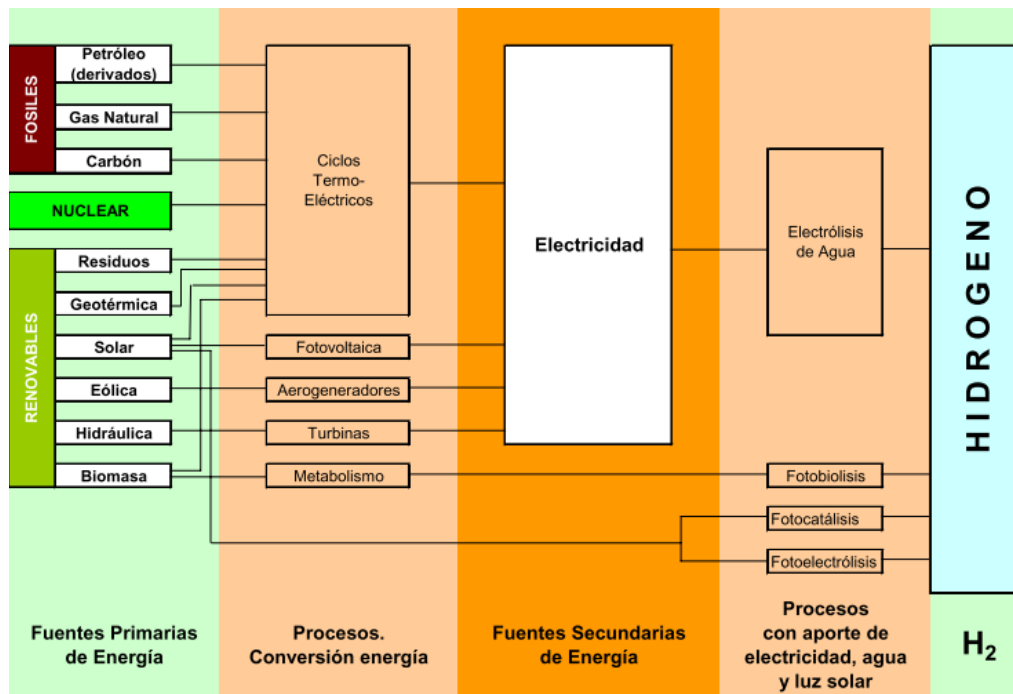


Nota. Se toma en cuenta desde las fuentes primarias de energía, pasando por los procesos de conversión energética, para finalmente obtener las fuentes secundarias, que serán las que se transformen con el aporte de calor para obtener hidrógeno. Tomado de *Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno*, García, 2008, Asociación Española del Hidrógeno

En la anterior figura se muestra que los primeros procesos de conversión (refinación, fermentación, digestión, entre otras) pretenden la obtención de los compuestos llamados fuentes secundarias de energía, a los que posteriormente se les aplicara calor u otros reactivos con el fin de obtener hidrógeno. Para esta segunda figura de los procesos, se identifica claramente que sea el que sea el origen, a partir de recursos fósiles, fuentes nucleares o renovables, los procesos de conversión energética se enfocan en producir electricidad para que esta finalmente sea utilizada en el proceso de electrólisis del agua.

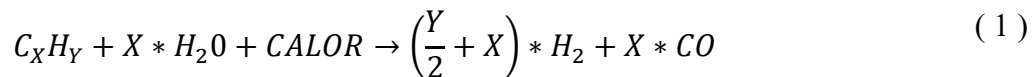
Figura 13

Esquemas de procesos de producción de hidrógeno con aporte de electricidad

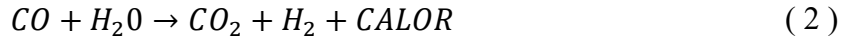


Nota. En este caso para obtener hidrógeno de las fuentes secundarias es necesario el aporte de electricidad. Tomado de *Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno*, García, 2008, *Asociación Española del Hidrógeno*

2.1.1 Reformado con vapor. Es un proceso químico donde los hidrocarburos reaccionan con el vapor de agua para producir hidrógeno y monóxido de carbono (Sundén, 2019). En esta técnica se requiere un previo desulfuramiento de los reactivos implicados para que el catalizador que pueda llegar a ser empleado en la reacción no se vea afectado. En la **ecuación 1** se muestra la reacción indicada:

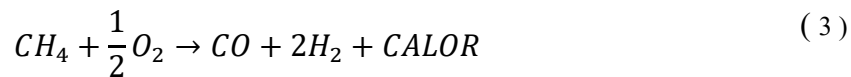


El siguiente paso es poner el monóxido de carbono obtenido en la anterior reacción en contacto otra vez con vapor para así finalmente obtener más hidrógeno y dióxido de carbono como se refleja en la **ecuación 2**.



Las temperaturas en las cuales ocurre esta segunda reacción se encuentran en un rango entre 800 °C y 1100 °C (García, 2008). Globalmente, este tipo de proceso puede lograr eficiencias del 85% en plantas centralizadas, puede ser utilizado un catalizador basado en níquel para mejorar la efectividad de las reacciones y la energía requerida para la producción del hidrógeno es de 63.3 kJ / mol. Desde el tema de costos para esta técnica, los gastos proyectados son de 60,7% por parte de la materia prima y 29,1% de inversión de capital (Nazir, Louis, et al., 2020).

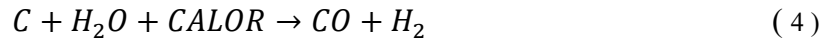
2.1.2 Oxidación parcial. Es un mecanismo similar al anterior, pero en este caso el hidrocarburo reacciona exotérmicamente con oxígeno y se convierte en H₂ y CO. El rango de temperatura depende de si hay un catalizador o no y de si los hidrocarburos son livianos como el metano y nafta o pesados, puede estar entonces entre 950 °C y 1300 °C, además se necesita altas presiones. Al ser una reacción exotérmica, como se denota en la **ecuación 3**, no requiere de entrada de energía. Esta técnica es eficiente para obtener hidrogeno a partir de materia pesada como los residuos de petróleo pesado y el carbón (Nazir, Louis, et al., 2020).



Para la parte de la obtención del oxígeno en la técnica de oxidación parcial es necesario implementar durante la cadena del proceso un separador de aire, en esta parte específicamente el consumo energético aumenta, sin embargo, esto es compensado en la parte de como tal la producción de hidrógeno por el hecho de ser una reacción exotérmica que no consume energía. A pesar de ser una alternativa prometedora, actualmente según algunos estudios se consigue unas menores eficiencias de conversión energética que en el reformado con vapor (Shell, 2017).

2.1.3 Gasificación del carbón. Se utiliza para combustibles sólidos, incluye también un conjunto de reacciones químicas que pueden ser de origen endotérmico o exotérmico. Se produce una oxidación parcial en presencia de un agente oxidante, ya sea oxígeno o vapor de agua. Para que el proceso de conversión se realice de forma correcta se necesitan unas correctas relaciones de O₂/C o de H₂O/C y el manejo de altas temperaturas, aproximadamente 1000 °C (Sundén, 2019).

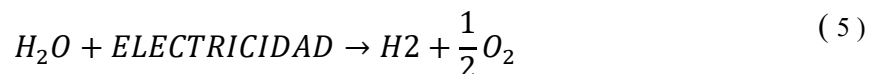
Es importante que exista una etapa inicial donde el carbón sea sometido a los procesos de secado y descomposición térmica sin aire. De acuerdo con la ecuación de **reacción 4**, el carbono calentado y el vapor de agua generan un gas que consta básicamente de CO y H₂ (García, 2008).



Es posible obtener CO₂ y más hidrógeno a partir de añadir otra reacción al proceso al igual que pasa con el reformado de vapor. Este mecanismo si requiere la entrada de calor como se puede ver en la reacción. Así mismo, el proceso en los gasificadores se puede realizar a presión atmosférica o a alta presión, entre ésta sea más elevada se va a conseguir una mejor eficiencia. Resumidamente, las características del hidrógeno obtenido mediante la gasificación se ven afectadas por algunos factores como la posibilidad de capacidad de enfriamiento del reactor, la temperatura y presión de operación y también por el tiempo de residencia del gas en el reactor (Shell, 2017).

2.1.4 Pirólisis de hidrocarburos. Consiste en descomponer térmicamente los hidrocarburos. Con el proceso es posible obtener carbono elemental de hidrocarburos livianos a partir de la descomposición termocatalítica y en cuanto a los hidrocarburos pesados se tiene que hacer un doble proceso, primero una hidrogasificación y posteriormente un craqueo del metano. La energía requerida para la producción de H₂ es de 37.6 kJ/mol. Un punto a favor es que no requiere secuestrar CO₂. Los puntos en contra son que la separación del hidrógeno se puede dificultar debido a la bajas presiones parciales de éste en la reacción comprometida y el posible daño (que se puede generar a altas temperaturas) de la membrana que se utiliza para el equilibrio de descarbonización (Nazir, Louis, et al., 2020).

2.1.5 Electrólisis del agua. Constituye el tipo de proceso más prometedor, consiste en una conversión de energía eléctrica en química mediante reacciones de tipo redox del agua por entrar en contacto con una corriente eléctrica, la **ecuación 5** muestra la reacción que ocurre:

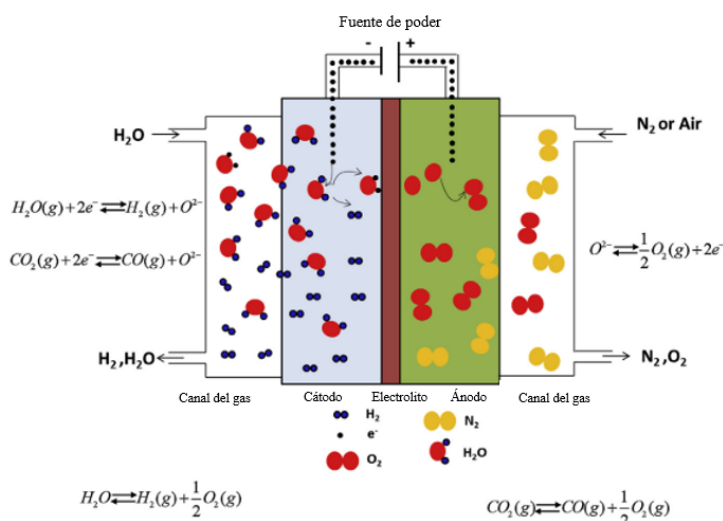


En el sistema se necesita un electrolito disuelto en el agua, que puede ser tanto una base como un ácido, que le dan el potencial conductivo al agua, además se requiere dos electrodos

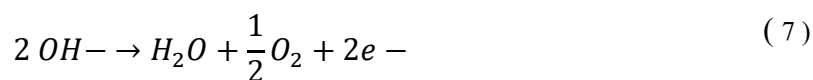
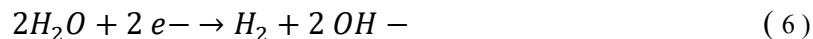
porosos y que estén conectados a una fuente de energía externa, cuando la reacción empieza ocurre migración de cargas, el cátodo se carga negativamente y el ánodo positivamente generando que el agua se oxide (Thomas et al., 2020). Las reacciones que ocurrirán dependerán del origen del electrolito. En el proceso el cátodo perderá electrones y el agua se disociará formando hidrógeno e iones OH-, estos iones posteriormente se oxidarán para formar finalmente agua y oxígeno, esto se muestra en las **reacciones** (6) y (7). El dispositivo donde ocurre el proceso recibe el nombre de electrolizador, actualmente hay electrolizadores que funcionan con membrana polimérica como electrolito, también los hay que utilizan una solución alcalina de hidróxido de sodio o potasio y por último existen algunos que utilizan un material sólido cerámico (Sørensen y Spazzafumo, 2018). En la **figura 14** se esquematiza un electrolizador:

Figura 14

Electrólisis de agua



Nota. Electrolizador con las respectivas ecuaciones que tienen origen en el cátodo y ánodo para la transformación de agua en hidrógeno. Tomado de *Hydrogen, batteries and fuel cells*, Sundén, 2019



La eficiencia de un electrolizador es calculada comparando la cantidad de electricidad necesitada para producir hidrógeno, ésta suele rondar entre el 60-80%, adicionalmente los tipos de electrolizadores se diferencian por los materiales utilizados y las temperaturas de operación (Shell, 2017). En la **tabla 2** se muestra los tipos de electrolizadores. La principal barrera que resulta del proceso de electrólisis es que debido a la estabilidad de la molécula de agua la energía que se requiere para separarla es alta, aproximadamente sobre los 286.45 kJ/mol a 25 °C (García, 2008).

Tabla 2

Tipos de electrolizadores

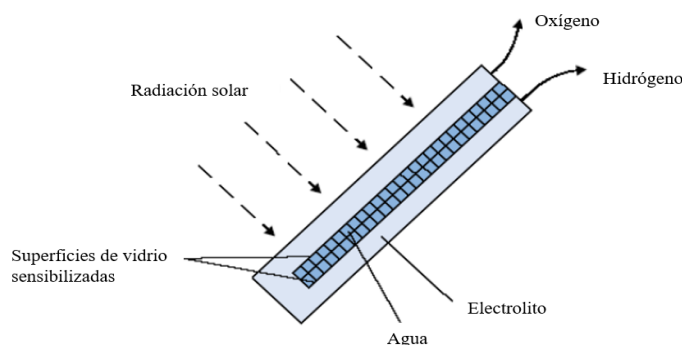
	Temperatura (°C)	Electrolito	Eficiencia (%)	Pureza del hidrógeno (%)	Esperanza de vida (hr)	Nivel de madurez
Electrólisis alcalina	60-80	Hidróxido de potasio	65-82	>99.5	60000-90000	Usado en industria por 100 años
Electrólisis PEM	60-80	Membrana de estado sólido	65-78	>99.9	20000-60000	Usado comercialmente para aplicaciones de <300 kW
Electrólisis AEM	60-80	Membrana polimérica	N/A	99.4	N/A	Comercializado para aplicaciones limitadas
Electrólisis Óxido sólido	700-900	Cerámica de oxido	85%	N/A	1000	Etapa experimental

Nota. Características principales de los diferentes tipos de electrolizadores. Tomado de *Energy of the future?*, Shell, 2017, *Shell Hydrogen Study*

En otra forma, la fotoelectrólisis es un subtipo de electrólisis en el cual se utiliza las celdas foto-electroquímicas para aprovechar la energía solar para generar electricidad que a su vez será utilizada para producir hidrógeno. Implica la división de agua por la carga generada en un electrodo semiconductor al absorber la luz visible (García, 2008). El proceso consiste en que en el momento en el que incide radiación en los materiales semiconductores fotocatalizadores se crean una serie de pares de huecos de electrones, al pasar esto se liberan electrones que se dirigen al cátodo por medio de un circuito externo con el fin de unirse a los H⁺ para la producción de H₂, por otra parte, lo que pasa en el ánodo es que se generan H⁺ y O₂ por la reacción de estos huecos (Nazir, Louis, et al., 2020). Es decir, este proceso incorpora la parte solar y química al mismo tiempo y en un mismo equipo. La eficiencia de conversión solar-hidrógeno conseguida en laboratorio es de 16% (García, 2008). En la **figura 15** se identifica el dispositivo.

Figura 15

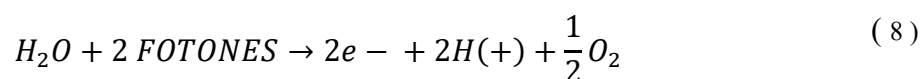
Fotoelectrólisis



Nota. Tomado de *Producción y Almacenaje De Hidrógeno*, Conde y Reyes

2.1.6 División termoquímica del agua y termólisis. La termólisis consta de una reacción de disociación del agua y necesita de una fuente de energía que proporcione una temperatura muy alta, aproximadamente de 2500 K. Adicionalmente, con la división termoquímica también se consigue una disociación del agua en hidrógeno y oxígeno a partir de una serie de ciclos de reacciones, el rango operativo de las reacciones en términos de temperaturas es 600 K-1200 K, como fuente de energía calorífica puede estar la energía nuclear o solar y posee algunas ventajas como que no es indispensable una membrana para separar el hidrógeno del oxígeno y que no se necesita un catalizador (Sundén, 2019).

2.1.7 División fotoelectroquímica del agua. Este proceso consigue la separación del agua por medio de fotones, provenientes ya sea de ondas electromagnéticas, ultravioletas, rayos x o rayos gamma (Sundén, 2019). En las **ecuaciones 8 y 9** se expone las reacciones que tienen origen:



2.1.8 Craqueo termocatalítico. Esta tecnología consiste en un proceso de craqueo mediante catalizadores y calor que se maneja en reacciones cíclicas con metales de tipo redox (Sundén,

2019). Generalmente este proceso ocurre en dos etapas, la primera es la reducción térmica y la segunda la división del agua, las **ecuaciones 10 y 11** expresan el proceso:



En estos casos el metal puede ser Fe, Sn, Zn o Ce. Lo que se refleja en la ecuación (10) es que en la reacción endotérmica el óxido metálico se reduce produciendo oxígeno a una temperatura elevada, posteriormente en la ecuación (11) este óxido metálico reducido ya a una temperatura más baja reacciona exotérmicamente con vapor de agua para producir hidrógeno (Mao et al., 2020). Ver **figura 16**.

Figura 16

Proceso de craqueo termocatalítico



Nota. Proceso cíclico de reducción de metales para producción de hidrógeno. Tomado de *Hydrogen production via a two-step water splitting thermochemical cycle based on metal oxide – A review*, Mao et al., 2020, *Applied Energy*

Algunos factores de la tecnología son primero, que como se puede identificar en las ecuaciones, la producción de hidrógeno y de oxígeno se presenta en dos etapas diferentes, segundo, independientemente del material redox, la temperatura manejada será mayor a 1500 ° C y

finalmente que una opción prometedora para proveer las altas temperaturas requeridas es el uso directo de energía solar.

2.1.9 Procesos a partir de la biomasa. Comprende procesos biológicos y termoquímicos, en estos últimos los más utilizados son la pirolisis y la gasificación de la biomasa (García, 2008).

En específico, en dichos procesos termoquímicos los productos como el CO y otros gases se pueden procesar para obtener más producción de H₂ mediante el reformado con vapor y las reacciones de desplazamiento de agua y gas. Con la pirolisis se maneja temperaturas de 850 K y su eficiencia depende del tipo de materia prima, del catalizador empleado y la temperatura y duración de operación.

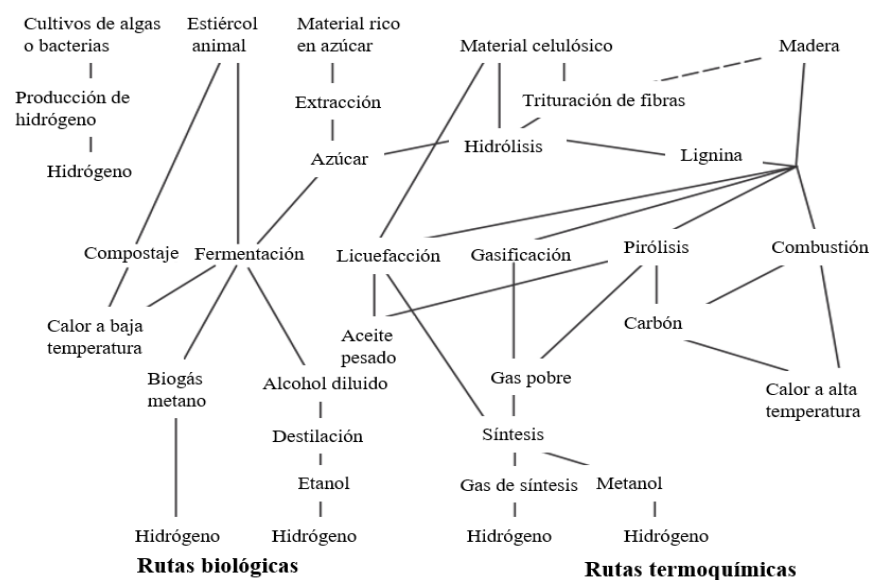
En el método de gasificación de la biomasa, la biomasa se convierte en gas de síntesis a unas temperaturas que pueden oscilar entre 500-1400 °C y normalmente a presiones elevadas para aumentar las eficiencias. En esta técnica, al igual que en el anterior procedimiento el gas que queda dependerá del tipo de biomasa y además de si se utiliza aire u oxígeno. Estos dos mecanismos tienen dos grandes problemas y es la formación de alquitranes y su competencia con los biocombustibles (Nazir, Louis, et al., 2020).

En cuanto a los procesos biológicos para la producción de H₂ a partir de biomasa se encuentra la biofotólisis directa e indirecta con algas verdes o cianobacterias, fotofermentación con bacterias fotosintéticas y fermentación oscura con bacterias heterótrofas, basados en el uso de diferentes microorganismos(García, 2008). El mecanismo de biofotólisis se hace por medio de bacterias o algas utilizando las enzimas hidrogenasa y nitrogenasa y la efectividad dependen del requisito de una gran superficie para recoger suficiente luz.

Por otra parte, la opción de fermentación ocurre porque los carbohidratos se convierten en ácidos orgánicos y luego en gas. La baja eficiencia de conversión de energía solar, la demanda de fotobiorreactores anaeróbicos elaborados que cubran grandes áreas, el gran volumen de biomasa requerido, así como la disponibilidad limitada de ácidos orgánicos, son las barreras clave que restringen estos procesos biológicos y es por esto que aún se manejan a escala de laboratorio(Shell, 2017). En la **figura 17** se muestra la guía de los procesos ya sea bioquímicos o termoquímicos que se hacen dependiendo del material de biomasa que se utiliza como origen.

Figura 17

Procesos de producción a partir de los tipos de biomasa



Nota. Hojas de ruta a partir de diferentes tipos de biomasa y según sean biológicos o termoquímicos los procesos de transformación. Tomado de *Hydrogen and fuel cells*, Sorensen y Spazzafumo, 2018

2.1.10 Hidrógeno a partir de fuente nuclear. La energía nuclear se utilizará bien sea para la electrólisis del agua o para la descomposición termal usando temperaturas elevadas. Debido al incidente en la planta nuclear de Fukushima se han ralentizado sus avances y aplicaciones. Como tal, la energía nuclear se genera en reactores de fusión que utilizan uranio o torio, esto genera una radiación nuclear que se convierte en calor o electricidad y se transfiere a un fluido. Principalmente existen cinco mecanismos de producción de hidrógeno a partir de energía nuclear utilizando agua (Dincer y Zamfirescu, 2016):

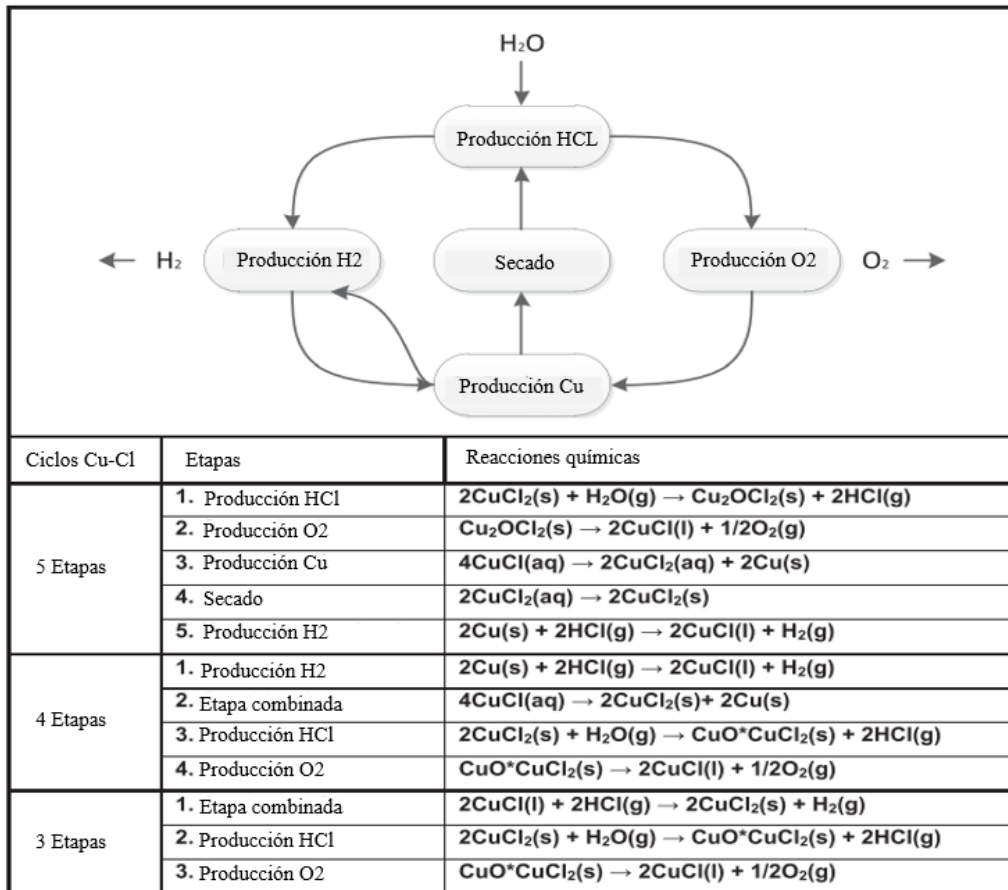
1. Radiólisis: con la radiación nuclear o mediante energía cinética se excitan las moléculas de agua y así se obtiene por separado el oxígeno y el hidrógeno.
2. Electrólisis: utiliza la electricidad obtenida mediante energía nuclear.
3. Electrólisis de vapor a alta temperatura: utiliza tanto calor como electricidad.
4. División de agua termoquímica híbrida: utiliza tanto calor como electricidad.
5. División termoquímica del agua: involucra calor a alta temperatura.

Concretamente, la producción de hidrógeno a base nuclear se basa en tres subsistemas que son el procesamiento del combustible en este caso uranio, la planta nuclear donde se genera bien

sea el calor o electricidad y la planta de hidrógeno. Para esta última planta, otras opciones serían realizar ciclos termoquímicos, entre ellos está el de Cu-Cl que implican una serie de reacciones químicas, en la **figura 18** se esquematiza estos ciclos dependiendo el número de etapas (Ozbilen et al., 2013).

Figura 18

Ciclos termoquímicos de Cu-Cl

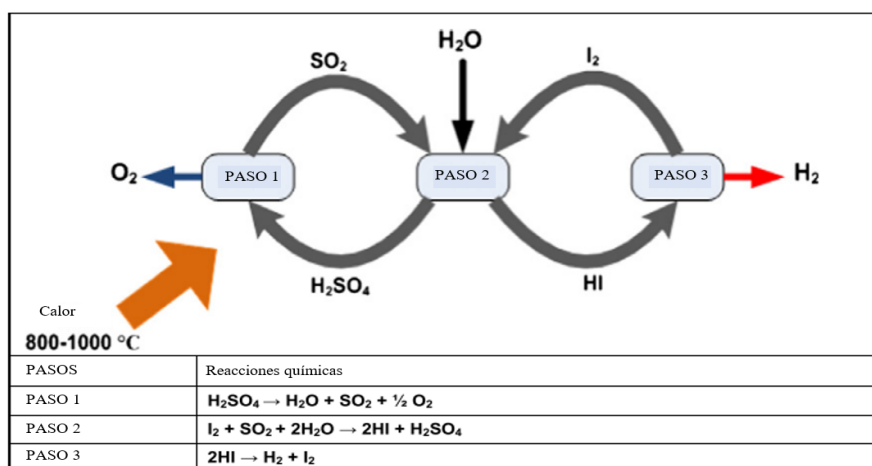


Nota. Se muestran las reacciones que tienen lugar en el ciclo Cu-Cl dependiendo el número de etapas. Tomado de *Comparative environmental impact and efficiency assessment of selected hydrogen production methods*, Ozbilen et al., 2013, *Environmental Impact Assessment Review*

Otro ciclo termoquímico es el de S-I que se muestra en la **figura 19**, los valores de impacto ambiental por 1 kg H₂ producido para esta técnica son 0.412 kg CO₂-eq y 2.41 g SO₂-eq y los requisitos de energía térmica neta del ciclo S – I es 492,9 kJ / mol H₂ (Ozbilen et al., 2013).

Figura 19

Ciclo termoquímico de S-I



Nota. Tomado de *Comparative environmental impact and efficiency assessment of selected hydrogen production methods*, Ozbilen et al., 2013, *Environmental Impact Assessment Review*

2.1.11 Esquematización de algunos procesos desde fuentes sostenibles. En la **tabla 3** se presentan los esquemas de unas posibles configuraciones de algunos de los procesos de producción hablados con anterioridad. El enfoque de los procesos que se abordan en esta tabla es que se centran en tomar alguna fuente renovable para la generación de ya sea calor o electricidad, en esta generación intervienen diversos procesos dependiendo del tipo de entrada de energía sostenible. El objetivo final es tomar esta energía y producir hidrógeno a partir de electrólisis de agua, electrólisis a alta temperatura, procesos cíclicos termoquímicos y mecanismos híbridos (Dincer y Zamfirescu, 2016). En la tabla además se hace énfasis en la descripción de los posibles procesos.

Tabla 3

Configuraciones de procesos de producción desde fuentes sostenibles

Configuración del sistema	Entrada de energía	Descripción
	Eólica	Turbinas eólicas / granjas + PEME/AE
	Hidráulica	Turbinas de agua + AE
	Solar	PV +PEME
	Solar	Ciclos Rankine solares +AE/PEME
	Nuclear	Rankine-vapor nuclear +AE
	Calor de desechos	Rankine avanzado +PEME/AE
	Geotérmica	Rankine Geotérmico + intercambiadores de calor +AE
	Solar	Ciclos Rankine solares + intercambiadores de calor + AE o SOEP
	Nuclear	Reactores nucleares Gen III-III + intercambiadores de calor + AE o reactores nucleares Gen IV+ SOEP/SOEO
	Solar	Calor solar concentrado y ciclos termoquímicos a alta temperatura (Ciclo Cu-Cl)
	Nuclear	Reactores nucleares Gen. IV SCWR acoplados a ciclos termoquímicos S-I
	Solar	Solar a través de concentradores de torre para correr plantas de energía + ciclos termoquímicos híbridos (Ciclo de Cu-Cl)
	Nuclear	Ciclos termoquímicos híbridos acoplados Gen. IV SCWR

Nota. PEME: electrolizador de membrana de intercambio de protones; AE: electrolizador alcalino; PV: fotovoltaica; SOEP: celda de electrolisis de óxido sólido de temperatura intermedia con conducción de protones; SOEO: celdas de electrolisis de óxido sólido de alta temperatura con conducción de iones de oxígeno; TC: ciclo termoquímico. Tomado de *Sustainable Hydrogen Production*, Dincer y Zamfirescu, 2016, *Sustainable Hydrogen Production*

Como se puede denotar en la tabla, las diferentes configuraciones de los esquemas están estrechamente vinculadas a la escala de generación de hidrógeno requerida. Para los procesos de ciclos termoquímicos de alta temperatura (más de 850 °C, que puede ser entregada mediante los procesos de radiación solar concentrada y los reactores nucleares), en la parte nuclear se destaca el ciclo de azufre-yodo (S-I) y en los mecanismos híbridos se muestra el ciclo de Cu-Cl, que requiere de entrada tanto de calor como de electricidad.

Otros procesos nuevos con sus debidas configuraciones se muestran en la **tabla 4**, donde se siguen diferentes caminos de conversión interesantes de observar que pueden incluir tanto otras fuentes de energía como la biomasa o mix entre dos fuentes, como también otros pasos particulares

a lo largo de la producción de hidrógeno. Por ejemplo, la biomasa se puede transformar mediante métodos termoquímicos o biológicos como la digestión anaeróbica o aeróbica, pero también se puede utilizar energía solar junto con algunas algas y bacterias como complemento para llevar a cabo procesos fotobiológicos (Dincer y Zamfirescu, 2016).

Tabla 4

Configuraciones de procesos de producción desde fuentes sostenibles II

Configuración del sistema	Entrada de energía	Descripción
	Biomasa	-Conversión termoquímica por gasificación - Fermentación aeróbica - Digestión anaerobia
	Solar + Biomasa	-Procesos fotobiológicos
	Solar	-Termoquímicos $H_2S \rightarrow H_2 + S$
	Electricidad sostenible	-Electrolítico descomposición H_2S -Plasma descomposición de H_2S
	Solar	-Conversión termoquímica de plásticos
	Biomasa	-Conversión termoquímica de biomasa -Biodigestión de residuos sólidos municipales -Generación de gas vertedero -Tratamiento bacteriano de aguas residuales para generar hidrógeno
	Electricidad sostenible	-Electrólisis de aguas residuales
	Combustibles fósiles	-Gasificación de carbón con captura de CO_2 -Reformado de hidrocarburos con captura de CO_2
	Nuclear	-Gasificación de carbón con captura de CO_2 -Craqueo de hidrocarburos por nuclear
	Solar	-Craqueo de hidrocarburos por solar
	Electricidad sostenible	-Craqueo de hidrocarburos/plasma

Nota. Tomado de *Sustainable Hydrogen Production*, Dincer y Zamfirescu, 2016, *Sustainable Hydrogen Production*

Adicionalmente, como se refleja también en la tabla, el sulfuro de hidrógeno constituye también otra fuente de estudio debido a que es un compuesto que se encuentra naturalmente y que se convierte a través del craqueo y electrólisis. En otros aspectos, la gasificación del carbón y el reformado de hidrocarburos se puede hacer con calor de origen nuclear, aunque estos procesos

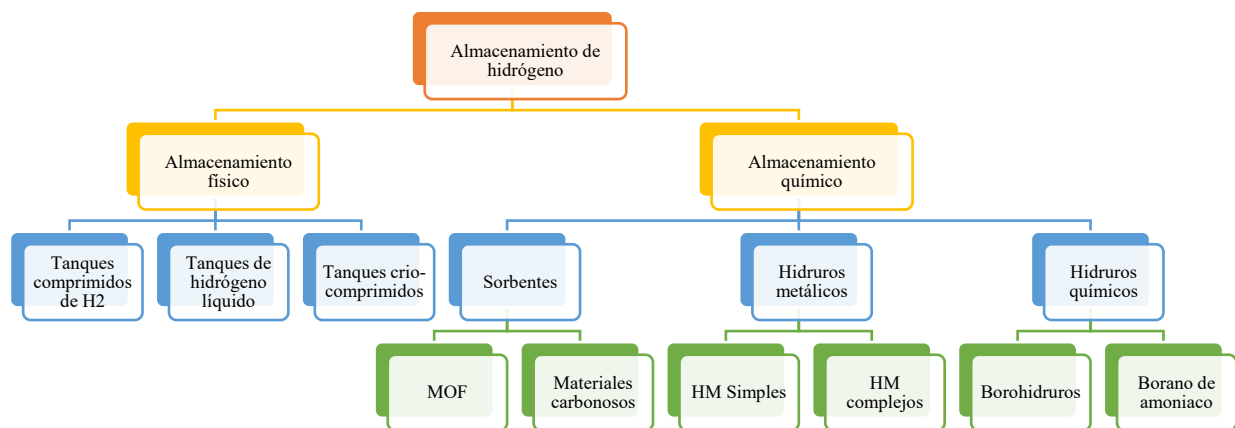
tienen que ser llevados de forma cuidadosa por la producción de dióxido de carbono. Por otra parte, en las configuraciones mostradas también se señala que se puede obtener hidrógeno a partir de plásticos con métodos termoquímicos y que se están analizando técnicas que incluso extraen hidrógeno con métodos microbianos y electroquímicos a partir de agua residual (Dincer y Zamfirescu, 2016).

2.2 Almacenamiento de hidrógeno

Una vez producido el hidrógeno mediante el mecanismo seleccionado, se necesita pensar en el sistema de almacenamiento de hidrógeno, en la **figura 20** se muestra una clasificación general de éstos:

Figura 20

Sistemas de almacenamiento de hidrógeno



Nota. MOF: Absorbentes de gran superficie a base de estructuras organometálicas; HM: hidruros metálicos. Tomado de *Hydrogen Storage Methods for Fuel Cell Vehicles: Current Status*, Hwang y Varma, 2015, *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*

Para los automóviles se busca tener unas características de almacenamiento de 5Kg de hidrógeno, una densidad de hidrógeno entre 5-6% en peso y una temperatura de operación para liberar el hidrógeno que este entre 80 °C a 150 °C (García, 2008).

2.2.1 Gas comprimido. Corresponde al mecanismo de almacenamiento de mayor incorporación, consiste en almacenar el hidrógeno a altas presiones, aproximadamente entre 350-700 bar. Pese a este hecho de que se maneja presiones muy elevadas, el dispositivo puede llegar a ocupar hasta tres veces el volumen que tendría en cambio el mecanismo de un tanque para gasolina.

En este tipo de almacenamiento está implicado un procedimiento difícil, y es que el hidrógeno es complicado para ser comprimido por sus propiedades. El proceso de compresión gasta entre un 12-16% de la energía química contenida en el hidrógeno (Sundén, 2019).

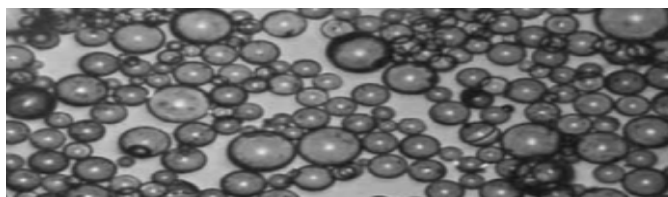
Así mismo, el material y el diseño del tanque y de las válvulas son unas consideraciones importantes y según sea la elección de esto los tanques se pueden clasificar en cuatro tipos (tipo I, II, III, IV), los más optados son los tipo IV de fibra de carbono que son fabricados a partir de poliacrilonitrilo. Sin embargo, para que prosperen estos sistemas de almacenamiento deberían cumplir requerimientos como ser caracterizados por tener un bajo peso, ser de bajo costo y controlar las presiones para que sean seguros, adicionalmente deben tener una alta conductividad térmica para manejar el calor de forma exotérmica en el momento de llenado del tanque (Hwang y Varma, 2015).

Por otra parte, para una autosuficiencia de 300 millas, con una eficiencia de pila del 50%, sería necesario contener 5.6 kg de hidrógeno, esto constituye otro requisito importante a considerar para éste y cualquier tipo de almacenamiento. Particularmente, la capacidad de estos tanques es de 18 y 25 g/L para 350 y 700 bar (Hwang y Varma, 2015). En cuanto a las mayores desventajas de este método son el costo de la fibra y de la instalación, la capacidad y la aceptación pública.

De la misma forma, existe otro mecanismo de almacenamiento a alta presión, que es la utilización de microesferas de vidrio, ver **figura 21**, donde las presiones y temperatura de operación son de 350-700 bar y 300 °C al recargar las esferas. Sus desventajas son que presenta una baja densidad volumétrica y de la misma forma que en el almacenamiento comprimido, sigue existiendo el problema del manejo de altas presiones, sin embargo, se reduce el peligro de su uso a bordo (García, 2008).

Figura 21

Microesferas capilares



Nota. Tomado de Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno, García, 2008, Asociación Española del Hidrógeno

2.2.2 Almacenamiento criogénico. Consiste en licuar el hidrógeno, todo con el objeto de aumentar la densidad volumétrica del hidrógeno, ésta podría aumentar hasta 40 g/L en unas condiciones de 700 bar y 300 K y hasta 70 g/L a condiciones de 1 atm a 300 K (Hwang y Varma, 2015). Para este mecanismo se requiere tener un especial cuidado con el manejo de la presión y la temperatura, si se almacena a 1 atm la temperatura debe mantenerse por debajo de 20K, por eso los dispositivos deben proporcionar un aislamiento térmico. Es por esto que, los tanques que se implementaron inicialmente fueron de doble pared metálica, la pared interna consta de capas metálicas para aislar y entre las dos paredes principales se genera un vacío; con el paso del tiempo a esta estructura se le añade válvulas por motivos de seguridad (Sundén, 2019).

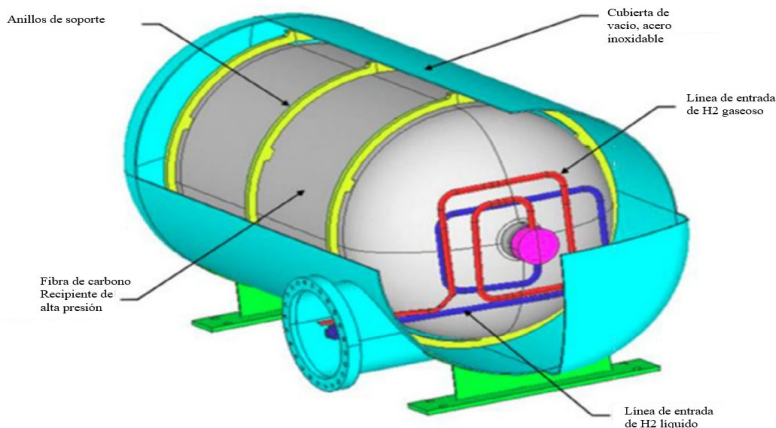
Específicamente, esta técnica consta de algunos problemas y el primero de ellos es el problema de la evaporación del hidrógeno. Además, frente a la posibilidad de producirse ebullición, aumentaría la presión y puede resultar en condiciones peligrosas en espacios confinados. Otro punto importante es el gasto energético necesitado al licuar el hidrógeno, que está alrededor del 35% de la energía química contenida en él. Una ventaja a comparación del sistema comprimido es que el tanque es más liviano. Actualmente este mecanismo ha sido utilizado tanto para aplicaciones que necesitan altas purezas de hidrógeno, como para medios de transporte espaciales (Shell, 2017).

2.2.3 Almacenamiento crio-comprimido. El almacenamiento crio-comprimido como su nombre lo indica reúne las dos técnicas anteriores. Se debe entonces encontrar en ciertas condiciones de presión y temperatura para que se puedan combinar las dos técnicas. La capacidad de almacenamiento podría aumentar de 30 a 74 kg/m³ si se somete primero a alta presión (350 bar) y luego se baja la temperatura a 77 K, y con esto además se conseguiría disminuir el uso de fibra de carbono en el tanque, que está conectado con la disminución a su vez de los costos, además las pérdidas por evaporación también bajan (Hwang y Varma, 2015).

Estos tanques están diseñados con una parte interna hecha de metal con fibra de carbono recubriendo, posteriormente el espacio vacío y una cubierta metálica, en la **figura 22** se muestra. La autosuficiencia para este sistema podría llegar a 660 millas, proporcionando un 5.8% en peso y 43 g de H₂ por litro de capacidad (Hwang y Varma, 2015).

Figura 22

Almacenamiento crio-comprimido

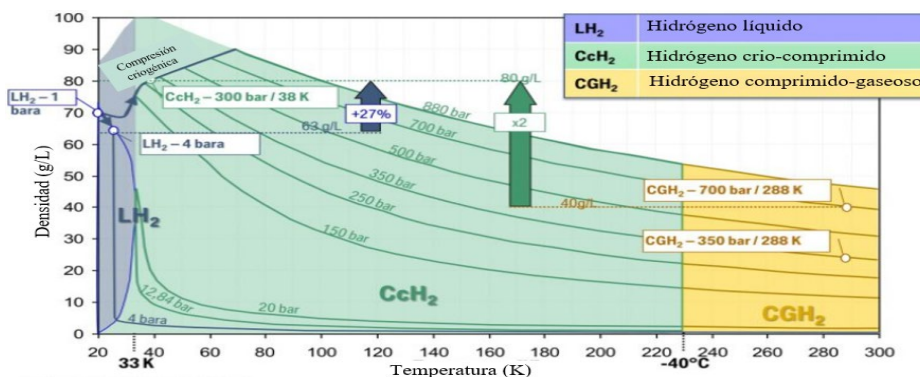


Nota. Partes y materiales de un tanque crio-comprimido. Tomado de “*Hydrogen Storage Methods for Fuel Cell Vehicles: Current Status*”, Hwang y Varma, 2015, *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*

2.2.4 Diagrama temperatura-densidad-presión para los sistemas de almacenamiento común. En la **figura 23** pueden verse las regiones correspondientes a las tres formas de almacenamiento físico del hidrógeno, esto es comprimido, criocomprimido y líquido, así como la variación de su densidad para distintas presiones y temperaturas (Santiago, 2017).

Figura 23

Diagrama densidad-presión-temperatura



Nota. Existe una pequeña región donde el hidrógeno puede estar en estado líquido. Tomado de *Almacenamiento de hidrógeno comprimido: tipos de tanques*, Santiago, 2017, <http://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/>

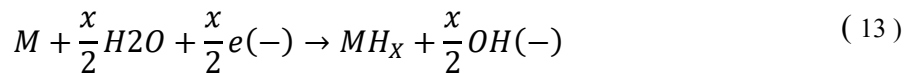
2.2.5 Absorbentes de gran superficie y materiales a base de carbono. Consiste en la adsorción y desorción de H₂ en materiales dependiendo de la temperatura, así pudiéndolo almacenar. La cantidad almacenada depende de factores como el área superficial, el tamaño del poro y la entalpía de adsorción de dichos materiales. Algunos de los materiales más prometedores para la fisisorción son los que tiene buenas áreas superficies y son porosos como el carbón activado, el grafeno, los nanotubos de carbón, las buckybolos C₆₀, las zeolitas y las estructuras organometálicas. En primera instancia, los materiales con estructuras metalorgánicas, que son sólidos cristalinos conformados por iones metálicos, son buena opción, su almacenamiento de hidrógeno es de 7.5% en peso en material en un rango de presión de 25 a 80 bar (Hwang y Varma, 2015). Por su parte las zeolitas son aluminosilicatos porosos cristalinos, conformados por una estructura principal de tetraedros TO₄, siendo T bien sea el catión Si⁴⁺ o Al³⁺ (Nazir, Muthuswamy, et al., 2020).

Tomando en cuenta otro material, el grafeno es una monocapa que contiene átomos de carbono unidos covalentemente con hibridación sp² con un espesor sobre los 0,34 nm, generando de esta forma una estructura que ofrece numerosas ventajas (Nazir, Muthuswamy, et al., 2020). Adicionalmente, otros materiales como el carbón activado (se obtiene a partir de biomasa y consta de alta área y poros submicroscópicos) y los nanotubos de carbono tienen buena estabilidad térmica, sin embargo, en éste último un buen mecanismo de adsorción del hidrógeno solo ocurre a temperaturas bajas de casi -196 °C (García, 2008); estos materiales adsorben entre 3,2% y 8% en peso de hidrógeno a 298 K y 187 atm y 77 K y 39 atm, respectivamente. El tamaño de poro más indicado en materiales a base carbono es de 0,6 a 0,8 nm. Es importante también, saber que la entalpía de adsorción de H₂ es cercana a 15 kJ/mol y esta se puede disminuir a través de implementar elementos livianos, como boro, litio y flúor. Finalmente, otra opción sería la alternativa de materiales a base de Berilio con características de 9,1% en peso de almacenamiento de hidrógeno a 77 K y 95 bar (Hwang y Varma, 2015).

2.2.6 Almacenamiento químico. A causa de las altas presiones de algunas de las técnicas anteriores, entre algunos otros factores, es que se desarrollan sistemas en los cuales existe un almacenamiento netamente químico mediante reacciones químicas; algunas de las sustancias que se utilizan son el amonio, los hidruros metálicos, los carbohidratos, hidrocarburos sintéticos y el hidrógeno líquido orgánico, entre otras.

✓ **Amonio (NH₃):** Debido a cuestiones infraestructurales, es uno de los más atractivos, éste debe ser almacenado en un tanque presurizado porque tiene una presión de vapor de 9.2 bar a temperatura ambiente. Los aspectos positivos son que la proporción de hidrógeno que contiene es alta, además que se puede mezclar con combustibles, puede ser quemado eficientemente y no genera emisiones de CO₂. Algunos aspectos negativos es que es un gas tóxico y una alta cantidad de energía es requerida para la liberación del H₂ (Sundén, 2019).

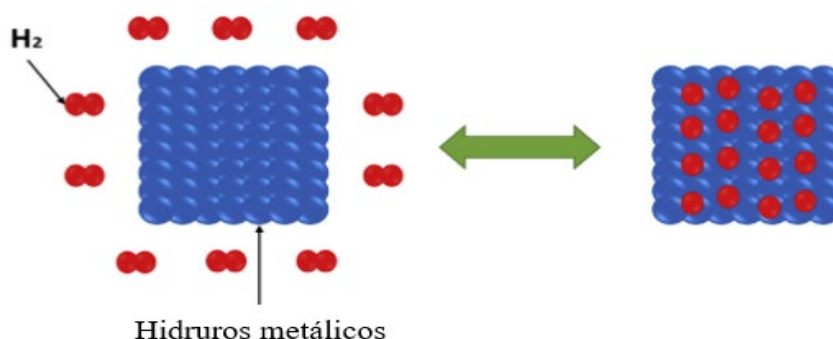
✓ **Los hidruros metálicos.** En este mecanismo, el hidrógeno se introduce en una red metálica, este proceso ha sido observado por su alta capacidad de almacenamiento. Para liberar el hidrógeno se necesita operar en un rango de temperaturas de 120°C a 200°C y esto puede llegar a ser en algunos casos un inconveniente. Las dos formas de incorporar el hidrógeno son la quimisorción y la división electroquímica del agua (Sundén, 2019). Las **ecuaciones 12 y 13** muestran las reacciones y la **figura 24** representa esquemáticamente el proceso.



Uno de estos hidruros metálicos puede ser el LaNi₅H₆ que maneja temperaturas y presiones acordes al funcionamiento de una pila combustibles, sin embargo, consta de baja capacidad y alto costo. Existen hidruros metálicos convencionales y complejos, estos últimos ofrecen la oportunidad de mejorar la capacidad gravimétrica, pese a esto, aún siguen teniendo unas capacidades de hidrógeno relativamente bajas y una cinética de absorción y entrega de hidrógeno lenta (Hwang y Varma, 2015).

Figura 24

Hidruros metálicos



Nota. Incorporación del hidrógeno en la red metálica. Tomado de *Hydrogen, batteries and fuel cells*, Sundén, 2019

Los metales sobre los que más ha recaído interés son el litio, el magnesio, el sodio, el berilio, el boro y el aluminio (Conde y Hernández, s/f). En particular, los compuestos LiBH_4 , MgH_2 y Mg_2NiH_4 son candidatos prometedores como portadores de H_2 debido a su densidad de hidrógeno relativamente alta (Sundén, 2019a). En resumen, dos de los problemas a solucionar son la lenta cinética del proceso y el requerimiento de **un indicado manejo del calor y de las temperaturas**. Algunas de las capacidades de algunos hidruros metálicos están en la **tabla 5**:

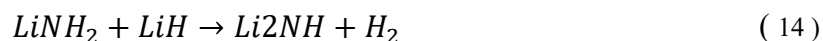
Tabla 5

Capacidades gravimétricas de hidruros

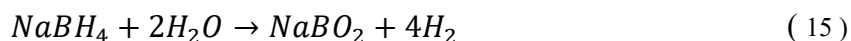
Hidruro	Compuesto	Contenido gravimétrico H_2 (wt%)
Hidruros metálicos	LiH	12.6
	NaH	4.2
	CaH_2	4.8
	MgH_2	7.6
Hidruros metálicos complejos	LiAlH_4	10.6
	NaAlH_4	7.4
	$\text{Mg}(\text{AlH}_4)_2$	9.3
	LaNi_5H_6	1.4
Hidruros químicos	LiBH_4	18.4
	NaBH_4	10.6
	NH_3BH_3	19.8

Nota. Tomado de “*Hydrogen Storage Methods for Fuel Cell Vehicles: Current Status*”, Hwang y Varma, 2015, *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*

Por otra parte, las amidas, como la amida de litio tienen alta capacidad de almacenamiento y su deshidrogenación ocurre mediante la **ecuación 14**:



✓**Hidruros químicos.** El porcentaje en peso de hidrógeno en compuestos que contienen hidrógeno y que son no metales se considera bueno, es entre el 6% y el 8%. Sin embargo, no es posible una regeneración de los materiales al no ser reacciones reversibles y hay que llevar un control debido del calor. Estos materiales se caracterizan por bajos puntos de solidificación y de ebullición. Un ejemplo es el borohidruro de sodio que tiene 10.8 wt%, esta capacidad es mejorada si se utiliza vapor (Sundén, 2019). Ver la **ecuación 15**.



De la misma forma, existen los compuestos de boro-hidrógeno que tienen un alto contenido de hidrógeno. El borano de amoníaco NH_3BH_3 tiene alta capacidad como material, que ronda en el 19,6% en peso de H_2 . La siguiente **ecuación 16** describe el proceso de hidrólisis a partir de NH_3BH_3 (Hwang y Varma, 2015):



Apoyando a estas reacciones químicas se pueden establecer algunos catalizadores cuyo objetivo es la mejora en la cinética.

✓**Líquidos orgánicos.** Se podría obtener entre el 5-8% en peso de H_2 , las sustancias principales son los compuestos orgánicos insaturados, entre ellos están los cicloalcanos y el ácido fórmico. Un punto del mecanismo de deshidrogenación de los cicloalcanos es que el proceso es de carácter endotérmico. Con respecto a el ácido fórmico, se presentan las ventajas de que no se produce monóxido de carbono en la reacción y que este compuesto además podría almacenar el 4.3% en peso de H_2 a temperatura y presión ambiente. Sin embargo, el hecho de que este tipo de compuestos sean tóxicos supone una barrera. Además de tomar en cuenta la toxicidad, se quieren desarrollar sistemas que sean benignos para el medio ambiente, rentables, fáciles de transportar, entre otras cualidades, y al parecer el etilenglicol que tiene un almacenamiento de 6,5% en peso de

H2 puede aportar todos estos estándares para un futuro en la industria del transporte (Nazir, Muthuswamy, et al., 2020).

✓ **Carbohidratos.** Poseen alta densidad de hidrógeno (14 wt%), se pueden almacenar tanto en estado sólido como líquido y poseen baja reactividad (Sundén, 2019).

2.2.7 Características generales de todos los sistemas de almacenamiento. En la **tabla 6**, se va a presentar un compendio de características para los diversos sistemas de almacenamiento, tales como las capacidades gravimétricas y volumétricas, el volumen del sistema de almacenamiento, el peso del sistema de almacenamiento, la cantidad de hidrógeno, la temperatura del almacenamiento al final del llenado y el costo del sistema de almacenamiento.

Tabla 6

Características generales de los sistemas de almacenamiento

Sistema de almacenamiento de hidrógeno	Gravimétrico wt%	Volumétrico g/L	Volumen del sistema de almacenamiento (L)	Peso del sistema de almacenamiento (Kg)	Total de hidrógeno (Kg)	Temperatura (K)	Costo (\$/kWh)
Comprimido a 700 bar	4.6	24.6	219	117	5.8	290-360	17
Comprimido a 350 bar	5.5	18.5	326	139	6	290-360	13
Cold Gas a 500 bar	3.8	27.1	207	149	5.9	193	18.4
Crio-comprimido	5.8	43.1	-	-	-	-	12
CcH2-275 bar	5.5	41.8	134	101	5.7	30	11.9
Hidruro metálico	1.2	12.3	-	-	-	-	TBD
AX-21 Carbono 200 bar	4	24.6	-	-	-	-	TBD
MOF-5, 100 bar, MATI	3.4	21.5	-	-	-	-	16
MOF-5, 100 bar, HexCell	3.7	18.5	-	-	-	-	13
MOF 177-250 bar	4.8	33.9	165	116	5.9	100	16
Hidruro químico (NH3BH3-50 wt%)	5.2	40	-	-	-	-	16

Nota. MOF: Absorbentes de gran superficie a base de estructuras organometálicas. Tomado de “*Hydrogen Storage Methods for Fuel Cell Vehicles: Current Status*”, Hwang y Varma, 2015, *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*

3. TECNOLOGÍAS EN PILAS COMBUSTIBLES

Una vez revisadas las generalidades del mecanismo de funcionamiento de las pilas combustibles que fue mencionado en la introducción y con la incorporación de las bases teóricas de los procesos productivos y de almacenamiento de hidrógeno, el siguiente paso es desarrollar el conocimiento con respecto a las diferentes tecnologías en pilas combustibles a profundidad, por ende, este capítulo tendrá como objetivo esta temática.

3.1 Tipologías generales de pilas combustibles

Se han desarrollado numerosos tipos de pilas y cada una presenta una serie de ventajas y desventajas. En la siguiente tabla se presenta una serie de datos introductorios que se desarrollarán más a detalle en las siguientes páginas. En la **tabla 7** se muestran los tipos de iones, los rangos de temperaturas, algunas características como materiales, tipos de electrolitos y eficiencias.

Tabla 7

Propiedades de los sistemas de pilas combustibles

Tipo de pila	Rango de Temperatura (C)	Electrolito	Rendimiento eléctrico	Combustible	Oxidante	Eficiencia (%)	Costos de inversión (USD/kW)	Expectativa de vida(hr)	Aplicación
AFC	60-90	Hidróxido de potasio	>250 kW	H2	O2(puro)	50-60%	200-700	5000-8000	Transporte espacial, submarinos
PEMFC	50-90	Membrana	500 W-400 kW	H2, gas, biogás, metanol	O2	30-60%	3000-4000	60000(sta) 5000 (mob)	Vehículos, transporte espacial, CHP, potencia de respaldo
PAFC	160-220	Ácido fosfórico	10 MW	H2, gas, biogás, metanol	O2	30-40%	4000-5000	30000-60000	Generación de poder, CHP
MCFC	600-700	Fundido de carbonato	100 Kw a MW	H2, gas, biogás, metanol	O2	55-60%	4000-6000	20000-40000	Planta de poder, CHP, proceso de calor y vapor
SOFC	700-1000	Cerámica	Kw a algunos MX	H2, gas, biogás, metanol	O2	50-70%	3000-4000	>90000	Planta de poder, CHP

Nota. AFC: pilas de combustible alcalinas; PEMFC: celdas de combustible de membrana de intercambio de protones; PAFC: pilas de combustible de ácido fosfórico; SOFC: pilas de combustible de óxido sólido; MCFC: Pilas de combustible de carbonato fundido (MCFC). Tomado de *Energy of the future?*, Shell, 2017, *Shell Hydrogen Study*

En términos generales los tipos de pilas combustibles pueden ser clasificadas según el tipo de electrolito y la temperatura que maneja, con temperaturas por debajo de 100 °C se consideran de baja temperatura, cuando operan por encima a 100 °C éstas se clasifican de mediana temperatura y finalmente cuando superan los 500 °C son de alta temperatura. Un par de parámetros

inversamente proporcionales son la pureza del hidrógeno como combustible con la temperatura, a más alta temperatura menos pureza de éste se requiere (Shell, 2017).

3.1.1 Proton Exchange membrane fuel cells (PEMFC). Consiste en un tipo de pila que funciona a una temperatura aproximada de 80 °C y que tiene una eficiencia de conversión de hidrógeno en electricidad esta entre el 50 y 60%. En particular en este tipo de pila el electrolito es un polímero sólido y el catalizador es de platino, esta estructura suele ser compacta. Algunos aspectos en contra es que tienen alta sensibilidad a la pureza del hidrógeno y que el catalizador al ser de platino eleva los costos (Sundén, 2019).

3.1.2 Alkaline fuel cells (AFC). Este tipo de pilas constan de un electrolito de hidróxido de potasio y fueron de las primeras utilizadas específicamente en aplicaciones espaciales (Shell, 2017). Mediante este dispositivo, se puede alcanzar una eficiencia de conversión del 70% y las condiciones operativas de temperatura oscilan entre 150-200 °C. La mayor ventaja es que no necesitan de un catalizador de platino, sin embargo, son muy sensibles al dióxido de carbono, por lo que se debe tener alta precaución e incluir oxígeno puro en el dispositivo (Sundén, 2019). Otra característica importante es su diseño compacto.

3.1.3 Phosphoric acid fuel cells (PAFC). Este tipo funcionan mediante un electrolito de ácido de fósforo y los datos de eficiencia de conversión y de rangos de temperaturas son del 40-50% y 150-200 °C, respectivamente. Los aspectos en contra son el daño del catalizador de platino a bajas temperaturas de funcionamiento y la robustez del dispositivo. Es necesario que exista en esta técnica un buen manejo del agua y materiales resistentes por la agresividad del electrolito (Shell, 2017).

3.1.4 Solid oxide fuel cells (SOFC). El electrolito es un material en cerámica basado en óxido de circonio. La temperatura de operación es de 1000 °C por lo cual, las reacciones ocurren a ritmos rápidos. Se puede utilizar gas natural como combustible. La eficiencia de conversión se acerca a 60% (Sundén, 2019).

3.1.5 Molten carbonate fuel cells (MCFC). Técnica con una eficiencia de conversión del 60% y la temperatura de operación es de 650 °C. Al igual que en el anterior mecanismo, la temperatura facilita la rapidez de las reacciones, pero también se puede utilizar un catalizador de níquel. El electrolito incorpora una mezcla de carbonatos de litio, potasio y sodio que puede llegar a ser altamente corrosiva (Sundén, 2019). Cada una de las aplicaciones de alta temperatura pueden constar adicionalmente de una turbina para generar electricidad y en particular en este tipo no se

requiere hidrógeno puro, se puede utilizar otros gases que contengan hidrógeno, sin embargo, así mismo se producirá CO₂. Otra característica es que no se necesitan de metales nobles en los catalizadores (Shell, 2017).

3.1.6 Direct methanol fuel cells (DMFC). En este mecanismo se utiliza metanol como combustible. La eficiencia de conversión lograda está entre 30-40% y el rango de temperatura oscila entre 50-100 °C (Sundén, 2019).

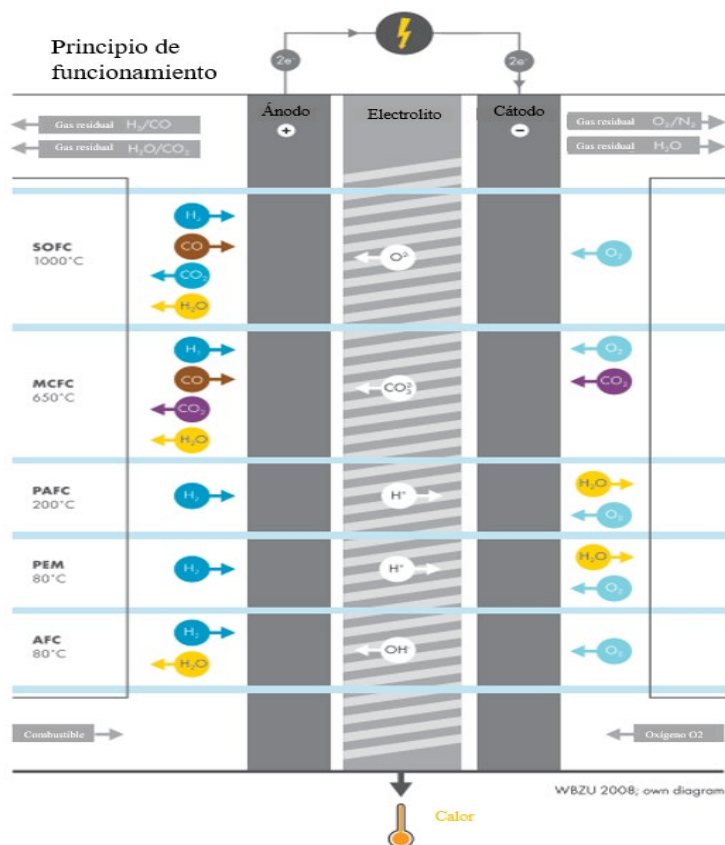
3.1.7 Reversible fuel cells. Recibe el nombre de reversible porque puede actuar tanto como pila de combustible como electrolizador para producir hidrógeno como ya fue explicado anteriormente, disociando la molécula de agua para transformar la energía de las fuentes renovables a energía química (Sundén, 2019).

3.1.8 Proton ceramic fuel cells. Se trata de una pila con un electrolito de cerámica que conduce protones, sin embargo, está en fase de desarrollo. El hidrógeno es el combustible y ocurre una reacción de oxidación de éste en el ánodo. La temperatura de manejo suele estar sobre los 700 °C (Sundén, 2019).

En la **figura 25** se esquematiza todos los mecanismos de los diferentes tipos de pilas combustibles mencionadas y las principales características que se hablaron con anterioridad.

Figura 25

Mecanismos de los diferentes tipos de pilas combustibles



Nota. Se puede observar cómo el flujo iónico varía dependiendo el tipo de pila. AFC: pilas de combustible alcalinas; PEMFC: celdas de combustible de membrana de intercambio de protones; PAFC: pilas de combustible de ácido fosfórico; SOFC: pilas de combustible de óxido sólido; MCFC: Pilas de combustible de carbonato fundido (MCFC). Tomado de *Energy of the future?*, Shell, 2017, *Shell Hydrogen Study*

3.2 Enfoque de pilas combustibles para el sector transporte

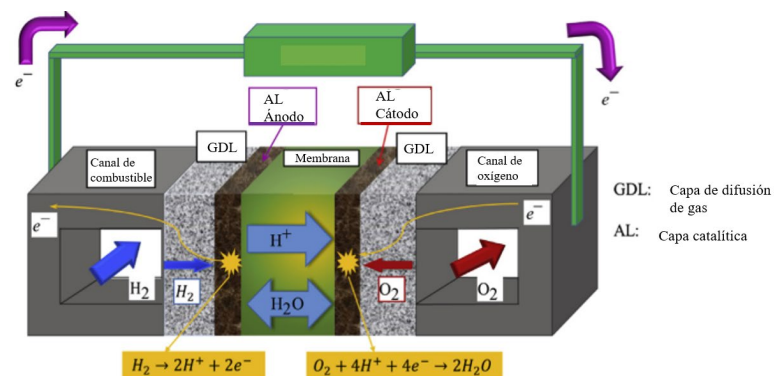
En la siguiente sección se describirán más a detalle las pilas combustibles que han sido utilizadas para aplicaciones en el sector transporte.

3.2.1 PEMFC. Esta clasificación de pilas se considera para aplicaciones de transporte por su tamaño reducido, por sus bajas temperaturas de operación de alrededor de 80-90 °C, por las cero emisiones GHG asociadas en la operación y que a pesar de todo es capaz de tener una gran

conversión energética. Consiste fundamentalmente en un ánodo, un cátodo y una membrana, que vienen conjuntamente como una estructura única que recibe el nombre de MEA. La membrana promueve el flujo de protones, pero adicionalmente separa los gases. En la **figura 26** se esquematiza el proceso y adicionalmente se señalan las reacciones que ocurren. Los valores de eficiencias de conversión de energía en este tipo de pilas pueden alcanzar bien sea valores de 70-80% en laboratorio y en aplicaciones prácticas un 50-60% (Sundén, 2019).

Figura 26

PEMFC



Nota. Partes de una pila PEMFC, reacciones que tienen lugar y flujo de iones H⁺ a través de la membrana. Tomado de *Hydrogen, batteries and fuel cells*, Sundén, 2019

Como se observa en la **figura ()**, al ponerse en funcionamiento, el gas de reacción se difunde por medio de la capa de difusión y se producen unas reacciones electrocatalíticas en las capas catalíticas. Los protones que se generan en el ánodo se trasladan al cátodo, es decir, al lado opuesto, a través de la membrana y los electrones llegan al cátodo a través de un circuito externo, reaccionando con el oxígeno y generando agua y por supuesto electricidad (Sundén, 2019).

a. Materiales. En el diseño de la pila se incorporan una serie de elementos que son necesarios para el correcto funcionamiento de ésta, más a detalle, está conformada por el electrolito que es la membrana, los electrodos que son las capas de catalizadores, las capas de difusión y las placas bipolares (Shusheng et al., 2020).

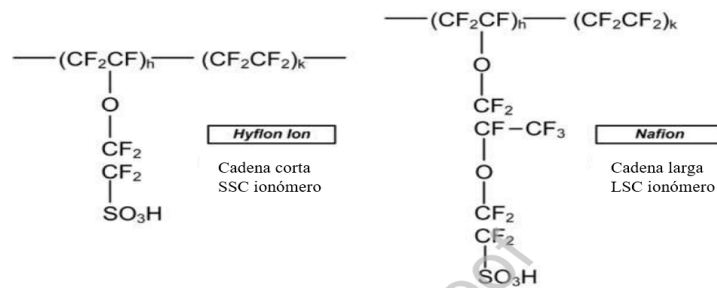
El electrolito, que particularmente en este caso es una **membrana**, está compuesto por un material sólido y su función es permitir el intercambio de protones. Para esta parte de la pila se añade el ácido perfluorosulfónico (PFSA) como material, que consiste en una cadena principal con un grupo de ácido sulfónico como grupo final; se identifica por ser de un carácter altamente

hidrófilo, permitiendo así la adsorción de agua para la conducción de protones, este aspecto es fundamental para el correcto funcionamiento de la pila. Las dos estructuras principales más usadas son los de cadena lateral larga de CF₂ como Nafion®, y cadena lateral corta de CF₂ como p. Aquiviun® (Y. Wang et al., 2020). En la **figura 27** se observan las diferencias entre los dos tipos.

Esta membrana se caracteriza por ser resistente mecánicamente y por tener una alta estabilidad química, buena conductividad iónica y la capacidad de absorber una gran cantidad de agua (Sundén, 2019).

Figura 27

Membrana de PEMFC



Nota. Se esquematiza los dos principales tipos de cadenas usadas en la membrana de la PEMFC. Tomado de *Fundamentals, Materials, and Machine Learning of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Technology*, Wang et al., 2020, *Energy and AI*

Continuando con los materiales, uno de los elementos más importantes es el lugar donde ocurren las reacciones electroquímicas y se denominan **capas del catalizador (CL)**. Estas capas a base de carbono se encuentran entre la membrana del electrolito polimérico y contactan directamente con las capas de difusión (Shusheng et al., 2020).

El rendimiento y la durabilidad son dos aspectos de las pilas combustibles que se ven altamente afectados por los materiales de estas capas que consisten básicamente en electrocatalizadores, soportes de carbono y ionómeros. Hay CL convencionales y no convencionales, las primeras se conforman mediante la dispersión de una tinta catalizadora que involucra un catalizador Pt/C, un ionómero y un disolvente, y los segundos son los CL de película delgada nanoestructurada que consisten en bigotes donde el catalizador se deposita sin ionómero para la conducción de protones. Además de esto, en cuanto a los soportes a base de carbono se utilizan por cualidades como bajo costo, por la estabilidad química, por su área superficial, por la

buena resistencia a los ácidos, por la conductividad eléctrica y adicionalmente por su afinidad por las nanopartículas metálicas (Y. Wang et al., 2020).

El carbono tiende a agregarse, formando aglomerados de partículas de carbono con una distribución de tamaño de poro bimodal, donde hay poros primarios y secundarios con tamaños de 2 a 20 nm y de 20 nm, respectivamente. La ubicación de los poros es entre las partículas de carbono en un aglomerado para los poros primarios y para los poros secundarios entre los aglomerados. Dependiendo de la distribución y utilización del platino dentro de un aglomerado, los poros primarios juegan un papel clave en la determinación de la cinética electroquímica, mientras que los poros secundarios son importantes para el transporte de reactivos a través de la CL (Y. Wang et al., 2020).

Hablando del platino, se suele utilizar como material catalizador de los electrodos. Con el objetivo de reducir costos alternativas al uso de platino se han estado desarrollando, para el cátodo pueden ser los compuestos oxígeno-metálicos, compuestos macrocíclicos organometálicos y sulfuros de metales de transición, entre otros, y para el ánodo óxidos de metales dopados con calcio, carburos y aleaciones sin platino (Shusheng et al., 2020). Las reacciones ocurridas en los catalizadores son expresadas en las **ecuaciones 17 y 18**:



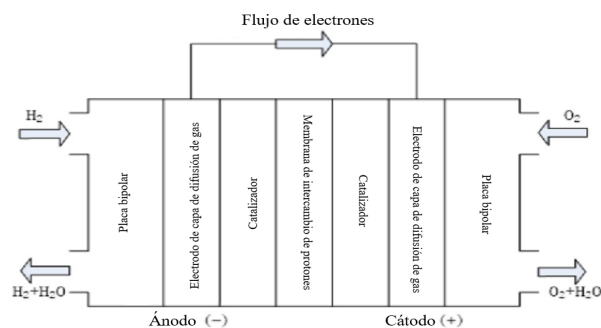
En las ecuaciones M es el metal, el catalizador. Adicionalmente a lo anterior mencionado hay que tomar en cuenta que el platino sufre alteraciones con compuestos como el monóxido de carbono y azufre desembocando en una disminución en el rendimiento de la pila.

Por otro parte, el **medio de difusión se conforma por las capas de difusión del gas (GDL) y las capas microporosas (MPL)**, estos dos elementos se localizan entre los catalizadores y las placas bipolares. Entre sus funciones se encuentra conformar un camino fiable para el traspaso de los electrones desde las placas bipolares hacia las capas del catalizador, suministrar los reactivos, remover productos y aportar soporte mecánico. Las GDL y MPL están compuestas por un papel de carbono y polvo de carbono, respectivamente, son porosas y deben tener un carácter hidrófobo (Y. Wang et al., 2020).

Por último, se encuentra la **placa bipolar (BP)** y el **canal de flujo de gas**, éstas se encuentran para cumplir las funciones de dispersar el calor, distribuir el reactivo gaseoso, otorgar un soporte mecánico y remover agua. Además, deben tener otras características como resistencia a la corrosión, ser eléctricamente conductoras, poseer pequeña resistencia al flujo de gas, fácil evaporación de la humedad de la superficie, fácil enfriamiento, buen sellado y pequeño volumen (Shusheng et al., 2020). Actualmente, en algunos estudios se está analizando utilizar algunos materiales para estas capas como los compuestos de carbono y algunos metales (aluminio, acero inoxidable o titanio). Concretamente, los compuestos de carbono ayudan con las condiciones de impermeabilidad a los gases, resistencia mecánica y establecen las correctas vías conductoras de electrones y calor (Y. Wang et al., 2020). La **figura 28** esquematiza el orden de todos los elementos de una PEMFC típica.

Figura 28

Esquematación de una PEMFC

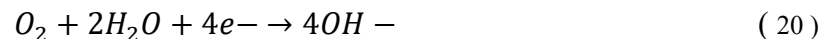
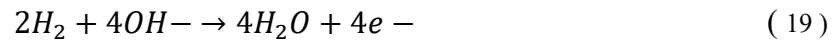


Nota. Tomado de Research and development of on-board hydrogen-producing fuel cell vehicles, Shusheng et al., 2020, International Journal of Hydrogen Energy

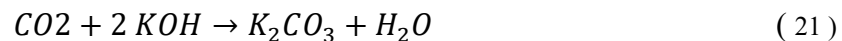
3.2.2 AFC. Son el primer tipo de pilas que se empezaron a utilizar en aplicaciones en el sector transporte, son de rangos medios de temperatura de operación y poseen una estructura compacta, el electrolito consiste en una solución de hidróxido de potasio y los catalizadores o electrodos son de bajo costo. Una de las principales desventajas es que no tolera cantidades de CO₂, debido a esto requiere entrada de gases puros, por otra parte, tiene una durabilidad menor que las pilas PEMFC, posee una expectativa de vida de 5000 a 8000 horas (Sundén, 2019).

Debido a que el electrolito es una solución, las reacciones ocurridas en los electrodos cambian en algunos aspectos, pero siempre manteniendo la ecuación general de oxígeno más

hidrógeno produciendo agua. En el ánodo al introducir hidrógeno se liberan electrones que irán por el circuito externo, los protones resultantes H^+ reaccionan con los iones hidroxilo OH^- para formar agua; en el cátodo por otra parte el oxígeno suministrado se disocia, luego recibe los electrones y al reaccionar con el agua se forma de nuevo estos iones hidroxilo (Breeze, 2017). Las reacciones se muestran en las **ecuaciones 19 y 20**:



La utilización de una solución alcalina ayuda a que mejore la rapidez de la reacción de oxígeno en el cátodo y con esto contribuye a mejorar la eficiencia y a la no utilización de platino. Como tal, su desarrollo como tecnología se estancó por el problema mencionado de la radioactividad con dióxido de carbono que genera que falle la pila por la formación de carbonatos y también por la corrosión de los elementos de la pila. La reacción de formación de carbonatos se observa en la **ecuación 21**:



Más a detalle, el efecto de producción de estos carbonatos genera una disminución de los iones hidroxilo, puede también reducir el pH que tiene un efecto en la cinética de las reacciones ocurridas en el cátodo. Estudios muestran adicionalmente que los carbonatos pueden precipitar como sólidos en los poros de los electrodos, la solución a este problema podría llegar a ser cambiar el electrolito y remover los carbonatos, que también ayudaría con el enfriamiento de la pila (Breeze, 2017).

El diseño actual consiste en el electrolito en forma de solución, pero con anterioridad también existían las membranas de iones hidroxilo, este diseño impedía la formación de carbonatos, pero a la misma vez la conductividad se veía disminuida y se manejaba una inestabilidad química. En este tipo de pilas se puede utilizar otros combustibles adicionales que contengan hidrógeno y que podrían ser ampliamente utilizados de forma directa, entre ellos está la hidracina y los hidruros tanto metálicos como químicos. En la actualidad estas pilas se utilizan en carretillas elevadoras y

carros de golf, querer extender la aplicación a escalas de medios de transporte como en la comercialización de vehículos implicaría superar todos aquellos impedimentos que acortan la vida útil y elevan los costos (Breeze, 2017).

3.2.3 SOFC. Son un tipo de pilas combustibles de alta temperatura (600 °C-1000 °C), cuya función es facilitar la rapidez de las reacciones electroquímicas. Como su nombre lo dice los electrodos y el electrolito son en estado sólido. Son consideradas en aplicaciones aéreas por su capacidad de reformar queroseno, sin embargo, al mismo tiempo al ser de alta temperatura se utiliza en cogeneración de calor y energía. Los materiales usados en el cátodo y ánodo son las cerámicas NI y Manganite Lanthanum. Específicamente, este tipo de pilas recibe gran foco de investigación porque puede operar con gran variedad de combustibles, porque trae consigo la posibilidad de reducir los inconvenientes de corrosión en la operación y del manejo del agua minucioso y en última instancia porque ofrece la posibilidad de usar capas finas en la pila y de la no necesidad de utilizar metales preciosos en los electrodos permitiendo así reducir los costos asociados en cada uno de estos términos (Sundén, 2019).

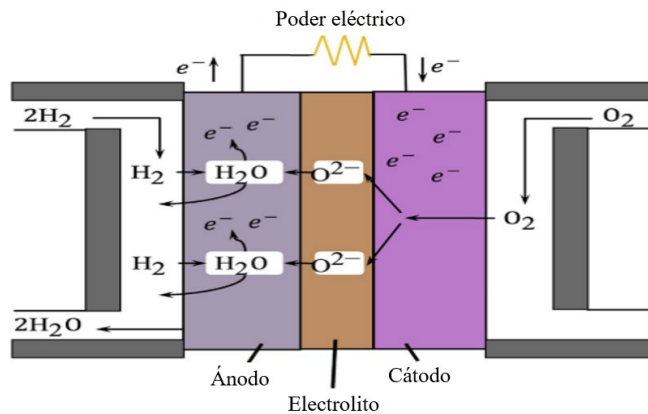
El electrolito es de cerámica sólida, con características aislantes, por lo que no conduce electricidad, pero lo que si hace es conducir los iones oxígeno. Al ser en estado sólido ofrece algunas compensaciones como es la estabilidad por largos periodos de tiempo, lo que genera que se aumenta el tiempo de vida de la pila, también la no necesidad de un sellamiento minucioso por no contener líquidos y la facilidad de fabricación por el diseño. En contraste, una gran limitación a superar es mejorar la conductividad del oxígeno a través de la cerámica y es por esto la necesidad de altas temperaturas, para proporcionar suficiente energía a la estructura cristalina sólida para que los iones de oxígeno puedan migrar a través de la cerámica. Una opción para mejorar aún más este parámetro es introducir un material de óxido metálico diferente que crea huecos en la estructura inicial que facilita que los iones de oxígeno puedan moverse (Breeze, 2017). Las reacciones ocurridas en el cátodo y en el ánodo son simple y se expresan en las **ecuaciones 22 y 23**:



El material principal de uso para el electrolito es el óxido de zirconio y a ese material se le integra óxido de itrio, el diseño de esta capa suele hacerse en capas delgadas que oscilan entre 10-100 nm. Adicionalmente, el sistema integrado de electrolito y electrodos preferentemente deben tener coeficientes térmicos similares. Por otra parte, al estar el cátodo continuamente en contacto con oxígeno a condiciones de altas temperaturas necesita adquirir resistencia a la oxidación, por eso debe contener metales nobles como el oro y la plata. Como el cátodo debe ser protegido de oxidación, el ánodo debe ser protegido de reducción y el nique es el metal más indicado. La eficiencia de estas pilas esta alrededor de 50-57%. Este tipo de pila combustible también puede verse afectada con algunos compuestos como el sulfuro (Breeze, 2017). El principio de funcionamiento se ve en la **figura 29**.

Figura 29

SOFC



Nota. Mecanismo de funcionamiento de una pila SOFC. Tomado de *Hydrogen, batteries and fuel cells*, Sundén, 2019

Existen dos formas de presentación, la primera es de **forma plana** con un diseño sencillo que permite mejorar la eficiencia energética, pese a esto, a la vez en este primer tipo de SOFC podrían presentarse problemas de sellado, ocasionando así fugas de gases. La configuración consiste en cátodo, ánodo y electrolito formando capas finas y separados por placas bipolares, la forma de éstas puede ser de rectangular, cuadrada o circular, entre otras y pueden ser metálicas. La posibilidad del manejo de las capas finas y de unas menores temperaturas otorgarán las cualidades de una baja resistencia eléctrica y la disposición de nuevos materiales como el acero,

respectivamente, sin embargo, no se debe bajar de 800 °C por posibles problemas de corrosión ocasionando falla en la pila (Sundén, 2019).

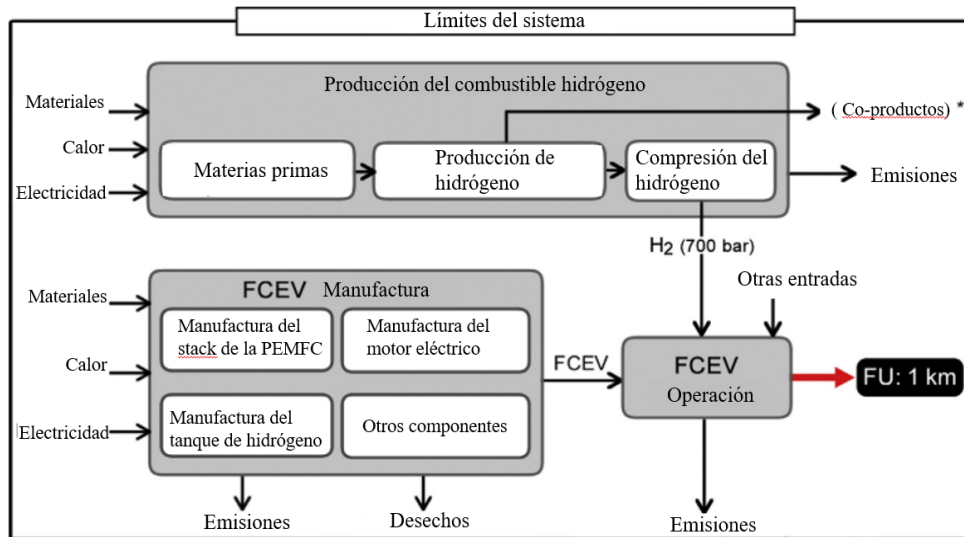
La segunda posibilidad es la **forma tubular**, que ya no posee los problemas de sellado de la anterior y opera bajo un rango de temperaturas entre 900-1000 °C. Caracterizada porque posee alta resistencia eléctrica y permite la expansión térmica. El diseño de la pila tubular consiste en un tubo de electrolito sellado en un extremo, los gases se introducen internamente y externamente, siendo el aire y el combustible de hidrógeno, respectivamente. A pesar de ser necesario capas delgadas por el mecanismo de funcionamiento debe haber una capa más gruesa por la integridad de la pila (Sundén, 2019).

4. CONSIDERACIONES TÉCNICO-AMBIENTALES EN EL PROCESO DE UTILIZACIÓN DE HIDRÓGENO EN PILAS COMBUSTIBLES

En relación a los temas de este capítulo, se pretende realizar una revisión de algunas de las consideraciones técnicas y/o ambientales involucradas en cada uno de los subprocesos comprometidos en la cadena del hidrógeno, esto con la meta de empezar a analizar las cuestiones de su uso. En la **figura 30** se muestra un esquema claro de los diferentes sistemas y sus respectivas entradas de material, calor y electricidad y salidas de emisiones y subproductos generados.

Figura 30

Límites del sistema a analizar



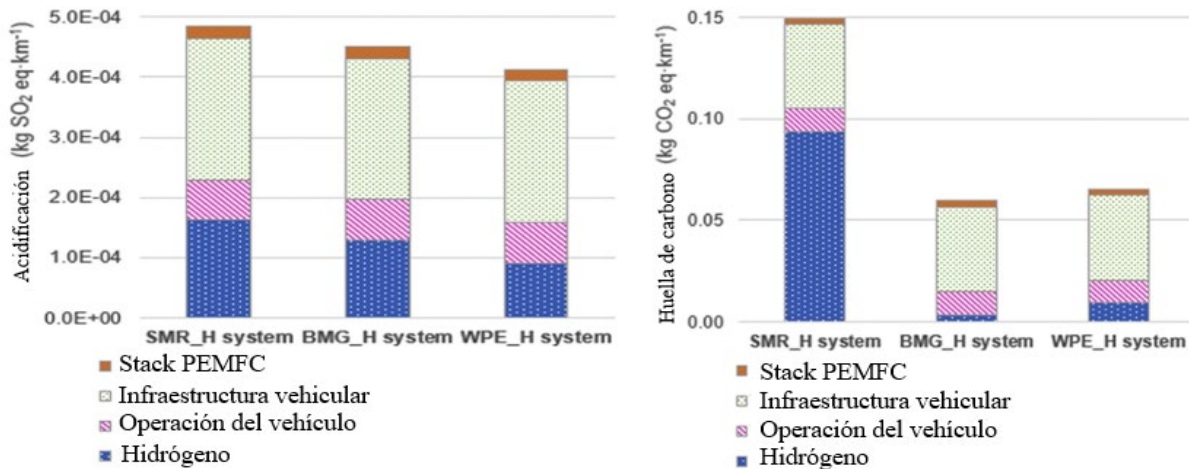
Nota. Sistema a analizar con sus respectivos procesos a lo largo de la cadena productiva del hidrógeno. FCEV: Vehículos eléctricos con pila combustible; PEMFC: Pila combustible de membrana de intercambio de protones. Tomado de *Using harmonised life-cycle indicators to explore the role of hydrogen in the environmental performance of fuel cell electric vehicles*, Valente et al., 2019, *International Journal of Hydrogen Energy*

Básicamente en un vehículo que funciona a base de hidrógeno se estructuran dos entradas, como se observa en la figura, que se deben analizar para llevar una evaluación correcta de la tecnología, la primera es la que engloba la producción de hidrógeno con la materia prima, su transformación mediante un proceso y el manejo de éste para ser almacenado y en segundo lugar está la manufactura de la pila combustible y la infraestructura necesaria para el funcionamiento de como tal ya el vehículo. Generalmente la noción superficial que se tiene es que el mayor impacto

ambiental se asocia al mecanismo de producción de hidrógeno. Por ejemplo, cuando éste viene a partir de recursos fósiles como el reformado por vapor de metano, las emisiones por el CO₂ que se desprenden no lo hacen una opción tan viable ambientalmente, sin embargo, cuando se explora otros mecanismos este foco de problema de la producción se puede desplazar a otros factores como consideraciones infraestructurales o de materiales, como se ve en las **figura 31**, donde se compara para diferentes formas de producción diferentes factores involucrados en términos de la huella de carbono y acidificación (Valente et al., 2019).

Figura 31

Comparación preliminar de técnicas



Nota. BMG_H: gasificación de biomasa; SMR_H: reformado de metano de vapor a base de fósiles; WPE_H: electrólisis de agua alcalina de energía eólica; PEMFC: Pila combustible de membrana de intercambio de protones. Tomado de *Using harmonised life-cycle indicators to explore the role of hydrogen in the environmental performance of fuel cell electric vehicles*, Valente et al., 2019, *International Journal of Hydrogen Energy*

Cuando la forma de producción de hidrógeno es el reformado por vapor, el aporte primordial a la acidificación y huella de carbono viene a través de la obtención del hidrógeno resaltando lo anterior mencionado, pero cuando las condiciones cambian y se toma el hidrógeno por ejemplo a partir de la electrólisis por medio de electricidad generada por fuentes eólicas los resultados difieren y en este caso es la infraestructura vehicular la de mayor contribución (Valente et al., 2019).

4.1 Consideraciones en producción

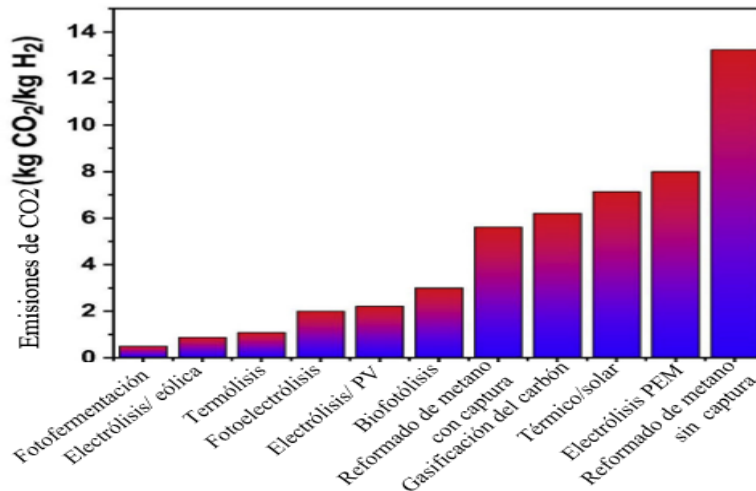
Según numerosos estudios de ciclo de vida de utilización de hidrógeno en pilas combustibles los principales puntos que se deben revisar y analizar se encuentran en el subproceso de producción (Navas-Anguita et al., 2020).

4.1.1 Emisiones asociadas a cada técnica. Como ya se mostró, existe una gran variedad de procedimiento de obtención de hidrógeno, de los cuales las técnicas de reformado de vapor del metano y electrólisis tradicional son los dos métodos más utilizados. Sin embargo, en el reformado del metano se produce dióxido de carbono directamente de la reacción, lo que en términos prácticos no sería la mejor herramienta que contribuiría en reducir las emisiones. Adicionalmente a ser el mecanismo de producción más contaminante, el reformado de metano por vapor, es también uno de los que requieren gran cantidad de energía por el manejo de las altas temperaturas; en condiciones similares está el proceso de oxidación parcial que también requiere del uso de altas temperaturas con o sin catalizador (Nazir, Louis, et al., 2020).

Es por esto que la generación de hidrógeno a partir de fuentes fósiles se debe dejar de lado para lograr el objetivo a largo plazo de cero emisiones asociadas con el llamado hidrógeno verde. Es por esto, que las técnicas de producción de hidrógeno emergentes que involucran fuentes renovables se deben explorar cada día más, al igual que los procesos de gasificación, pirólisis y fermentación de la biomasa. Particularmente, cada una de las formas de producción involucran en su proceso una cantidad de CO₂ emitida, ya sea baja o alta, en la **figura 32** se puede observar que las técnicas de menor impacto son la fotofermentación, la termólisis, la electrolisis a partir del viento y la fotoelectrólisis y la de mayor impacto es el reformado de metano con vapor (Nazir, Louis, et al., 2020).

Figura 32

Emisiones de CO₂ de los métodos de producción

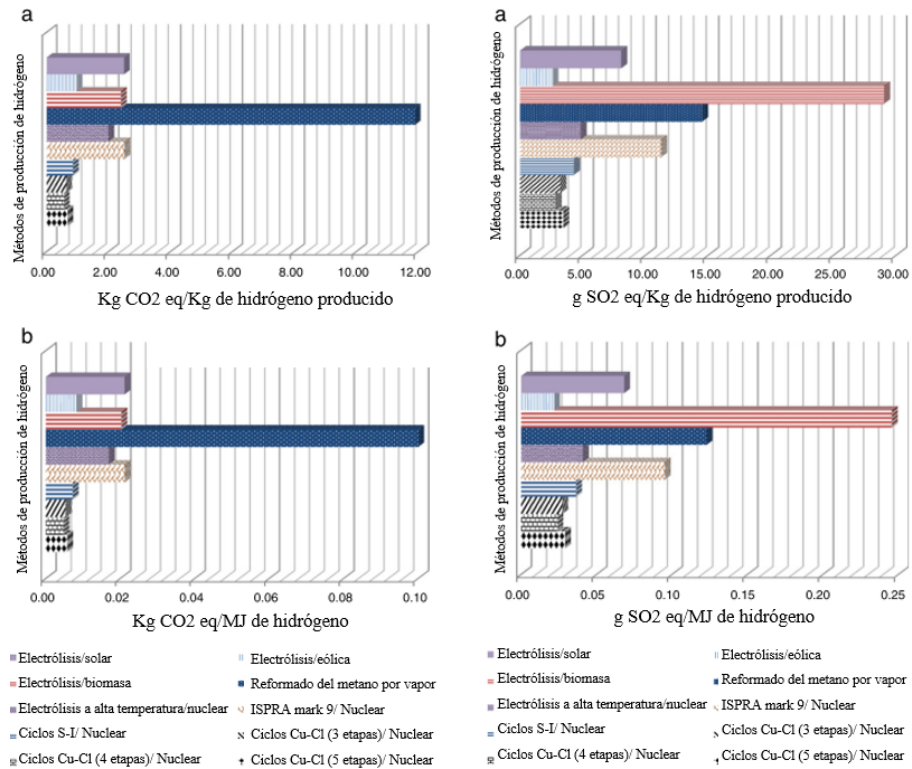


Nota. PV: Fotovoltaico; PEM: Membrana de intercambio de protones. Tomado de *Is the H₂ economy realizable in the foreseeable future? Part I: H₂ production methods*, Nazir, Louis, et al., 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*

En las **figuras 33** se puede observar las emisiones de CO₂ y SO₂ en kg eq/kg o en kg eq/MJ por tecnología utilizada desde otra perspectiva, donde se incluye los mecanismos de producción por medio de procesos nucleares. En estas gráficas se identifica que los ciclos termoquímicos son los que tienen menores impactos, en éstos se incluyen todos los procesos que tienen relación con energía nuclear y las diferentes etapas de procesamiento involucradas. Posteriormente a estos ciclos, el comportamiento se mantiene con respecto a los anteriores datos, dando como resultado que los siguientes procesos más ambientalmente amigables son la electrólisis basada en energía eólica, basada en biomasa y basada en energía solar y de igual forma el reformado de vapor constituye el peor proceso; en estos datos se identifica hasta seis veces más de emisiones comparado con el promedio de las otras técnicas para CO₂ eq/Kg y en el caso de los SO₂ los papeles se invierten y el peor resultado se asocia a la biomasa para electrólisis obteniendo casi 29 g SO₂ eq/MJ (Ozbilen et al., 2013).

Figura 33

Emisiones de CO₂ Y SO₂ por tecnología



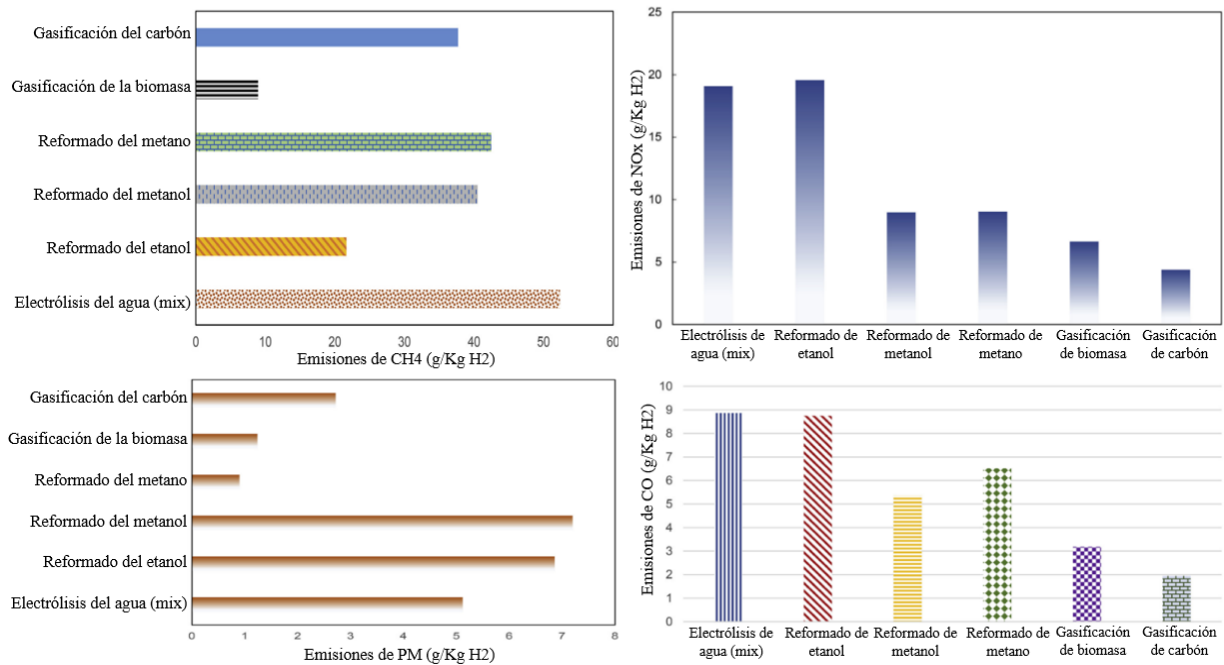
Nota. Comparación incluyendo los sistemas de generación nuclear. Tomado de *Comparative environmental impact and efficiency assessment of selected hydrogen production methods*, Ozbilen et al., 2013, *Environmental Impact Assessment Review*

Otros puntos ambientales positivos y negativos de algunos mecanismos de producción como la pirólisis y la fotoelectrólisis que son determinantes y se deben tomar en cuenta son que para el primero no se necesita ningún tipo de técnica para remover el CO₂ que se produce en las etapas y para el segundo que los puntos cuánticos coloidales deben ser tratados especialmente por su toxicidad (Nazir, Louis, et al., 2020). Otro dato importante para estudio es el factor limitante que la energía solar posee por problemas de emisiones asociados a la producción de los paneles solares (Ozbilen et al., 2013).

En lo relativo a el análisis de otros contaminantes provenientes de los mecanismos de producción, como las emisiones de CH₄, de CO, de NO_x y de PM, otras investigaciones señalan algunos resultados que se muestran en la **figura 34** (Siddiqui y Dincer, 2019).

Figura 34

Emisiones WTW de CH₄, CO, NO_x y PM por parte de algunos sistemas de producción



Nota. Tomado de *A well to pump life cycle environmental impact assessment of some hydrogen production routes*, Siddiqui y Dincer, 2019, *International Journal of Hydrogen Energy*

Como se puede identificar, en este estudio, en el cual se hace un análisis WTW, se centran en las alternativas de gasificación de carbón, gasificación de biomasa, reformado de metano, reformado de metanol, reformado de etanol y electrólisis. Todos los resultados se dan en g del contaminante/ kg H₂, en el caso del metano las tecnologías más contaminantes son la electrólisis (puesto que las fuentes de electricidad no son de origen renovable), el reformado del metano y metanol y la gasificación del carbón, en oposición la menos contaminante es la gasificación de la biomasa. Con respecto al monóxido de carbono y a los óxidos de nitrógeno la electrólisis sigue siendo la peor opción, pero en este caso la gasificación del carbón es la de menor impacto y por parte del material particulado el reformado de metanol constituye la opción menos viable y el reformado de metano la mejor (Siddiqui y Dincer, 2019).

4.1.2 Factores técnicos asociados. Con respecto a algunos aspectos de interés técnico de algunos de los métodos se tiene que:

✓A comparación del proceso de reformado de vapor, la pirólisis de hidrocarburos necesita aproximadamente unos 25KJ/mol menos de inversión de energía en su proceso (Nazir, Louis, et al., 2020).

✓En la dimensión de la obtención de hidrógeno a partir de la biomasa se generan buenos beneficios, lo que hace considerar los procesos como buenas alternativas, específicamente con los procesos termoquímicos y biológicos. En los procesos termoquímicos como la gasificación y la pirólisis de la biomasa la eficiencia de la técnica depende del tipo de biomasa, el tipo de catalizador utilizado, la temperatura y la duración. Así mismo en los procesos biológicos como la biofotólisis y la fermentación sus bajos requerimientos energéticos debido a que ocurren a condiciones normales de presión y temperatura de operación los destacan como focos de investigación. Con respecto a la producción mediante algas, aunque constituye un innovador y prometedor proceso, habría que superar algunos inconvenientes como el bajo potencial de producción de H₂ y el requisito de una gran superficie para recoger suficiente luz (Nazir, Louis, et al., 2020).

✓A pesar de la biomasa constituir un mecanismo de desarrollo importante que favorecería tanto ambiental como técnicamente, los mecanismos más destacados actualmente son la electrólisis a partir de recursos renovables, entre las fuentes renovables más proyectadas esta la solar con los paneles fotovoltaicos y la eólica, se estiman con ambas técnicas altas eficiencias (>70%) (Ozbilen et al., 2013).

✓Con la técnica de termólisis también se puede dividir el agua, sin embargo, es necesario la aplicación de altas temperaturas y depende en gran instancia del desarrollo de los colectores solares, sus materiales y los problemas de corrosión asociados (Nazir, Louis, et al., 2020)

✓Así mismo, en lo que refiere a la fotoelectrólisis, técnicamente posee limitaciones por el transporte de carga y la eficiencia de absorción de luz visible del electrodo semiconductor (Nazir, Louis, et al., 2020).

✓Evaluaciones completas de las diferentes técnicas requiere adicionalmente de una evaluación ambiental, una evaluación de las eficiencias de conversión energética de los procesos, este cálculo se realiza tomando en cuenta la información de las entradas de calor y electricidad en cada proceso y las salidas de hidrógeno. Algunos ejemplos de estos datos de entrada son de 473.3 MJ/kg H₂, 285 MJ/kg H₂ y 183.2 MJ/kg H₂ para los mecanismos de ISPR para energía nuclear, ciclos S-I para energía nuclear y reformado de metano por vapor, respectivamente. En la **tabla 8**, se muestra los datos de entrada y de salida de energía para algunas de las técnicas de producción

con sus respectivos resultados de eficiencias (Yazdanie et al., 2014). Para las técnicas que involucran electrólisis generalmente se asumen eficiencias del 70% (Ozbilen et al., 2013).

Tabla 8

Entradas y salidas de energía de los sistemas de producción para determinar la eficiencia

Proceso de producción de hidrógeno		Entradas						Salida de H2	Ef (%)
		Electricidad	Calor (nuclear)	Energía solar	Gas natural	Carbón	Biomasa		
Electrólisis	BT	0.192 GJ/kg H2						0.12 GJ/kg H2	62.5
	AT	0.119 GJ/kg H2	0.025 GJ/kg H2					0.12 GJ/kg H2	83.3
Termoquímica	Disociación térmica solar	7439 GJ/a		346984 GJ/a				100300 GJ/a	28.3
	Directa-hidrogenasa			1408 kJ				572.5 kJ	40.7
	Directa-nitrogenasa			2816 kJ				572.5 kJ	20.3
	Indirecta-hidrogenasa			2112 kJ				572.5 kJ	27.1
	Indirecta-nitrogenasa			3520 kJ				572.5 kJ	16.3
Gasificación	Gasificación del carbón					0.271 GJ/kg H2		0.12 GJ/kg H2	44.3
	Gasificación de biomasa	0.006 GJ/kg H2			0.006 GJ/kg H2		0.271 GJ/kg H2	0.12 GJ/kg H2	45.6
Reformado de vapor	Metano	0.002 GJ/kg H2			0.165 GJ/kg H2			0.12 GJ/kg H2	71.9
	Etanol	0.009 GJ/kg H2					0.176 GJ/kg H2	0.12 GJ/kg H2	64.9
Oxidación parcial					0.804 MJ/kg H2			0.438 MJ/kg H2	54.5

Nota. Mediante una comparación entre la energía que se invierte en el proceso y la que se obtiene con el hidrógeno se puede hacer el cálculo de la eficiencia. BT: Baja temperatura, AT: Alta temperatura. Tomado de *A comparative analysis of well-to-wheel primary energy demand and greenhouse gas emissions for the operation of alternative and conventional vehicles in Switzerland, considering various energy carrier production pathways*, Yazdanie et al., 2014, *Journal of Power Sources*

4.1.3 Resumen técnico-ambiental. En la siguiente **tabla 9** se resume los aspectos ambientales y técnicos de algunas de las técnicas de producción.

Tabla 9*Resumen técnico-ambiental*

Método de producción de hidrógeno	GWP (Kg CO2-eq)	AP (g SO2-eq)	Eficiencia (%)
Ciclos Cu-Cl/nuclear (5 etapas)	0.68	3.44	48
Ciclos Cu-Cl/nuclear (4 etapas)	0.56	2.84	53
Ciclos Cu-Cl/nuclear (3 etapas)	0.63	0.4	49
Ciclos S-I/nuclear	0.86	4.3	42
Ciclos ISPRa Mark 9	2.52	11.25	25
Electrólisis a alta temperatura/nuclear	2	4.84	51
Reformado de metano por vapor	11.89	14.52	70-80
Electrólisis basada en biomasa	2.4	29.03	70
Electrólisis basada en eólica	0.97	2.58	70
Electrólisis basada en solar	2.5	8.06	70
Oxidación parcial	-	-	60-75
Reformado autotérmico	-	-	60-75
Pirólisis de la biomasa	-	-	35-50
Gasificación de biomasa	-	-	35-50
Biofotólisis	-	-	10
Fermentación oscura	-	-	60-80
Fotofermentación	-	-	0.1
Fotoelectrólisis	-	-	0.06

Nota. AP: Acidificación; GWP: Potencial de calentamiento global. Tomado de *Comparative environmental impact and efficiency assessment of selected hydrogen production methods*, Ozbilen et al., 2013, *Environmental Impact Assessment Review*

Con claridad se delimita que el reformado de metano por vapor tiene una de las más altas eficiencias y es por este motivo y por su facilidad técnica, que ha sido utilizado principalmente. A la hora de realizar estudios e incorporaciones de las técnicas, se deberá sopesar y tomar en cuenta cual tecnología relaciona buenos resultados tanto en altas eficiencias y cuáles entonces serían los puntos a considerar a tratar para minimizar su impacto ambiental (Ozbilen et al., 2013).

a. Ventajas y desventajas de las técnicas. En el momento de seleccionar una alternativa para producir hidrógeno, dentro de la gran variedad de opciones existentes, se tiene presente todo lo anterior mencionado y adicionalmente se podría utilizar como hoja de ruta el considerar algunas ventajas y desventajas de algunos procesos como las que se presentan en la **tabla 10** (Abdalla et al., 2018).

Tabla 10*Ventajas y desventajas de algunos procesos de producción de H₂*

Proceso	Ventajas	Desventajas
Reformado de vapor	Es la tecnología más desarrollada No requiere oxígeno Temperatura de operación baja Buena relación H ₂ /CO	Emisiones de CO ₂
Oxidación parcial	Bajos requerimientos de desulfuración No exige catalizador Baja producción de metano Infraestructura y tecnología existente	Baja relación H ₂ /CO Temperatura de operación alta Proceso complejo de manejar
Reformado autotérmico	Temperatura del proceso baja a comparación de POX Baja producción de metano Infraestructura y tecnología existente	Requiere aire y O ₂ Nueva tecnología
Pirólisis de biomasa	Alimentación abundante y barata CO ₂ neutral	Formación de alquitrán El contenido de H ₂ depende de la materia prima y sus impurezas
Gasificación de la biomasa	Alimentación abundante y barata CO ₂ neutral	Formación de alquitrán El contenido de H ₂ depende de la materia prima y sus impurezas
Biofotólisis	Subproducto O ₂ CO ₂ es consumido Operar en condiciones suaves Suministro abundante	Necesidad de luz solar Bajas tasas de producción de H ₂ Materia prima costosa Sensible al O ₂
Fermentación oscura	Simple Produce H ₂ sin luz Contribuye al reciclaje de residuos No hay limitación de O ₂ CO ₂ neutral Puede usarse variedades de corrientes de basura Tecnología de reactor simple Altas tasas de producción	Necesita gran volumen en el reactor Eliminación de ácidos grasos Bajas tasas de producción de H ₂ Eficiencia de conversión baja Necesita gran volumen en el reactor Baja remoción de COD Gran cantidad de subproductos
Fotofermentación	Uso de diferentes tipos de desechos orgánicos y aguas residuales CO ₂ neutral Contribuye al reciclaje de residuos	Necesidad de luz solar Baja tasa de producción de H ₂ Baja eficiencia de conversión Sensible al O ₂
Fotoelectrólisis	Conversión casi completa del sustrato Alimentación abundante Sin emisiones O ₂ como subproducto	Necesita gran volumen en el reactor Eficiencia de conversión baja Necesidad de luz solar Materiales fotocatalíticos no efectivos

Nota. Tomado de *Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review*, Abdalla et al., 2018, *Energy Conversion and Management*

4.1.4 Evolución futura del uso de las técnicas. En la siguiente **tabla 11** se ve un posible desarrollo de la implementación que debería tener los procesos de producción de electricidad para la obtención de hidrógeno en España para lograr el objetivo de menor impacto ambiental para el año 2050 (Navas-Anguita et al., 2020).

Tabla 11*Desarrollo de los mecanismos de producción a futuro*

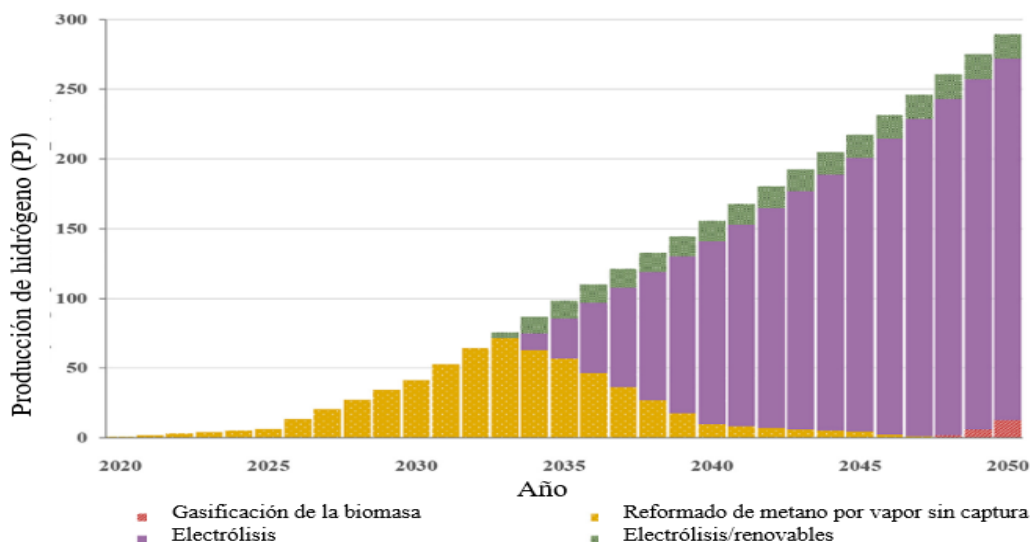
Producción de electricidad en España (GWh)							
Tecnología de producción de H2	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Motor de combustión de petróleo (existente)	7011	3505	-	-	-	-	-
Ciclo combinado de gas natural (existente)	36000	49956	39735	-	-	-	-
Cogeneración (existente)	27405	22267	10277	5138	-	-	-
Reactor de agua presurizado (existente)	48057	-	-	-	-	-	-
Reactor de agua hirviendo (existente)	9566	-	-	-	-	-	-
Represa hidroeléctrica (existente)	44588	44588	44588	44588	44588	44588	44588
Eólica (existente)	43481	20405	4081	-	-	-	-
Solar fotovoltaica (existente)	7998	7035	6071	-	-	-	-
Planta de poder biomasa (existente)	5841	5667	5493	3793	-	-	-
Planta de conversión de residuos de energía (existente)	1239	1204	1169	-	-	-	-
Planta de biogás (existente)	791	663	536	-	-	-	-
Cogeneración (Nueva)	5555	9721	19441	23607	27774	27774	27774
Represa hidroeléctrica (nueva)	432	432	432	432	432	432	432
Run-of-river hidroeléctrica (nueva)	149	149	149	2136	2136	1987	1987
Eólica (onshore/ nueva)	10407	41943	73479	106713	138762	168995	189746
Eólica (offshore/nueva)	1051	1051	1051	22083	23382	24681	24666
Planta solar fotovoltaica (nueva)	9106	36700	55188	55188	55188	56502	57816
Techo solar fotovoltaico (nueva)	4914	27252	28188	44676	44676	45990	47304
Solar térmica con almacenamiento (nueva)	-	-	-	-	-	-	6557
Planta de poder de biomasa (nueva)	-	4141	13625	19736	19331	17240	17278
Planta de conversión de residuos de energía (nueva)	4025	15768	15768	15768	15768	14027	15768
Planta de biogás (nueva)	237	631	1025	1419	1577	1577	1577
Pila de óxido sólido (nueva)	-	-	86	397	395	429	687
Planta de poder geotérmica (nueva)	-	-	2298	6504	9059	12079	16378
Total	267853	293078	322680	352178	383068	416301	452558

Nota. La orientación es hacia aumentar el uso de fuentes renovables. Tomado de *Prospective techno-economic and environmental assessment of a national hydrogen production mix for road transport*, Navas-Anguita et al., 2020, *Applied Energy*

Como se ve en la **figura 35**, una producción de hidrógeno basada en el reformado de vapor por hidrógeno para el año 2035 debe caer y dar paso a la electrólisis mediante sus diversas fuentes.

Figura 35

Comportamiento de la producción de hidrógeno

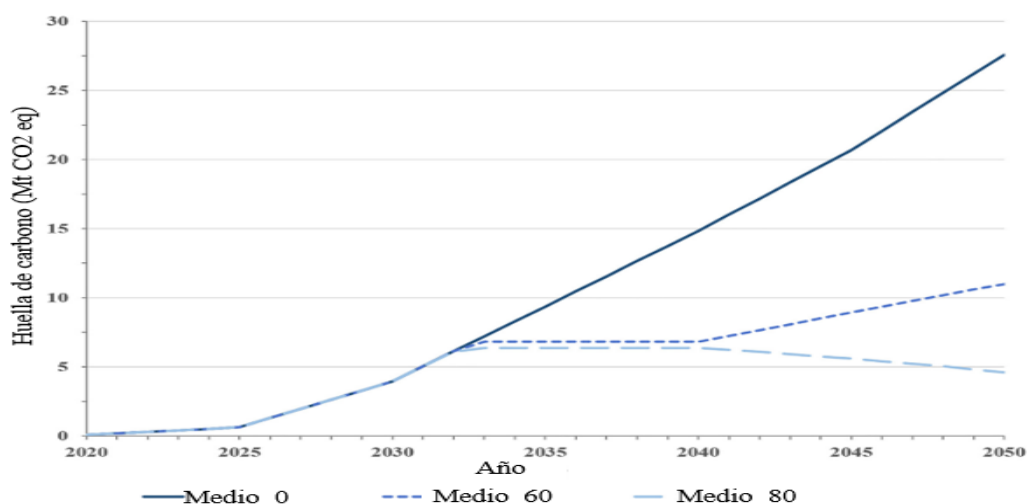


Nota. Se debería reducir la utilización del reformado por vapor, para dar paso a la electrólisis. Tomado de *Prospective techno-economic and environmental assessment of a national hydrogen production mix for road transport*, Navas-Anguila et al., 2020, *Applied Energy*

Tomando en cuenta el escenario de estos posibles cambios en producción para las próximas décadas, se prevé unos buenos resultados en la huella de carbono que se observa en la **figura 36**. Todas estas conclusiones pese a ser optimistas se encuentran con unas barreras de inversión y de gastos que deben ser superadas (Navas-Anguila et al., 2020).

Figura 36

Reducción en huella de carbono por el cambio en sistemas de producción



Nota. Medio_0: sin restricción de la huella de carbono, es decir, combinación de producción de tecnología evolucionada basada únicamente en criterios tecnoeconómicos; Medio_60: restricción ambiental de $\geq 60\%$ de ahorro de huella de carbono con respecto al escenario Medio_0 en 2050; medio_80: Ahorro de huella de carbono $\geq 80\%$ con respecto a medio_0 en 2050. Tomado de *Prospective techno-economic and environmental assessment of a national hydrogen production mix for road transport*, Navas-Anguita et al., 2020, *Applied Energy*

4.2 Consideraciones en almacenamiento

El almacenamiento de hidrógeno se considera como pieza fundamental a analizar de la tecnología de pilas combustibles, ya que tienen limitantes que retrasan el desarrollo de ésta, al igual que en la anterior etapa existe gran número de alternativas, de las cuales cada una tiene sus pros y sus contras.

4.2.1 Generalidades técnicas a considerar. Existen algunas consideraciones para cada uno de los tipos de almacenamiento. Particularmente, en el almacenamiento gaseoso algunos parámetros técnicos y de procedimiento son de mayor facilidad con respecto a los otros mecanismos, como por ejemplo, que la alta presión genera que se produzca un fácil llenado. Sin embargo, este tipo de almacenamiento no está socialmente tan aceptado por la misma razón, la necesidad de fuertes requerimientos de seguridad como las válvulas de presión de fibra de vidrio, debido a que estos tanques al contener hidrógeno a alta presión soportan altas tensiones y ciclos de fatiga por el procedimiento de llenado y vaciado. Es por esto, que los materiales empleados deben ser correctamente seleccionados para que tengan baja susceptibilidad a daños (Santiago, 2017).

Al contrario, según algunos estudios el almacenamiento líquido es más seguro y además cuenta con la ventaja de una alta densidad energética. Pese a esto, tiene barreras como que necesita gran cantidad de energía para su licuefacción (aproximadamente el 40%, en comparación a la compresión de gas que es del 15%) y existen pérdidas si no se logra un aislamiento correcto en el dispositivo (Nazir, Muthuswamy, et al., 2020). Así mismo, existen los procesos de almacenamiento sólido, los cuales pretenden mediante absorción química almacenar el hidrogeno, pero están aún poco desarrollados. El considerar la temperatura de autoignición además, es otro factor clave del diseño de estos sistemas de almacenamiento, este punto para el hidrógeno es de 585 °C (Dagdougui et al., 2018).

Pensar en una correcta elección de un sistema de almacenamiento requiere de tener claro cuáles son los objetivos de densidad gravimétrica y volumétrica, de costos de materiales y de rangos de operación. Para el sector transporte concretamente se han marcado ciertas metas a futuro en cuanto a todas las condiciones operativas para el sistema de almacenamiento sólido, éstas se muestran en la **tabla 12**.

Tabla 12

Metas futuras en almacenamiento sólido

Parámetro de almacenamiento	2020	últimos
Capacidad gravimétrica (Kg H2/kg)	0.055	0.075
Capacidad volumétrica (Kg H2/L)	0.04	0.07
Costos del sistema (\$/Kg H2)	333	266
Temperatura de operación (°C)	40-60	40-60
Temperatura de entrega (°C)	40-85	40-85
Expectativa de vida (ciclos de vida)	1500	1500
Tiempo de llenado 5 Kg(min)	3-5	4-5

Nota. Tomado de *Is the H2 economy realizable in the foreseeable future? Part II: H2 storage, transportation, and distribution*, Nazir et al., 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*

Además, los principales objetivos a futuro para cualquiera de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno para tres años diferentes se encuentran resumidos en la siguiente **tabla 13**. En la tabla se muestran los valores de capacidades gravimétricas y volumétricas, el costo del sistema, datos de durabilidad y operabilidad, entre otros.

Tabla 13*Objetivos futuros en los diferentes sistemas de almacenamiento*

Parámetro	Unidad	2020	2025	último
Capacidad gravimétrica	KWh/Kg	1.5	1.8	2.2
	Kg	0.045	0.055	0.065
	H2/Kg			
Capacidad volumétrica	KWh/L	1	1.3	1.7
	Kg H2/L	0.03	0.04	0.05
Costos del sistema	\$/kWh	10	9	8
✓ Costos del combustible	\$/Kg H2	333	300	266
Durabilidad/operabilidad				
✓ Temperatura de operación	°C	-40/60	-40/60	-40/60
✓ Temperatura de entrega	°C	-40/85	-40/85	-40/85
✓ Expectativa de vida	Ciclos	1500	1500	1500
✓ Presión del sistema	Bar	5 y 12	5 y 12	5 y 12
✓ Eficiencia	%	0.75	0.75	0.75
Velocidad de carga/descarga				
✓ Tiempo de llenado	Min	3-5	3-5	3-5
✓ Velocidad de flujo mínima (1.6g/s para una pila de 80 Kw)	(g/s)/kW	0.02	0.02	0.02
✓ Velocidad promedio	(g/s)/kW	0.004	0.004	0.004
✓ Tiempo de inicio para flujo completo a 20 °C y -20 °C	s	5 y 15	5 y 15	5 y 15
Calidad del hidrógeno	% H2	Cumplir con SAE J2719		
Objetivo de pérdida por ebullición	%	10	10	10
Permeación y fugas, toxicidad y seguridad		Cumplir con SAE J2579		
Reciclabilidad		Acorde a las directivas 2000/53C		

Nota. Tomado de *Is the H2 economy realizable in the foreseeable future? Part II: H2 storage, transportation, and distribution*, Nazir et al., 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*

Al analizar la información y con base a lo discutido en los anteriores capítulos se determina que algunas de las tecnologías ya existentes han logrado alcanzar unas de las metas como la densidad gravimétrica de 5-6 % o la operación en un rango de temperaturas bajas. Por otra parte, existen limitantes como los costos, que es uno de los inconvenientes que debe ser superado afinando los diseños y materiales empleados para los diferentes mecanismos. Como también un desafío importante para que estas tecnologías logren ser competitivas es almacenar suficiente hidrógeno a bordo para una autosuficiencia de manejo equivalente de 300 millas mientras que a la par se cumple con los requisitos de rendimiento (peso, volumen, cinética, etc.), seguridad y costo sin comprometer el espacio de pasajeros o carga, que es lo que cumple ya los motores a gasolina (Chalk y Miller, 2006). Continuando con la misma perspectiva, en la **tabla 14** se delimitan los factores claves y las oportunidades en cada uno de los tipos principales de almacenamiento.

Tabla 14*Retos y oportunidades de los sistemas de almacenamiento*

Mecanismo de almacenamiento	Estado	Opciones	Retos y oportunidades
H2 gaseoso	Comercialmente disponible, no muy costoso	Válvulas de fibra de carbono (6-10 wt% a 350-700 bar)	Fracturas, seguridad, energía de compresión, reducción en volumen, códigos y estándares.
H2 líquido	Comercialmente disponible, pero cara	Dispositivo aislado criogénico (20 wt% H2 a 1 bar y -253 °C)	Intensidad energética, el punto de vaporización, seguridad, códigos y estándares.
H2 Sólido	Unidades disponibles pequeñas, pero exorbitantemente caras	Opciones potenciales: Hidruros recargables, hidruros químicos, carbón y otros materiales de alta área superficial. Mejores opciones: hidruros metálicos, rendimiento mejorado por catalizadores, sustituciones iónicas y funcionalización por sustitución de heteroátomos.	Peso, desorción a bajas temperaturas, alta cinética de desorción, termodinámica desfavorable, tiempo y presión de recarga, manejo térmico, vida útil, optimización, códigos y estándares, compatibilidad del dispositivo y altos costos.

Nota. Tomado de *Is the H2 economy realizable in the foreseeable future? Part II: H2 storage, transportation, and distribution*, Nazir et al., 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*

De la información más importante que brinda la tabla es que por la parte del sistema gaseoso se sabe que existe ya comercialmente, que no es tan costoso y que sus mayores retos son la seguridad, la energía utilizada para la compresión del gas, la reducción en el volumen del tanque y los requisitos y estándares que son exigidos. En cuanto a los tanques para almacenar hidrógeno líquido, se incurre en gastos muy elevados por eso comercialmente están en menor cantidad, además el conservar el hidrógeno frío en condición líquida aumenta potencialmente sus densidades; desde el punto de vista de desafíos se mantienen las necesidades de superar algunos estándares, el manejo de la presión y temperatura para que el gas no se evapore y la seguridad. Por último, en el almacenamiento sólido en algunos casos por el rango de costos se sale de ser viable una cercana comercialización y sus principales condiciones a superar son el peso, el manejo de reacciones que no requieran temperaturas de deshidrogenación tan elevadas, una mayor cinética de reacción para asegurar menores tiempos y presiones, manejos térmicos, mayor expectativa de vida y tanques acordes a las necesidades; como se refleja para esta última opción se tienen que sobrepasar mayores factores limitantes (Nazir, Muthuswamy, et al., 2020). En estos sistemas utilizar el calor residual de la celda de combustible para desorber hidrógeno del material cuando sea requerido mejoraría el

proceso de almacenamiento; el desafío es entonces ajustar las propiedades de los compuestos enfocados al almacenamiento en estado sólido (Chalk y Miller, 2006).

En otro sentido, en el diseño de cualquiera de las opciones mencionadas es necesario pensar también en otro tema importante como que al ser tan pequeñas las moléculas de hidrógeno son capaces de permear a través de las paredes de los tanques, por ende, los requisitos de los materiales es asegurar que este proceso no se dé. Al asegurar características como éstas, también se influirá en que se generen las mejores especificaciones técnicas posibles (Santiago, 2017). Actualmente el almacenamiento de hidrógeno de forma segura, eficiente y maximizando las capacidades volumétricas y gravimétricas es un gran reto y es el foco de un gran número de estudios.

4.2.2 Materiales. Los materiales implementados en los tanques son dependientes del enfoque del tipo de almacenamiento de hidrógeno. Aun así, las fibras de carbono son un material principal, las cuales están conformadas por precursores de poliacrilonitrilo (PAN), que provee el beneficio de la reducción en el peso de los dispositivos, aunque al contar con este material los costos de fabricación se elevan y únicamente en él se puede alcanzar hasta el 75% de la inversión total (Hwang y Varma, 2015).

Por su parte, para el almacenamiento comprimido se cuenta con cuatro tipos de tanques que tienen tanto rangos operativos de presión, como materiales y diseños específicos y son (Santiago, 2017):

✓Tipo I. Se fabrican sin costuras y son de acero o aluminio, sus presiones de operación no deben superar los 200 bar.

✓Tipo II. Se fabrican sin costuras también y de igual forma están conformados a partir de material como el acero y aluminio, la diferencia con el primero es que éstos están reforzados con fibra de carbono o vidrio, para que sea posible llegar a presiones de 700 bar y 1000 bar.

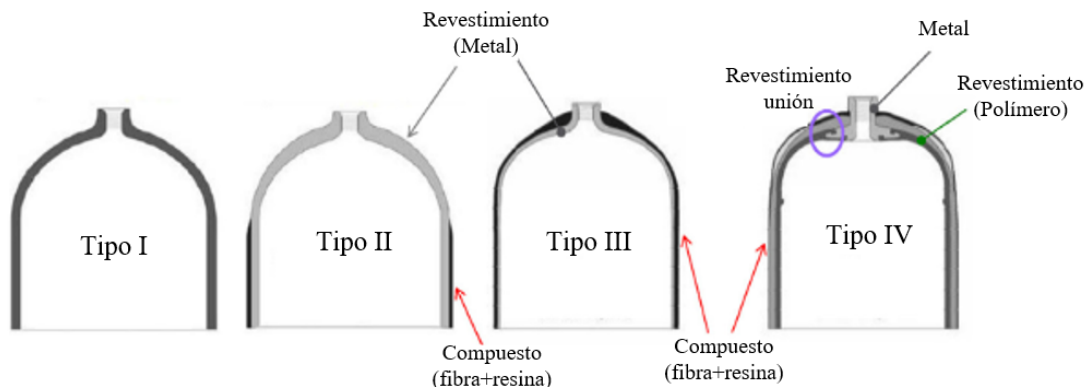
✓Tipo III. Contienen un forro metálico interno para evitar el problema de permeabilidad del hidrógeno, adicionalmente hay una cubierta de fibra de carbono dispuesto en distintas direcciones y la parte metálica es normalmente de aluminio, aunque también puede ser de acero. Las presiones alcanzadas pueden ser de 700 bar.

✓Tipo IV. El forro interno en este caso es plástico (polietileno) y cumple la misma función objetivo del anterior, también está reforzado mediante fibras de carbono. Externamente se cuenta con un recubrimiento de fibra de vidrio como protección adicional. El sistema de carga y descarga del tanque involucra válvulas de presión. Éstos a pesar de ser los más costosos, son los más

implementados por la ligereza y alta densidad gravimétrica que otorgan (11.3 wt%) (Santiago, 2017). Los diferentes tipos de tanques se muestran en la **figura 37**.

Figura 37

Tipos de tanques para H₂ comprimido



Nota. Materiales asociados a cada tipo de tanque comprimido. Tomado de *Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review*, Abdalla et al., 2018, *Energy Conversion and Management*

4.2.3 Riesgos. Las condiciones de posible peligro frente al almacenamiento, que son de amplio conocimiento, son en este momento socialmente la limitación más grande. En algunos estudios se considera el almacenamiento gaseoso como el más peligroso por el manejo de las presiones y en otros análisis plantean el almacenamiento en estado líquido a 20.37 K como el que posee mayores condiciones de riesgo debido a que la baja viscosidad del hidrógeno en estas condiciones ayuda a que éste se puede fugar fácilmente y que exista la obligatoriedad de un constante monitoreo. Ya sea uno u otro tipo de almacenamiento, en frente de una posible fuga, las posibles fuentes de ignición pueden ser condiciones eléctricas, mecánicas y térmicas (Dagdougui et al., 2018). Se dispone de una lista de chequeo para mejorar las condiciones de seguridad de almacenamiento, entre estas condiciones se encuentran:

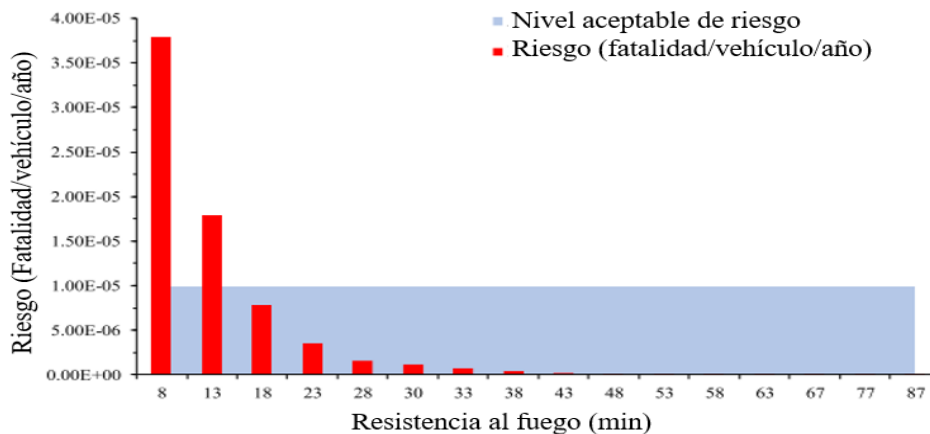
- ✓ Delimitaciones de la zona expuesta a fugas.
- ✓ Disminuir el confinamiento del sector alrededor de la fuga.
- ✓ Buena ventilación tanto natural como forzada para reducir la concentración de hidrógeno.
- ✓ Reducciones de las posibles fuentes de ignición.
- ✓ Tener encendedores que limitan el tamaño de la cantidad de hidrógeno.
- ✓ Herramientas como recombinantes catalíticos para eliminar el hidrógeno no deseado.

- ✓ Procesos de diluciones de gas para bajar la reactividad.
- ✓ Correcto sistema de detección para la activación del apagado y el alivio de presión.
- ✓ Protección contra incendios.
- ✓ Sistemas de gas inerte o niebla de agua fina para diluir el oxígeno y reducir el calor.
- ✓ Procesos de riego de agua para el enfriamiento de equipos y generar así reducción de llamas (Dagdougui et al., 2018).

Además de esto, la evaluación del riesgo en los tanques se hace mediante “La razón de resistencia al fuego (FRR)”, que es un parámetro que indica el tiempo desde el inicio del incendio hasta la ruptura del tanque y este valor en promedio oscila entre 6-12 min. Es por esto que actualmente existen normativas como por ejemplo la europea, que exigen sistemas de ventilación en vehículos que funcionan mediante pilas combustibles de hidrógeno, para liberar a tiempo el hidrógeno y evitar una posible fractura del tanque (Dadashzadeh et al., 2018). En la **figura 38** se esquematiza el riesgo en función de este parámetro de resistencia al fuego.

Figura 38

FRR

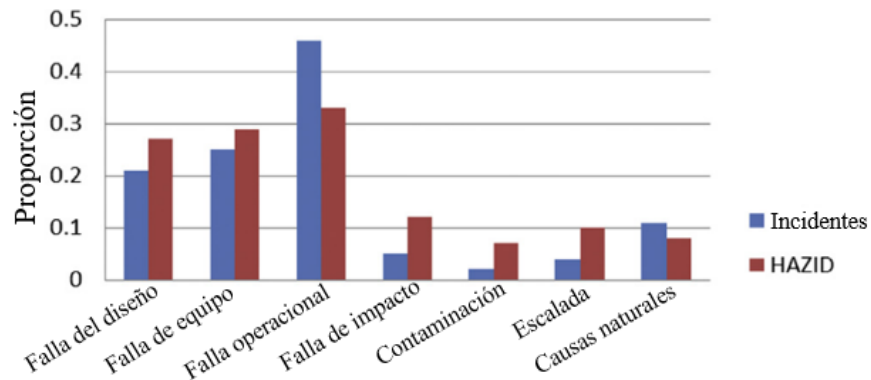


Nota. El riesgo disminuye a medida que se aumenta el factor de resistencia al fuego. Tomado de *Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage*, Dadashzadeh et al., 2018, *International Journal of Hydrogen Energy*

Focalizando el análisis de riesgos al almacenamiento líquido, existe una gran variedad de incidentes y eventos adversos a lo largo de la licuefacción, su almacenaje y transporte, asociados a diversos factores como se ve reflejado en la **figura 39**. Allí se refleja que los mayores incidentes son ocasionados por fallas operacionales.

Figura 39

Incidentes asociados al hidrógeno líquido

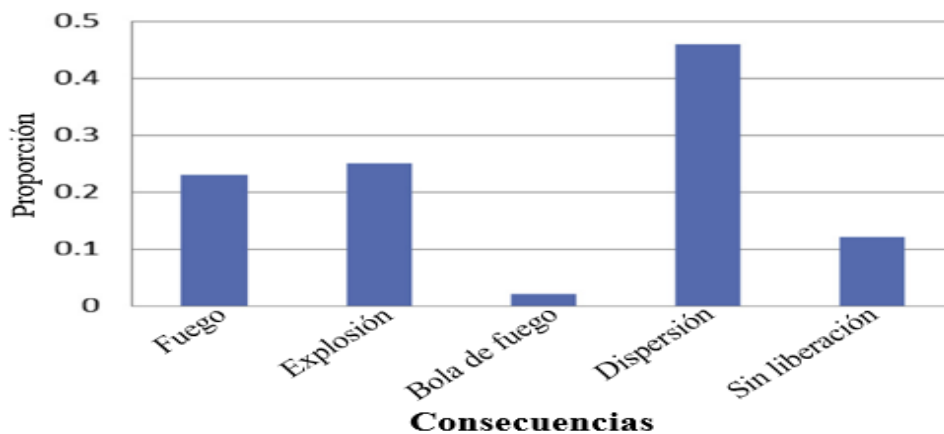


Nota. Tomado de *Safety issues of the liquefaction, storage and transportation of liquid hydrogen: An analysis of incidents and HAZIDS*, Lowesmith et al., 2014, *International Journal of Hydrogen Energy*

Como complemento a la información anterior, en la siguiente **figura 40** se presenta los resultados que tienen estos incidentes en cinco tipos de consecuencias, donde la más destacada es la de dispersión con una proporción de casi 0.45, detrás de ésta se encuentran las consecuencias de explosión y fuego (las que se quieren evitar a toda costa), con proporciones de 0.25 y 0.22, respectivamente (Lowesmith et al., 2014).

Figura 40

Consecuencias de riesgo resultantes en el almacenamiento líquido de H2



Nota. Tomado de *Safety issues of the liquefaction, storage and transportation of liquid hydrogen: An analysis of incidents and HAZIDS*, Lowesmith et al., 2014, *International Journal of Hydrogen Energy*

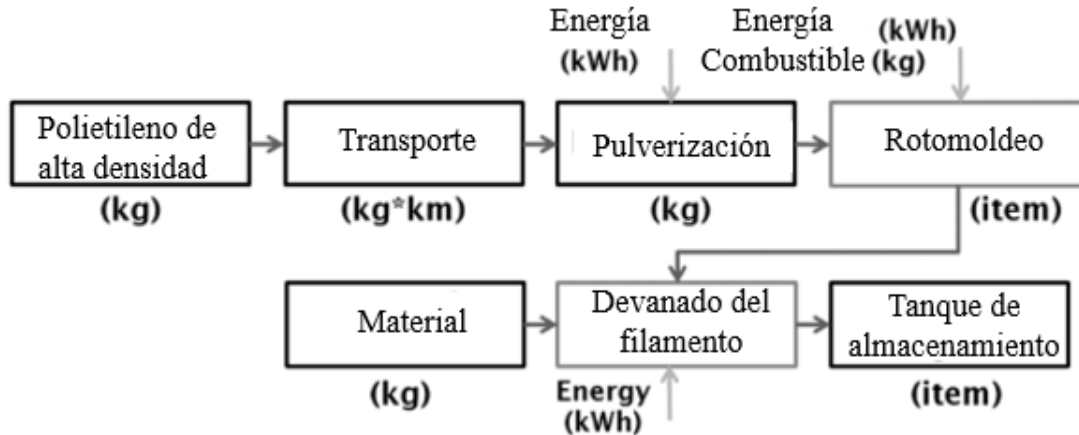
4.2.4 Dimensión ambiental. Desde un foco ambiental, los sistemas de almacenamiento en general y específicamente los comprimidos brindan ventajas por sus menores impactos asociados a los temas de procesos y de materiales implicados, a comparación de otros subprocesos como la producción de hidrógeno. Éstos están constituidos por metales como el aluminio y el acero, además de compuestos de fibra de carbono o de vidrio y plásticos en algunos casos. Por ende, la afectación ambiental asociada a este tipo de tanques se tiene que ver con referencia a un análisis de ciclo de vida de los materiales de los que están compuestos (Dagdougui et al., 2018). Esta revisión de materiales no solo se realiza en los tanques comprimidos, también es para los demás almacenamientos físicos, como los tanques crio-comprimidos y los de almacenamiento líquido. Por parte del almacenamiento del hidrógeno en compuestos o materiales es necesario, de igual manera, distinguir cual es el compuesto, como por ejemplo los hidruros o el carbón activado, y cuál entonces sería su impacto ambiental en cualquier ámbito, ya sea en el aire, en el agua, en el suelo, etc.

Concretamente, en la incidencia ambiental por parte de la fabricación de un tanque tipo IV de fibra de carbono para hidrógeno gaseoso, se estudia los diferentes procesos desde el transporte de la materia prima (polietileno pulverizado de alta densidad), pasando por la pulverización y el rotomoldeo, para llegar finalmente al devanado del filamento, donde se refuerza con compuestos de carbono y resina epoxi (Benitez et al., 2021), ver **figura 41**.

Para delimitar las observaciones ambientales de los tanques, el camino correcto sería proceder entonces con el estudio del ciclo de vida de los materiales y de los procesos, aunque los resultados de esta técnica son muy dependientes de los diseños de cada fabricante como por ejemplo de si podría haber implementación de fibra de vidrio, de capas más gruesas para el revestimiento u otras especificaciones.

Figura 41

Proceso de producción del tanque

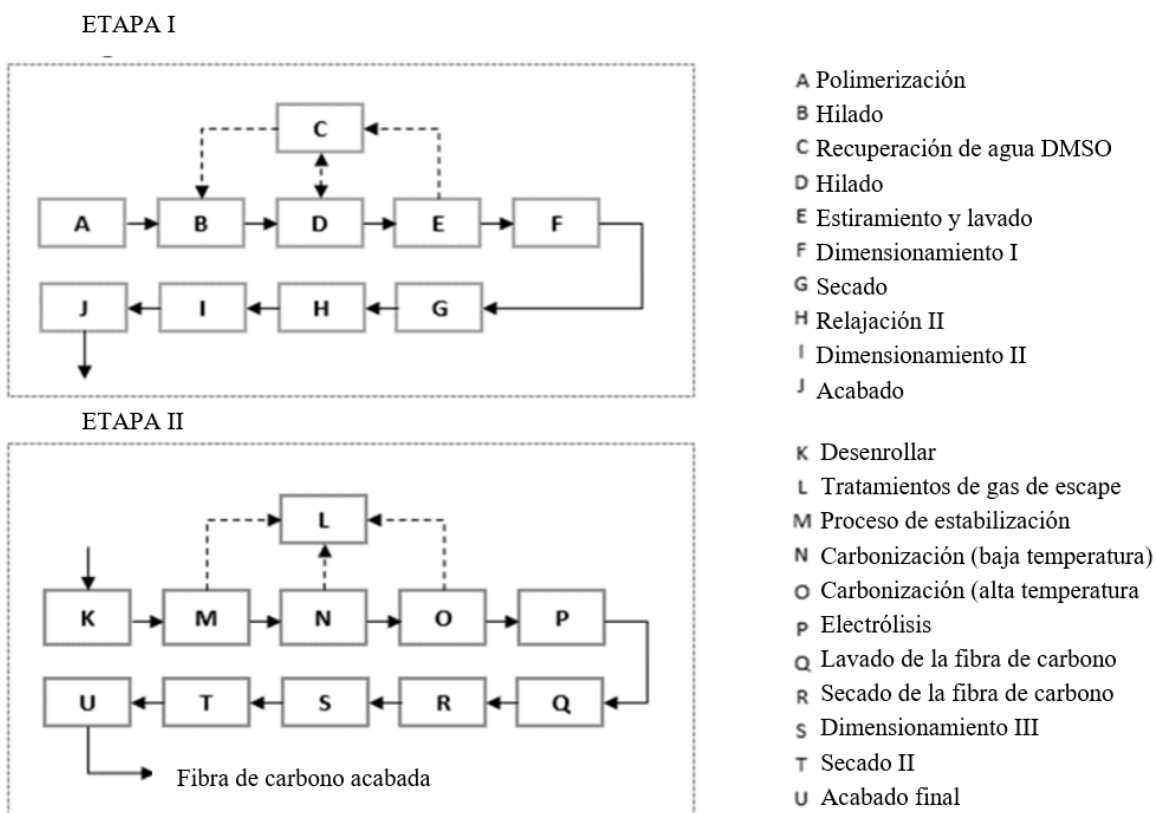


Nota. Cadena de producción para la fabricación de un tanque. Tomado de *Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on type IV carbon fiber hydrogen tank*, Benitez et al., 2021, *Journal of Cleaner Production*

En cuanto a la fibra de carbono y sus impactos, tienen alta dependencia de ciertos puntos como del tipo de precursor del que venga, bien sea celulósico, brea o poliacrilonitrilo; de los métodos de polimerización como polimerización en emulsión o dispersión; de los métodos de hilado y también de las temperaturas manejadas. En su proceso de producción existen dos etapas bien marcadas, la primera es de la preparación del precursor de la fibra y la segunda consiste en los tratamientos térmicos y postprocesamiento (Benitez et al., 2021). En la **figura 42** se muestran los pasos de ambas etapas:

Figura 42

Proceso de fabricación de fibra de carbono

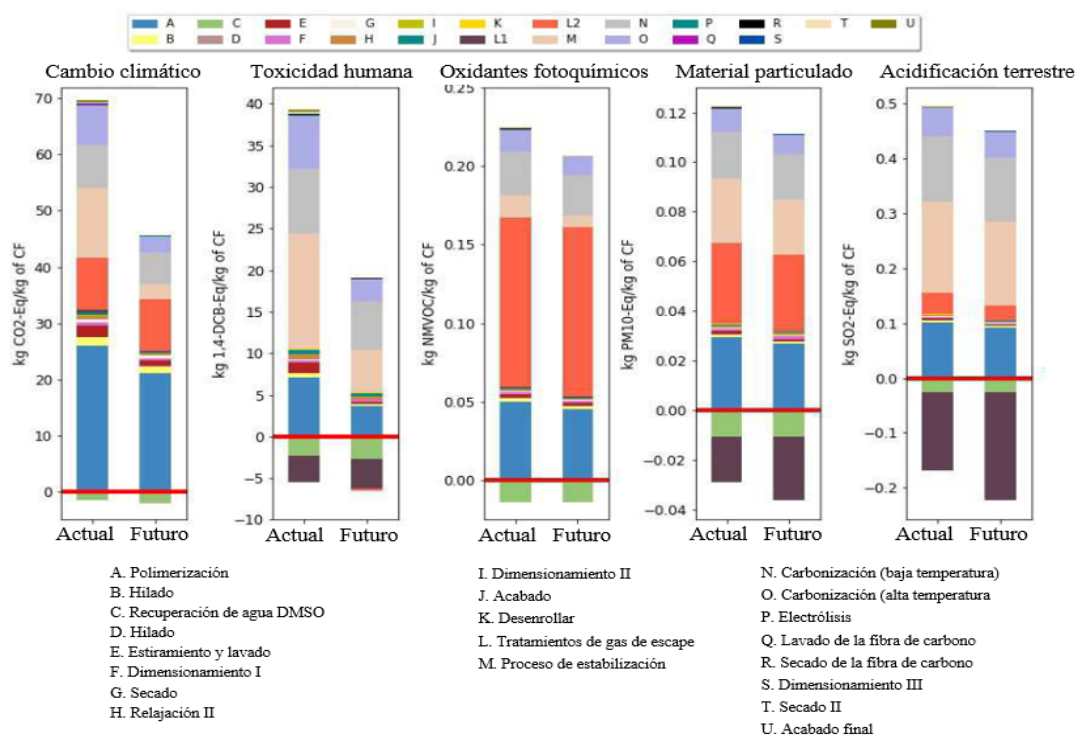


Nota. Se visualizan con claridad las dos etapas del proceso de fabricación de fibra de carbono (la primera es de la preparación del precursor de la fibra y la segunda consiste en los tratamientos térmicos y postprocesamiento). Tomado de *Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on type IV carbon fiber hydrogen tank*, Benitez et al., 2021, *Journal of Cleaner Production*

A lo largo de estos pasos los impactos son los siguientes, ver **figura 43**:

Figura 43

Producción de fibra de carbono y sus impactos



Nota. Los procesos de polimerización, tratamiento de gas de escape y de estabilización son los de mayor contribución negativa. Tomado de *Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on type IV carbon fiber hydrogen tank*, Benitez et al., 2021, *Journal of Cleaner Production*

Los efectos ambientales primordiales por parte de la manufactura de la fibra de carbono son en los procesos de polimerización del acrilonitrilo, estabilización del precursor de la fibra y la carbonización. En el factor de cambio climático los porcentajes de contribución son del 38% solamente en el proceso A por la demanda energética requerida y en un 44% por parte de los procesos de la D a J debido a la demanda de electricidad. Además, de los procesos de la segunda etapa, el tratamiento térmico se lleva un gran porcentaje de contribución por las entradas de calor. En términos de toxicidad humana las actividades mineras de lignito juegan un papel fundamental. Sumado a esto, los procesos con el acrilonitrilo y el amoniaco en L2 forman oxidantes fotoquímicos que causan implicaciones en la acidificación de los ecosistemas y la calidad del aire (Benitez et al., 2021). En la **tabla 15** se muestra las emisiones por la fibra de carbono.

Tabla 15*Fabricación de fibra de carbono y sus efectos ambientales*

Indicador	Unidades	Actual
Cambio climático	Kg CO2-eq	68.09
Toxicidad humana	Kg 1,4-DCB-Eq	33.83
Oxidación fotoquímica	Kg NMVOC	0.21
Formación de material particulado	Kg PM10-Es	0.09
Acidificación	Kg SO2-Eq	0.33

Nota. Tomado de *Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on type IV carbon fiber hydrogen tank*, Benitez et al., 2021, *Journal of Cleaner Production*

4.3 Consideraciones en los mecanismos de pilas combustibles

En los últimos años las tecnologías en pilas combustibles han ido evolucionando, cada una de sus partes y de los materiales que se han ido utilizando han servido para mejorar las eficiencias técnicas y lograr una buena conversión de la energía. En la **tabla 16** se muestra el stack necesario para una PEMFC que es el tipo de pila más utilizada, como la membrana, las placas bipolares, entre otros elementos y sus correspondientes pesos. Así mismo, también se señala los componentes infraestructurales adicionales que se necesitan en el sistema como el motor eléctrico y la unidad de control de poder, además también se incluyen algunos de los metales que están presentes (Valente et al., 2019). Cabe resaltar que estos datos están fuertemente influenciados por el tipo de medio de transporte que incorporará la pila en cada una de las investigaciones incluidas en este estudio, que puede ser desde una bicicleta, pasando por un vehículo ligero y llegando incluso hasta buses o trenes, también los valores pueden variar dependiendo del diseño, las necesidades energéticas y los materiales.

Tabla 16*STACK de la pila combustible y sus pesos*

Flujo de entrada	Cantidad	Unidad
STACK PEMFC		
Tinta de catalizador	40.65	g
Capas de difusión de gas	2.93	Kg
Juntas	8.14	Kg
Placas bipolares	22.69	Kg
Membrana	235	g
Otros materiales y componentes		
Motor eléctrico	80	Kw
Tanque de hidrógeno	93	Kg
Unidad de control de poder	1	p
Caja de cambios	80	Kg
Llantas	4	p
Adhesivo para metales	13.6	Kg
Hoja de metal de refuerzo	1438.2	Kg
Cobre	7.99	Kg
Hoja de aluminio	15.98	Kg
Vidrio	63.92	Kg
Granulado de polipropileno	71.91	Kg
Paquete de batería de Li-ion (288 V)	17.10	Kg

Nota. PEMFC: Pila combustible de hidrógeno con membrana de intercambio de protones. Tomado de *Using harmonised life-cycle indicators to explore the role of hydrogen in the environmental performance of fuel cell electric vehicles*, Valente et al., 2019, *International Journal of Hydrogen Energy*

4.3.1 Limitaciones en PEMFC. En la operatividad de las pilas PEM existen una serie de inconvenientes principales como la durabilidad y el costo de éstas, estas dos variables van conectadas y son directamente proporcionales debido a que entre mayor sean los costos de los componentes de la pila mayor será su vida útil. El costo de éstas en algunas ocasiones puede llegar a ser hasta cinco veces más alto que el de un motor convencional, los elementos de mayor inversión son los electrocatalizadores, la membrana y las placas bipolares. El rango de precios de un automóvil con pila combustible está en 60000 dólares y de un autobús en 1 millón de dólares y el objetivo de vida es, en última instancia, 8,000 h para los FCEV y 25,000 h para los FCEB (Y. Wang et al., 2020).

En específico las capas de catalizadores se llevan un mayor porcentaje de gasto por el contenido de platino presente y actualmente hay investigaciones en curso que se enfocan en conseguir una disminución de éste, sin alterar la efectividad de las reacciones. Hasta la fecha, el platino sigue siendo el electrocatalizador de principal elección en pilas PEM debido a su alta eficiencia, pero adicionalmente a ser de alto costo cuenta con el inconveniente de necesitar una alta

carga para lograr una vida útil esperada sin pérdidas en el rendimiento del proceso. Desde otro foco, las condiciones ambientales y operacionales idóneas, las impurezas de los combustibles y del agente oxidante y sus efectos y los factores de corrosión, constituyen otras consideraciones técnicas que también alteran el comportamiento operativo de estas capas de catalizador. Adicionalmente, al pensar en posibles mejoras aplicadas a dichas capas, se evalúa el alterar partes como por ejemplo los soportes convencionales de carbono por el uso de unas películas delgadas de nanoestructura (Y. Wang et al., 2020).

Con relación a otro elemento de la pila, los materiales que se incluyen en la membrana deben tener características de impermeabilidad a gases, ser aislantes eléctricos y deben soportar las condiciones operativas aportando estabilidad química y mecánica. El tipo de membrana PFSA, que es la más utilizada en pilas PEMFC, tiene algunos inconvenientes como (Y. Wang et al., 2020):

- ✓ Altos costos asociados a la necesidad de humedecer los gases por la alta conductividad de los protones bajo un estado de hidratación.

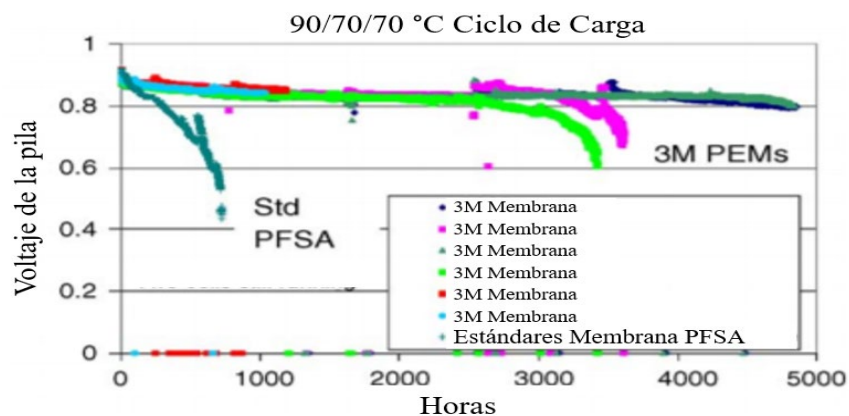
- ✓ Los cationes metálicos pueden atacar las cadenas del polímero y afectar sus propiedades.

- ✓ Puede haber falla en la membrana si hay ciclos de hidratación porque se hinchan y se encogen, esto se puede compensar con refuerzos, pero elevarían los costos.

Como resultado de estos inconvenientes en los últimos años se originan otros estudios, pero esta vez enfocados en el diseño de combinaciones de materiales alternativos para la membrana que puedan superar estos limitantes para que soporten 0% de humedad relativa y adicionalmente fuertes condiciones como altas y bajas temperaturas, sin perder sus propiedades de conductividad y estabilidad. Las respuestas a estas necesidades han mostrado opciones de materiales para el electrolito de polímero sólido que no han sido tan aceptables porque, aunque proporcionan las ventajas de bajo costo y de no tener la necesidad de hidratación, las condiciones de conductividad y estabilidad se ven comprometidas (Y. Wang et al., 2020). Pese a esto la introducción de nuevos desarrollos tecnológicos en membranas con nuevas consideraciones ha presentado la ventaja de mejorar la durabilidad como se observa en la **figura 44**. Algunos ejemplos de estos materiales son los “biphenyl sulfone systems” y “polyphenylene sulfone copolymers”. Por otra parte, el control del sistema de manejo del agua en la pila limita su eficiencia y el funcionamiento operacional de éstas debe cubrir rangos amplios de temperaturas (Chalk y Miller, 2006).

Figura 44

Vida útil mejorada por cambio de materiales de la membrana



Nota. Al cambiar el material de la membrana se maximiza la vida útil. PFSA: Membranas de ácido perfluorosulfónico; PEM: Membrana de intercambio de protones. Tomado de *Key challenges and recent progress in batteries, fuel cells, and hydrogen storage for clean energy systems*, Chalk y Miller, 2006, *Journal of Power Sources*

Se puede inferir entonces que, es primordial consecuentemente revisar los materiales, el control operacional y el diseño, para mejorar los costos sin afectar la operatividad de la pila. A la par, internamente confluyen muchos factores que también trabajan en la eficiencia de conversión energética y que, mediante el estudio de las reacciones electroquímicas, las transferencias de masa y calor y la conducción iónica y electrónica, podrían maximizarla (Y. Wang et al., 2020).

En la **tabla 17** se incorporan algunos datos de las pilas combustibles, sus valores actuales y los valores deseados de estos mismos a un futuro en dos casos, uno pesimista y otro optimista. Entre éstos, los más destacados son los aspectos asociados al stack como el manejo del agua y de energía, las especificaciones de las diferentes capas y finalmente las eficiencias (Miotti et al., 2017).

Tabla 17*Datos técnicos de las pilas combustibles a futuro*

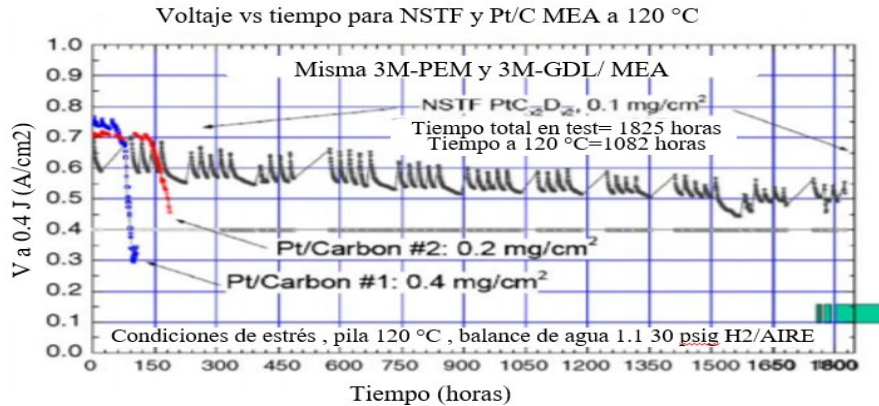
Parámetro	Actual	2030 conservativo	2030 optimista
Volumen de producción	200 por año	1000 por año	500000 por año
Capa de catalizador	0.4 mg/cm ² Pt in las partículas Pt/C	0.2 mg/cm ² Pt in las partículas Pt/C	0.1 mg/cm ² Pt in las partículas Pt/C
Membrana	PFSA/Nafion	Grosor reducido a 17.5 μm, con mejora de rendimiento y temperatura	Polibencimidazol (PBI), con mejora de rendimiento y temperatura y además costos reducidos.
Capa de difusión de gas	Capa macroporosa de sustrato de carbono no tejido de 0.28 mm con capa microporosa de PTFE y negro de humo de 0.04 mm	Capa macroporosa de sustrato de carbono no tejido de 0.15 mm con capa microporosa de PTFE y negro de humo de 0.04 mm	Capa macroporosa de sustrato de carbono no tejido de 0.08 mm con capa microporosa de PTFE y negro de humo de 0.02 mm
Placas bipolares	Placas de grafito moldeadas por inyección de 1.5 mm de espesor (3 mm combinadas), juntas de refrigerante moldeadas por inyección	Placas de acero inoxidable de 0.152 mm de espesor, recubiertas de TiN, juntas de refrigerante serigrafiadas	Placas de acero inoxidable de 0.12 mm de espesor, recubiertas de TiN, juntas de refrigerante serigrafiadas
Manejo de aire	Motor de compresión-expansión para operación a 2 bar	Motor mejorado que opera a 2 bar	Motor mejorado y más pequeño que opera a 1.5 bar
Manejo del agua	Humidificador usando los tubos de PFSA	Humidificador simple sin Nafion, operando a temperatura mayor a 373 K	No necesidad de preenfriador o humidificador
Manejo del calor	Radiador y líquido anticongelante	Unidad pequeña	Unidad más pequeña
Máxima eficiencia (%LHV)	58	62	64
Densidad de potencia (Mw/cm ²)	1060	1310	1625
Tanque de hidrógeno	Tanque gaseoso simple de 700 bar	Tanque gaseoso simple de 700 bar, 15% menos de consumo de material	Tanque gaseoso simple de 700 bar, 30% menos de consumo de material

Nota. Tomado de *Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles*, Miotti et al., 2017, *International Journal of Life Cycle Assessment*

Aparte de lo anteriormente mencionado, se han realizado evaluaciones de productividad de la pila combustible que señalan que se reduce después de 1000h y que los principales orígenes de esta disminución son las variaciones en el potencial y los niveles de humedad en ésta, que causan estrés químico y físico principalmente en la membrana causando fallo antes de lo esperado (5000h) (Chalk y Miller, 2006), se ejemplifica en la **figura 45**.

Figura 45

Reducciones en la productividad por variaciones de potencial



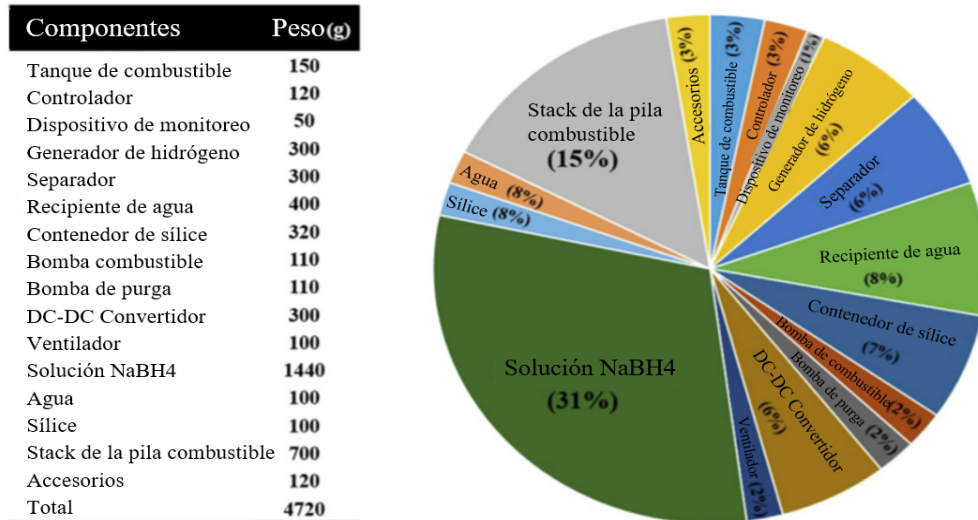
Nota. GDL: Capa de difusión de gas; PEM: Membrana de intercambio de protones; MEA: Conjunto de electrodos y membrana; NSTF: Película fina nanoestructurada. Tomado de *Key challenges and recent progress in batteries, fuel cells, and hydrogen storage for clean energy systems*, Chalk y Miller, 2006, *Journal of Power Sources*

Como conclusión, existen numerosas condiciones que alteran el modo de funcionamiento de las PEMFC, cambiar los materiales de la membrana, estudiar el funcionamiento del electrocatalizador, evaluar el manejo del agua y analizar la degradación y la contaminación del reactivo y membrana son cuestiones fundamentales. La meta final es conseguir alta conductividad a baja humedad y temperaturas por encima de 120 °C con costos reducidos, sin comprometer la estabilidad mecánica y química de la pila (Y. Wang et al., 2020).

4.3.2 Dispositivos, materiales y sus pesos. Por parte de una ejemplificación del peso de los diferentes equipos que conforman la infraestructura de un medio de transporte eléctrico a base hidrógeno, se tiene que para este estudio justamente el peso de la pila es de 700 g, correspondiente a un 15 % de todo el sistema de potencia eléctrica. Además, el peso del tanque es de 150 g y el del generador de hidrógeno 300 g con 3% y 6 % de aporte al peso total (Ogungbemi et al., 2020). Lo interesante aquí es el análisis de los porcentajes de cada dispositivo a comparación del total. En la **figura 46** se identifica de forma general el peso que podría llegar a tener cada componente del sistema de generación eléctrica para una planta portable y de la cual se extrajo la anterior información.

Figura 46

Equipos en un medio de transporte con pila combustible y su peso



Nota. Tomado de Selection of proton exchange membrane fuel cell for transportation, Ogungbemi et al., 2020, International Journal of Hydrogen Energy

En la siguiente **tabla 18** se resume otro diseño, donde se encuentra contenida información del stack de una pila para un medio de transporte llamado cargobike que necesita una pila de 200 W, en la tabla se muestra las partes de la pila y del material o metal del que están compuestas con sus respectivos pesos. Se destaca que las partes más pesadas son las que contienen algún metal en su contenido como la bomba, la caja de metal, los componentes eléctricos y las válvulas. Aparte, en la tabla también se muestra el peso de los materiales que pueden ser dispuestos y los que pueden ser reciclados (Garraín y Lechón, 2014).

Tabla 18*Partes del stack de la pila combustible para cargobike 200W*

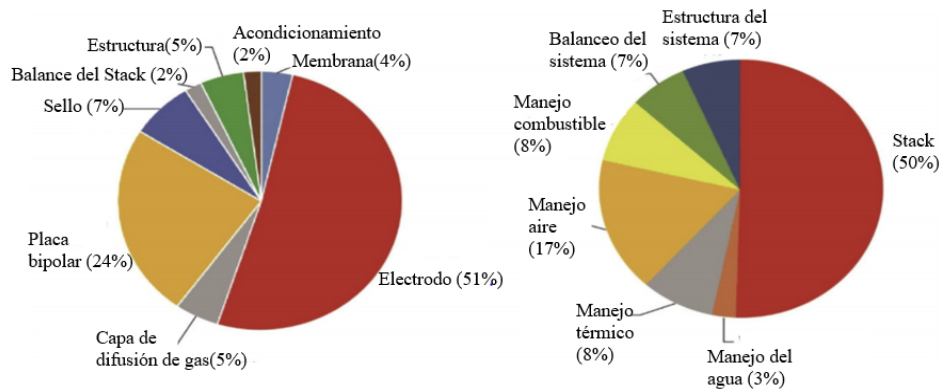
Estructura y manufactura de la pila combustible		
Entradas		
Partes del Stack de la pila combustible	Materiales	Cantidad (Kg)
Electrodo	Papel de carbono poroso	0.006
Sellos	EPDM	0.004
Placa de circuito	Pertinax, estaño	0.55
Cable	PVC/cobre	0.5
Catalizador	Platino dispersado, polvo de carbono y partículas de politetrafluoroetileno	0.0005
Tornillos	Acero	0.3
Conectores	Plástico	0.15
Tubos	Plástico	0.2
Membrana	Nafión	0.0005
Disipador de calor	Aluminio	0.4
Válvulas	Acero, plástico y cobre	0.5
Placas de campo de flujo	Grafito	0.6
Bomba	PEEK, Aluminio, cobre	1.2
Caja de metal	Hoja de acero	1
Ventilador	Plástico	0.6
Componentes electrónicos	No conocido	0.7
Consumo energético	Cantidad (MJ)	
Electricidad (estructura)	4.00	
Combustible (acondicionamiento)	8.33	
Consumo de agua	Cantidad (m3)	
Agua (refrigeración)	0.005	
Materiales	Cantidad (Kg)	
Disposición	1	
Reciclar (C, Al, Fe, Cu)	5.7	
Transporte	Cantidad (Km)	
Disposición	3	
Reciclar	No conocido	

Nota. Adicional se representa el posible consumo energético y de agua para el funcionamiento para dicho medio de transporte en particular. EPDM: monómero de etileno propileno dieno; PEEK: polieteretercetona. Tomado de *Exploratory environmental impact assessment of the manufacturing and disposal stages of a new PEM fuel cell*, Garraín y Lechón, 2014, *International Journal of Hydrogen Energy*

4.3.3 Costos. En la **figura 47** se abordan datos de costos para una PEM de 80 kW en función de cada uno de los elementos de la pila, como se puede diferenciar en la parte izquierda casi un 51% de los costos está relacionado con el electrodo. En el diagrama de la parte derecha está además la relación de costos de cada uno de los procesos que ocurren en la pila siendo el manejo del aire y del calor los de mayor correspondencia porcentual con 17% y 8% (Ogungbemi et al., 2020).

Figura 47

Costos asociados a una PEMFC



Nota. El mayor costo asociado viene por parte del electrodo. Tomado de *Selection of proton exchange membrane fuel cell for transportation*, Ogungbemi et al., 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*

4.3.4 Dimensión ambiental de los materiales, elementos y procesos incluidos. Con respecto a los parámetros ambientales de como tal la manufactura y la disposición de los diferentes elementos que conforman una **pila PEMFC** (se toma como referencia la pila PEMFC descrita en la tabla 14), en la **tabla 19** se muestra que tienen una asociación directa con el cambio climático, la acidificación, la eutrofización, el deterioro de la capa de ozono, entre otros aspectos, con los valores que se muestran en ésta (Garraín y Lechón, 2014).

Tabla 19

Aspectos ambientales de la manufactura y disposición de los elementos de la pila

Categoría de impacto	Unidad	Valor/Km
Cambio climático	G CO2 eq	2.49E+00
Uso de energía fósil	MJ	4.50E-02
Acidificación	Kg SO2 eq	3.36E-05
Eutrofización	Kg PO4(3-) eq	1.53E-06
Depleción de la capa de ozono	Kg CFC-11 eq	6.72E-10
Oxidación fotoquímica	Kg C2H4 eq	2.23E-06

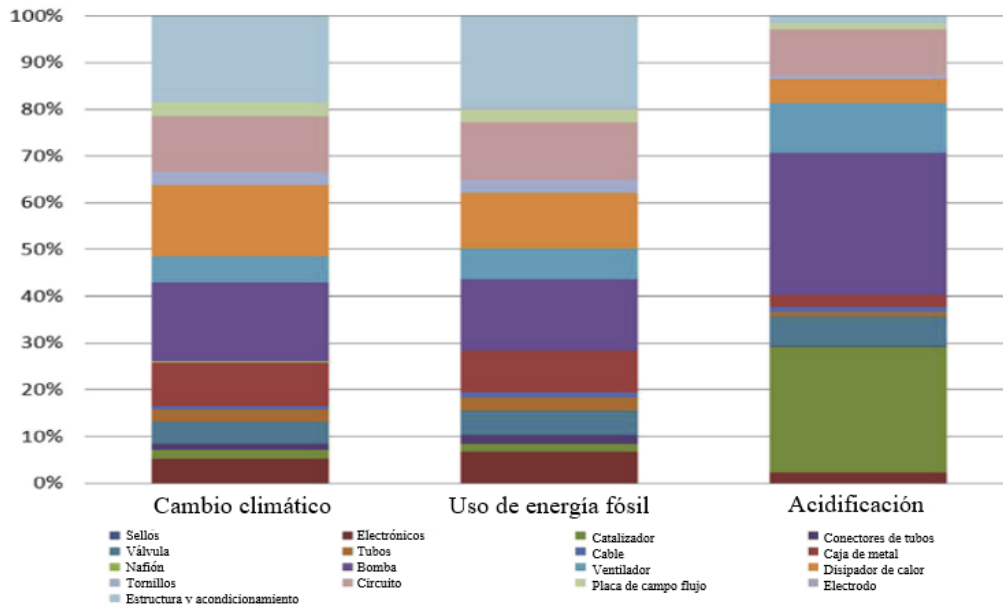
Nota. Tomado de *Exploratory environmental impact assessment of the manufacturing and disposal stages of a new PEM fuel cell*, Garraín y Lechón, 2014, *International Journal of Hydrogen Energy*

De estos impactos, los más destacados son el cambio climático, el uso de combustibles fósiles y la acidificación. Los efectos en el cambio climático y en el uso de energía fósil son causados principalmente por los materiales en su mayoría de la bomba, del disipador de calor y del

circuito y en la acidificación influye los de la bomba y el catalizador. En el caso de la bomba, ésta está constituida por aluminio, plástico y cobre, el disipador de calor por aluminio, el circuito por una resina y los catalizadores por platino (Garraín y Lechón, 2014). En la **figura 48** se representa los efectos en porcentaje de cada uno de los elementos de la pila en las tres escalas ambientales mencionadas.

Figura 48

Efectos ambientales de los elementos de la pila

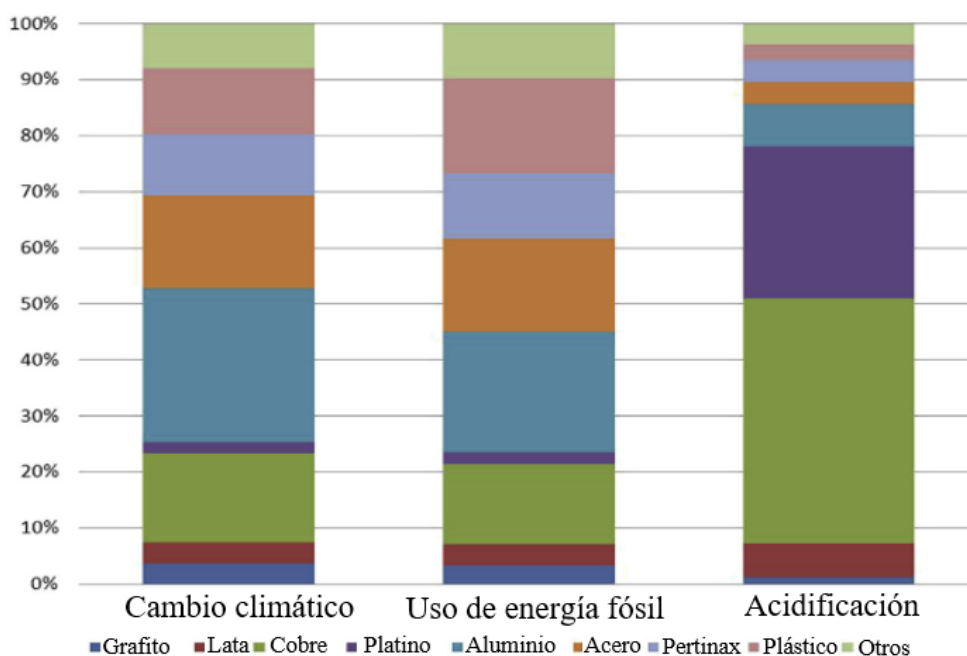


Nota. Tomado de *Exploratory environmental impact assessment of the manufacturing and disposal stages of a new PEM fuel cell*, Garraín y Lechón, 2014, *International Journal of Hydrogen Energy*

La **figura 49** se enfoca ya principalmente en los materiales, muestra que los metales y los plásticos contribuyen principalmente al deterioro ambiental asociado, dentro de los metales el cobre es el de mayor contribución a la acidificación y para este mismo factor el platino de los catalizadores, que a pesar de formar parte en una pequeña escala en masa, el impacto que desarrolla es del 25% por el proceso de extracción que genera emisiones de óxidos de sulfuro (Garraín y Lechón, 2014). Al mismo tiempo en la gráfica se interpreta que para el cambio climático y el uso de energía fósil el aluminio y el acero son dos materiales limitantes.

Figura 49

Plásticos y materiales que causan impacto ambiental

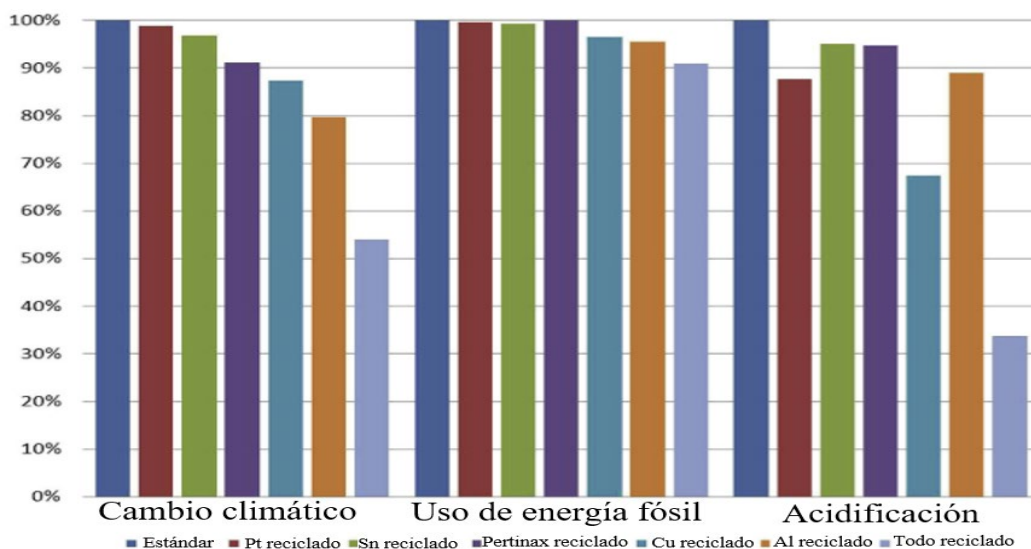


Nota. Tomado de *Exploratory environmental impact assessment of the manufacturing and disposal stages of a new PEM fuel cell*, Garraín y Lechón, 2014, *International Journal of Hydrogen Energy*

Desde otro ángulo, si se considera reciclar las partes que contienen metales como el platino, otros escenarios serían planteados. Por ejemplo, si se consiguiera reciclar aproximadamente el 75% de platino, según el análisis se estimaría un 20% de reducción en algunos de los efectos ambientales asociados. En la **figura 50** se muestra diferentes escenarios de reducción porcentual en el cambio climático, manejo de recursos fósiles y acidificación debido a la consideración de los reciclajes de los distintos metales comprometidos en la fabricación de los elementos de la pila. Adicionalmente, se distingue que si se reciclan todos los metales se podría conseguir hasta una reducción de un 45% para GHG, del 65% en el uso de recursos fósiles y un 80% en la acidificación (Garraín y Lechón, 2014). Así mismo, se resalta que los metales más importantes de reciclar son el platino y el cobre para la acidificación.

Figura 50

Reciclaje de los metales y su efecto



Nota. Reducción importante de impacto ambiental en las tres categorías si hay reciclaje de todos los metales. Tomado de *Exploratory environmental impact assessment of the manufacturing and disposal stages of a new PEM fuel cell*, Garraín y Lechón, 2014, *International Journal of Hydrogen Energy*

Por lo tanto, en el momento de estudiar los efectos ambientales, especial interés cobran ciertos grupos, algunos de ellos son:

✓El platino, que en su mayoría se fabrican en Sudáfrica (68%), generan impactos por las emisiones de óxido de nitrógeno, fluoruro de hidrógeno y dióxido de azufre desprendidas al aire durante las etapas de purificación pirometalúrgica e hidrometalúrgica en su cadena productiva (Duclos et al., 2017). A manera de ejemplificación, en la extracción de 1 kg de platino se produce 0,5 kg de paladio, 0,1 kg de rodio, 300 kg de níquel y 200 kg de cobre (Pehnt, 2001).

✓El grafito, que es un mineral usado en las placas de campo de flujo, se puede producir mediante dos caminos, el grafito natural y el grafito fabricado que nace a partir de precursores como el coque y la brea. El problema de éstos es el gran consumo energético basado en recursos fósiles, hasta 160 MJ/ Kg de grafito (Pehnt, 2001).

✓La membrana, donde una de las opciones existentes es la conformada por copolímeros de trifluoroestireno y trifluoroestireno sustituido (PTFE); en su proceso productivo se integra pasos como la obtención del monómero, una polimerización, la extracción líquido-sólido, el secado y finalmente la reacción con SO₃ en solventes orgánicos (Pehnt, 2001). La otra opción es el tipo de

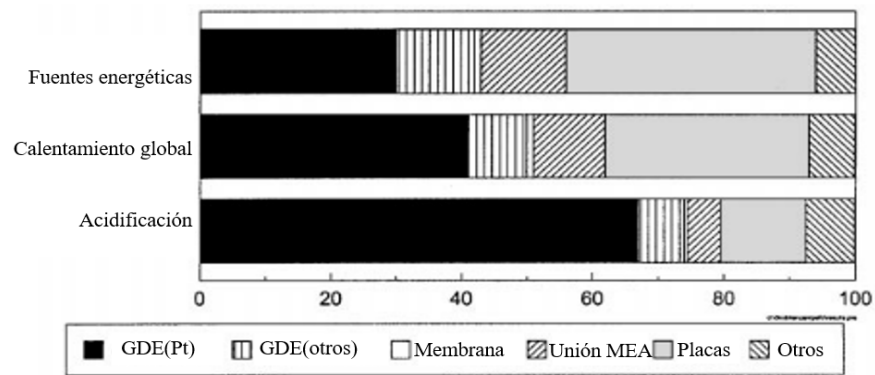
membrana PFSA, que es la de mayor utilización actualmente, pero se incurre en mayor deterioro ambiental.

✓ Los materiales con base a fibras de carbono con el poliacrilonitrilo (PAN) como precursor.

a. Efectos ambientales durante el proceso de producción de la pila. Incluyendo conjuntamente toda la información de materiales y focalizándose como tal en términos del proceso de producción de una pila combustible, se conoce que se sigue un paso a paso, entre los cuales está la producción del electrodo de difusión de gas (GDE), incluida la aplicación del catalizador; la producción de la membrana; la unión de GDE y membrana; la fabricación de la placa bipolar y por último el montaje de la pila (Pehnt, 2001). En cada uno de estos pasos el estudio ambiental analiza las entradas requeridas (energía, materiales, sustancias auxiliares), como también las emisiones directas durante la producción. El análisis de cada etapa da como resultado su porcentaje de contribución como se ve en la **figura 51**.

Figura 51

Etapas de producción de la pila y su efecto ambiental



Nota. Mayor porcentaje de afectación por parte de las etapas de fabricación de GDE y las placas. GDE: electrodo de difusión de gas; MEA: conjuntos de electrodos de membrana. Tomado de *Life-cycle assessment of fuel cell stacks*, Pehnt, 2001, *International Journal of Hydrogen Energy*

Principalmente, de este análisis los resultados que son obtenidos son que el electrodo de difusión de gas causa el 74% de la acidificación y más de la mitad de las emisiones de gases del calentamiento global, esto principalmente al platino. Por otra parte, y pese a tener bajo peso, las fibras de carbono causan del 5 al 7% de los impactos por el gasto energético del proceso de

producción para el precursor de PAN. El segundo componente de importancia ambiental es la placa de campo de flujo, por la entrada de electricidad en el proceso para la impregnación de resina de la placa. La membrana es, desde un punto de vista ecológico, un elemento de la pila que no tiene muchos efectos por no requerir gran consumo energético y además por la posibilidad de reciclaje (Pehnt, 2001).

A lo largo de la cadena productiva de la pila se puede mejorar estos efectos adversos mediante el logro de:

- ✓La reducción de la cantidad de grupos de platino, alcanzando valores entre 1 y 0.3 mg/cm² para las futuras generaciones de pilas.

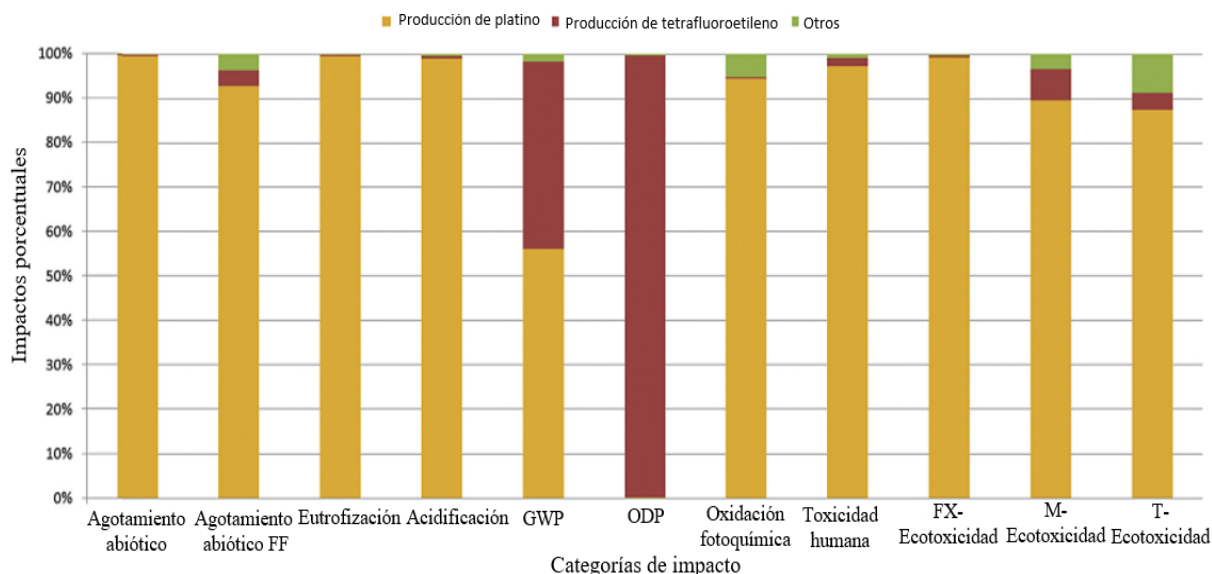
- ✓La depositación selectiva de la tinta del catalizador y así reducir el desperdicio y generar un aprovechamiento del 99% del platino.

- ✓El reciclaje de catalizadores, que ofrece una disminución de los impactos ambientales de la producción, en un factor de 20 para la utilización energética y de 100 para emisiones de SO₂ (Pehnt, 2001).

Los resultados anteriores toman como referencia un tipo de membrana PTFE, pero si por el contrario se toma el **tipo PFSA**, algunos de los porcentajes concernientes a lo ambiental varían debido a que este tipo de membrana ya tiene otras implicaciones. En una pila con membrana PFSA, el segundo elemento más contaminante es dicha membrana por la producción de tetrafluoroetileno, la contribución al deterioro varía entre el 40% a 99% dentro de las diferentes variables ambientales a analizar, como se observa en la **figura 52** (Duclos et al., 2017).

Figura 52

Impactos de una pila con membrana PFSA



Nota. El platino tiene la mayor influencia en la mayoría de los impactos, exceptuando en la depleción de la capa de ozono. GWP: Global warming potential; ODP: Ozone layer depletion. Tomado de *Environmental assessment of proton exchange membrane fuel cell platinum catalyst recycling*, Duclos et al., 2017, *Journal of Cleaner Production*

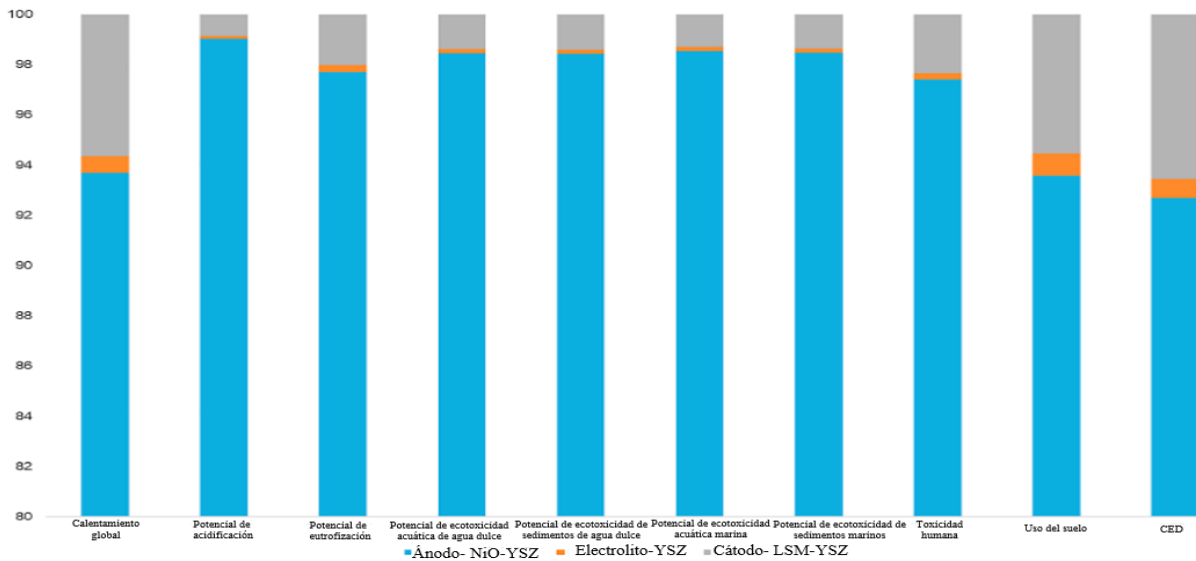
b. Pilas SOFC. En el caso de que no fuera como tal una pila PEMFC sino el **tipo SOFC** varía el análisis de ciclo de vida por la variación de los compuestos y elementos de la pila. En este tipo de pila el ánodo se conforma de NiO, YSZ gruesa y YSZ fina; el electrolito de ZrO₂ y finalmente el cátodo nace a partir de los polvos LSM (La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃) y YSZ.

Como resultado ambiental, se observa en la **figura 53** que el ánodo de esta clasificación de pila le corresponde los mayores efectos por contaminación del suelo por metales pesados, por la reducción de la biodiversidad y la lluvia ácida, dentro del ánodo el uso de NiO genera el 89% del potencial de acidificación, el 78% de potencial de eutrofización, el 86% de potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce, 81% de potencial de toxicidad humana, 88% de potencial de ecotoxicidad acuática marina, 86% de potencial de ecotoxicidad de sedimentos de agua dulce, 87% potencial de ecotoxicidad de sedimentos marinos y desde el punto de vista del uso de YSZ en este mismo componente se incluyen efectos en un 55% al calentamiento global, un 58% a la demanda de energía acumulada y un 61% a el uso de la tierra. En cuanto a la utilización de ZrO en YSZ conlleva resultados de 56% para calentamiento global, un 44% para acidificación, 59% para eutrofización, 60% para potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce, 61% de potencial de

ecotoxicidad acuática marina, 61% de potencial de ecotoxicidad de sedimentos de agua dulce y 61% potencial de ecotoxicidad de sedimentos marinos (Smith et al., 2019). Todo esto es posible observarlo en la **figura 53**.

Figura 53

Pilas de SOFC y los impactos ambientales de sus componentes



Nota. En este caso, para las pilas SOFC, el ánodo NiO-YSZ es aquel elemento de mayor contaminación en los diferentes factores. CED: Demanda energética acumulada; LSM: manganita de lantano dopada con estroncio; YSZ: circonio estabilizado con itrio. Tomado de *Comparative environmental profile assessments of commercial and novel material structures for solid oxide fuel cells*, Smith et al., 2019, *Journal of Cleaner Production*.

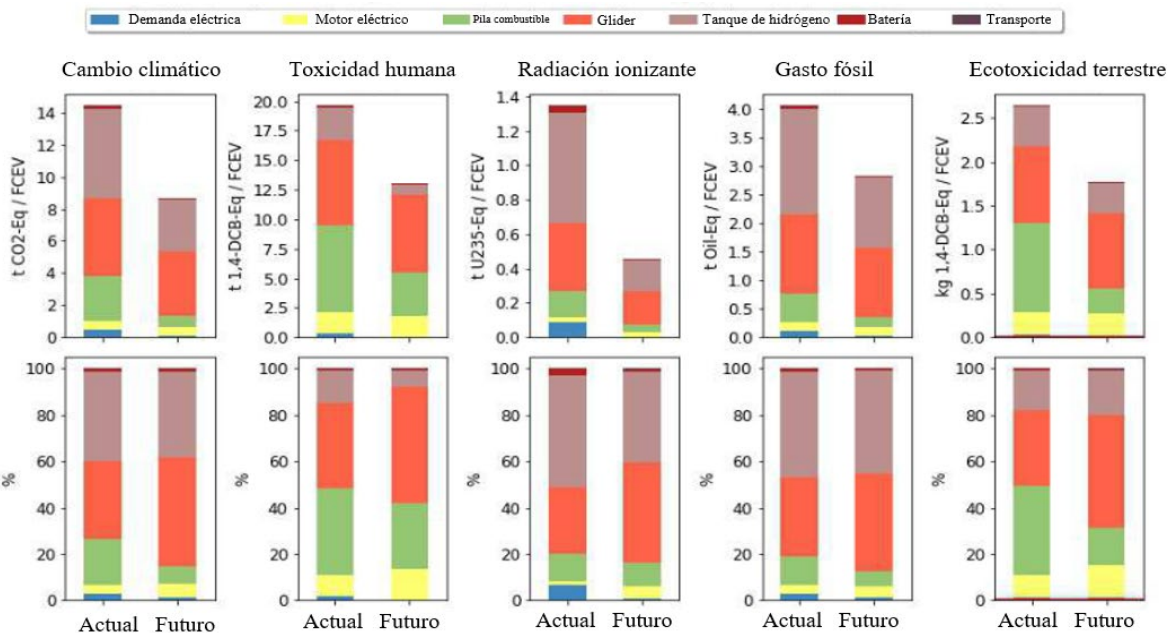
4.4 Contribución al impacto ambiental de los elementos de la estructura de un vehículo a base hidrógeno

Al analizar cada elemento constituyente de un vehículo con pila de hidrógeno, se desencadenan efectos a distintos parámetros ambientales. La **figura 54** resume todas estas características. El primer aspecto es el cambio climático, donde los elementos que juegan un rol importante son la pila combustible, el tanque de hidrógeno con un 38% y el glider; en la toxicidad humana son los mismos aspectos los de influencia, pero en este caso tomando una mayor predominancia la pila por la extracción de platino y el glider, debido que el tanque en este caso tiene una influencia del 14%. Para la radiación ionizante el tanque representa un 48%, es decir, aumenta su impacto en este caso y los otros factores se ven reducidos. Por la parte de la utilización de recursos fósiles, el tanque aporta el 45% debido a que los materiales presentes requieren en su

producción alto gasto energético. Adicionalmente, en el stack de la pila las capas de difusión de gas incorporan materiales que añaden consecuencias en la ecotoxicidad terrestre, en este caso únicamente la pila aporta el 39%, en contraposición está el tanque que aporta a este factor el 17% (Benitez et al., 2021).

Figura 54

Impactos de la fabricación de un HFCV aportados por cada uno de sus elementos estructurales



Nota. FCEV: Vehículos eléctricos con pila combustible. Tomado de *Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on type IV carbon fiber hydrogen tank*, Benitez et al., 2021, *Journal of Cleaner Production*

Al revisar también las gráficas se puede interpretar que el motor eléctrico, la demanda eléctrica y la batería son los de menor aporte a el deterioro ambiental.

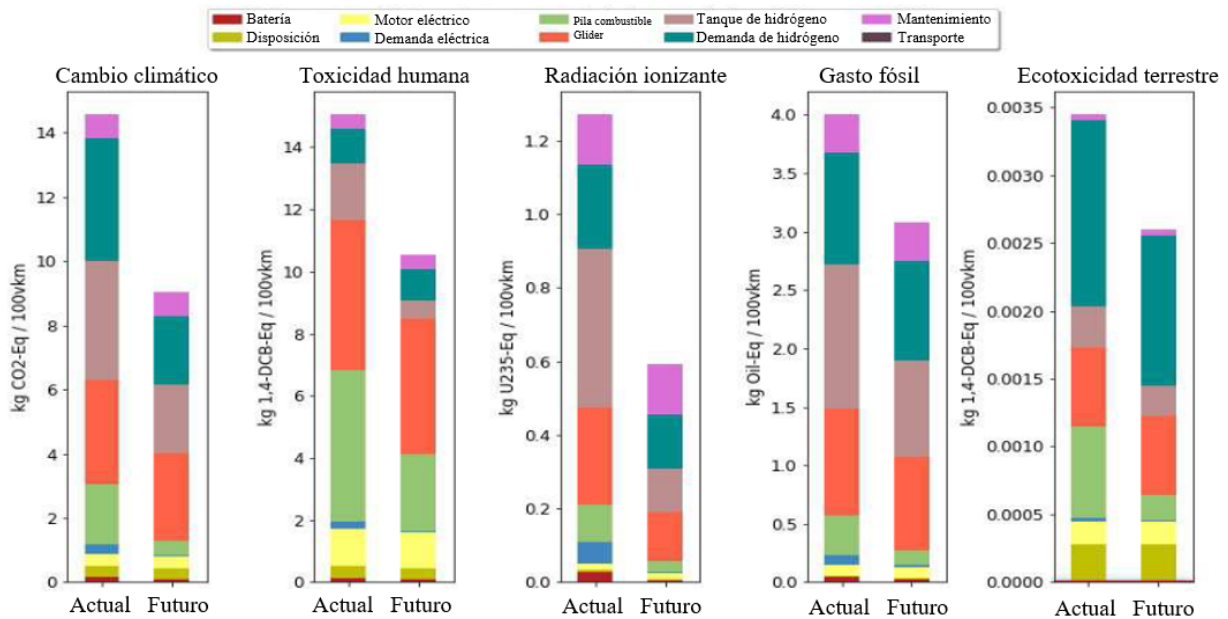
4.5 Fase de uso de FCEV y su efecto ambiental

En el análisis de esta fase gran variedad de puntos de vista son ofrecidos según las numerosas investigaciones existentes. En algunas las conclusiones obtenidas son que se plantean las cero emisiones en el funcionamiento del medio de transporte porque no interviene ninguna reacción que aporte ni dióxido de carbono ni otros contaminantes directamente, ya que toman la parte de la necesidad de combustible como efectos en producción. En otros análisis ya entran en relevancia los conceptos de necesidad de hidrógeno (esta vez sí incluyen los impactos en la fase de

uso de un FCEV) y el transporte de éste, el mantenimiento de los vehículos y la disposición. Para estos últimos, lo más importante es contabilizar los efectos de la demanda de hidrógeno; ésta causa el 26% del calentamiento global, el 23% del uso de combustible fósil, un 18% de la ecotoxicidad terrestre y un 7% en la toxicidad humana. Seguido de este parámetro fundamental, continúan teniendo importancia el tanque de almacenamiento y el glider en esta etapa y por otra parte, el mantenimiento y la disposición son dos factores, que al contrario de lo esperado, no superan en ninguna categoría el 10% de influencia (Benitez et al., 2021). Ver **figura 55**.

Figura 55

Impactos ambientales de diferentes aspectos en la etapa de uso de un FCEV



Nota. Tomado de Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on type IV carbon fiber hydrogen tank, Benitez et al., 2021, Journal of Cleaner Production

5. COMPARACIÓN ENTRE MOTORES DE COMBUSTIÓN Y PILAS COMBUSTIBLES DE HIDRÓGENO

Lo que procede como última fase en el análisis técnico-ambiental es realizar una comparación entre los mecanismos de movilidad que se sirven mediante motores a gasolina tradicionales y los que utilizan hidrógeno para establecer mayores condiciones evaluativas que permitan tener una perspectiva completa. Al igual que en el anterior capítulo, por el hecho de tomar en cuenta numerosos estudios, cabe resaltar que los datos numéricos presentados pueden variar de investigación a investigación, según las distintas consideraciones y perspectivas de análisis en cada uno de ellas.

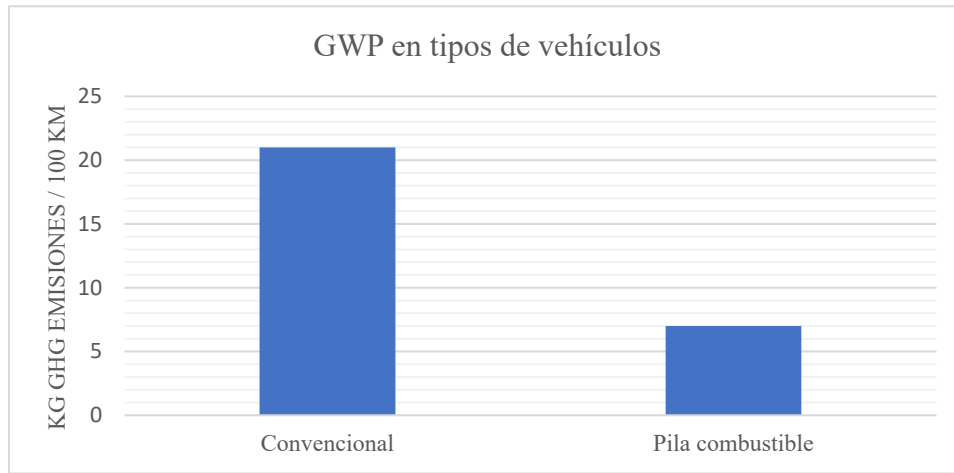
5.1 A nivel ambiental

Inicialmente se tratarán cada uno de los aspectos ambientalmente negativos influyentes, originados a partir de los sistemas de transporte. Numerosos estudios de ciclo de vida de ambas tecnologías se incorporaron en esta comparación y en cada uno de ellos los resultados dependieron de los datos asumidos de entrada y de los esquemas que plantearon los autores como guía para analizar y así por ende dar como conclusión la potencialidad o no de la nueva tecnología.

5.1.1 GWP. Debido a que el principal propósito del auge de la incorporación de energías renovables y limpias como el hidrógeno es la reducción de los peligros ambientales, el primer concepto a evaluar son las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO₂. Datos generales señalan que las pilas combustibles de hidrógeno como tecnología atiende a las necesidades con una reducción general (incorporando todos los procesos) en las emisiones de efecto invernadero cercana a un 70%, como se observa en la **figura 56** (Acar y Dincer, 2020).

Figura 56

GHG según el tipo de tecnología

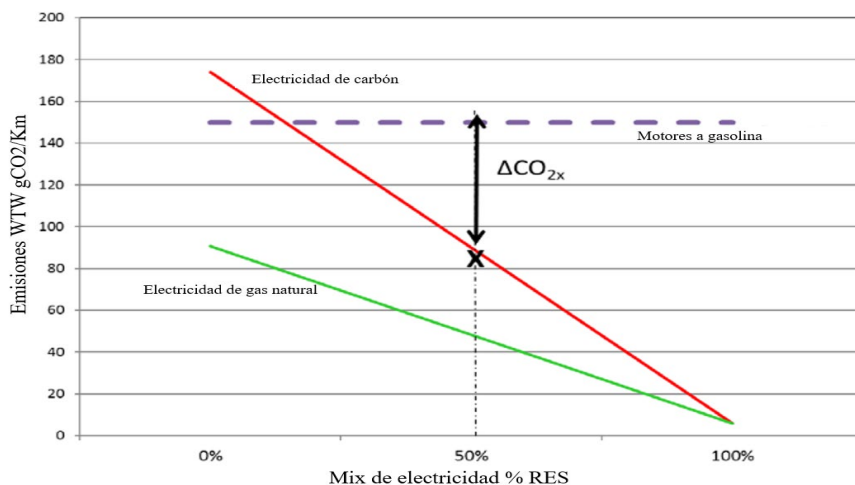


Nota. GWP: potencial de calentamiento global. Tomado de *The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming*, Acar y Dincer, 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*

El proceso de utilización de motores a gasolina genera emisiones a lo largo de toda su cadena productiva, mientras que durante la etapa de funcionamiento de los vehículos eléctricos a base hidrógeno se genera principalmente vapor de agua como subproducto de las reacciones ocurridas en la pila, con lo cual el pico de emisiones de esta última tecnología se distingue en los primeros procesos de la cadena del hidrógeno; es por esto que la generación de estos contaminantes está estrechamente vinculado con el proceso productivo, ya sea si viene a partir de fuentes renovables o a partir de recursos fósiles, lo anterior planteado se observa en la **figura 57**. En la figura se deduce una relación directamente proporcional, entre menor sea la incorporación de fuentes fósiles en la generación de hidrógeno menor será el impacto (Ajanovic y Haas, 2019).

Figura 57

Emisiones según porcentaje de introducción de energías renovables

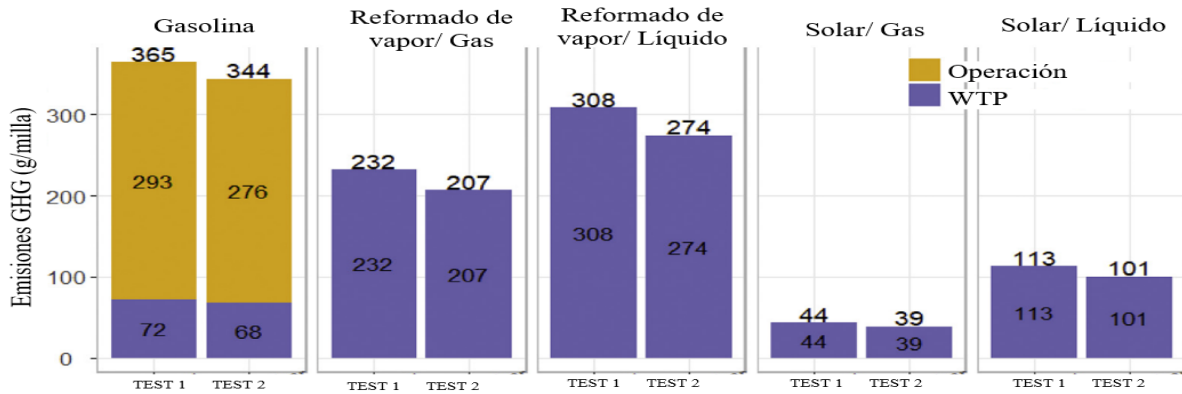


Nota. Entre mayor es el porcentaje de utilización de energías renovables, mayor será la reducción de emisiones de CO₂. RES: Energías renovables incorporadas. Tomado de *Economic and Environmental Prospects for Battery Electric- and Fuel Cell Vehicles: A Review*, Ajanovic y Haas, 2019, *Fuel Cells*

En la siguiente **figura 58**, adicional a lo anterior se puede visualizar las emisiones asociadas al proceso convencional con motores a gasolina y al uso de pilas combustibles de acuerdo a diferentes formas de producción. De las gráficas se puede extraer que las mayores emisiones corresponden al proceso de utilización de motores a gasolina por la quema del combustible en la operación del vehículo (80-90%) y desde otra perspectiva, en la utilización de pilas combustibles se generan en la parte inicial (WTP), que engloba la producción, el transporte y el almacenamiento de hidrógeno y la manufactura del vehículo como tal. En la figura se distingue también que dentro de las tecnologías de hidrógeno el proceso de reformado por vapor de metano es el mecanismo mayor causante de efectos negativos en términos de emisiones de gases de efecto invernadero y las tecnologías de mayor beneficio ambiental están asociadas a la producción de hidrógeno por medio de energías renovables como por ejemplo mediante vía solar, que como ya se ha mencionado es una de las técnicas más prometedoras a futuro para generar electricidad, que posteriormente mediante la electrolisis permitirá producir éste. Añadido a esto, en la utilización de hidrógeno en forma gaseosa se delimitan mayores ventajas que en la forma líquida (Liu et al., 2020). Por ende, las reducciones de emisiones GHG oscilan entre 16% y 88%, dependiendo la opción de hidrógeno.

Figura 58

GHG dependiente del tipo de sistema de producción de hidrógeno



Nota. Cantidad de CO₂ según etapa del proceso (WTP y operación) y tecnología de producción. GHG: gas de efecto invernadero; WTP: Well to pump. Tomado de *Comparison of well-to-wheels energy use and emissions of a hydrogen fuel cell electric vehicle relative to a conventional gasoline-powered internal combustion engine vehicle*, Liu et al., 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*

En la **tabla 20** se muestra otra ejemplificación, mostrando las emisiones comparativamente entre los mecanismos convencionales con otros tres procesos de utilización de pilas de hidrógeno mediante tres diferentes mecanismos de producción, el primero es electricidad por medio de energía nuclear, el segundo es electricidad generada por 50% de energía renovable y 50% por gas natural y el tercero es todo producido a través de gas natural (Granovskii et al., 2006). En este análisis concretamente se involucran las etapas de manufactura y de utilización de combustible. Los resultados señalan que cualquier proceso de hidrógeno causa menos impactos que el convencional y en términos generales al igual que en los resultados anteriores, entre mayor sea la utilización de fuentes renovables mayor beneficio ambiental se generará. De la tabla se puede extraer también que los efectos de la etapa de manufactura corresponden solo a una pequeña fracción.

Tabla 20

Total de emisiones incluyendo la etapa de manufactura

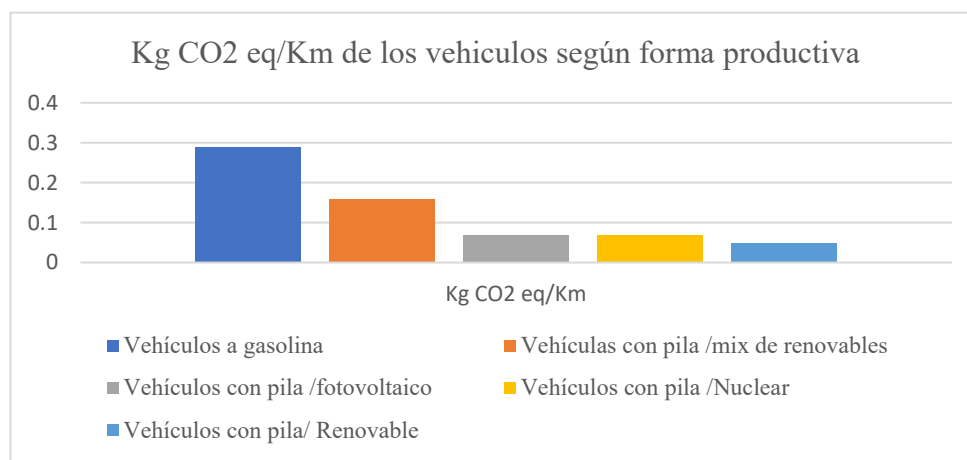
Tipo de vehículo	Etapa de utilización de combustible	Total (incluida etapa de manufactura)
	GHG emisiones (Kg/100 Km)	GHG emisiones (Kg/100 Km)
Convencional	19.9	21.4
PC1	10.2	14.2
PC2	10.6	14.7
PC3	11.1	15.2

Nota. La etapa de manufactura solo aporta un pequeño porcentaje y es mayor en las opciones de hidrógeno. GHG: gas de efecto invernadero. Tomado de *Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles*, Granovskii et al., 2006, *Journal of Power Sources*

En la siguiente **figura 59**, finalmente se resume claramente algunas de las alternativas de producción de hidrógeno con su respectiva producción de GHG desde otra perspectiva y se compara a su vez con la forma convencional de movilidad (Bicer y Dincer, 2018).

Figura 59

Emisiones de CO2 comparativamente entre técnicas y sistemas productivos



Nota. Tomado de *Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles*, Bicer y Dincer, 2018, *Resources, Conservation and Recycling*

Los valores numéricos más bajos de GHG son para los vehículos de hidrógeno de origen 100% renovable con 0.049 Kg CO2 eq/Km. En esencia, para estudiar completamente las emisiones GHG, se deberían realizar unos análisis WTW.

Profundizando más en la parte de manufactura de ambas alternativas, se desarrollan emisiones por las diferentes etapas de fabricación y los elementos integrados. En la **tabla 21** es posible denotar que los vehículos con pilas combustibles generan más impactos hablando de gases

de efecto invernadero y en particular las emisiones de CO₂ se muestran en ella (Granovskii et al., 2006).

Tabla 21

Emisiones en manufactura de los vehículos

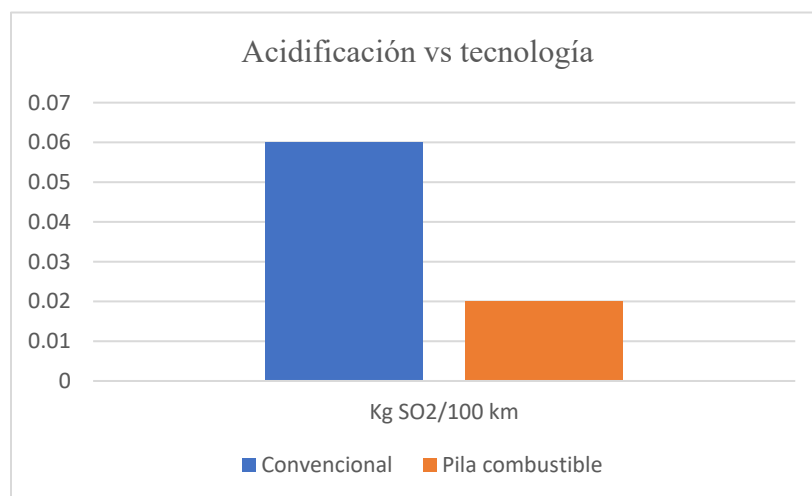
Tipo de vehículo	GHG emisiones (Kg)
Convencional	3595.8
Pila combustible	9832.4

Nota. Las emisiones asociadas a la manufactura de los vehículos con pila combustibles son de más del doble de las de un vehículo convencional a gasolina. GHG: gas de efecto invernadero. Tomado de *Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles*, Granovskii et al., 2006, *Journal of Power Sources*

5.1.2 Acidificación. La acidificación es desencadenada en un 70% debido a la emisión de SO₂ y algunas de las fuentes principales en la opción de los vehículos con pilas de hidrógeno son la producción de electricidad por medio de carbón, un 47% al craqueo de hidrocarburos para producción de hidrógeno y también en un 27% de la utilización de platino y níquel necesarios en la manufactura de las distintas partes. Pese a esto, los vehículos convencionales poseen las más altas emisiones con 0.06 Kg SO₂/Km y las pilas combustibles las menores con 0.02 Kg CO₂/Km (Acar y Dincer, 2020). Estos datos se muestran en la **figura 60**.

Figura 60

Acidificación según tecnología

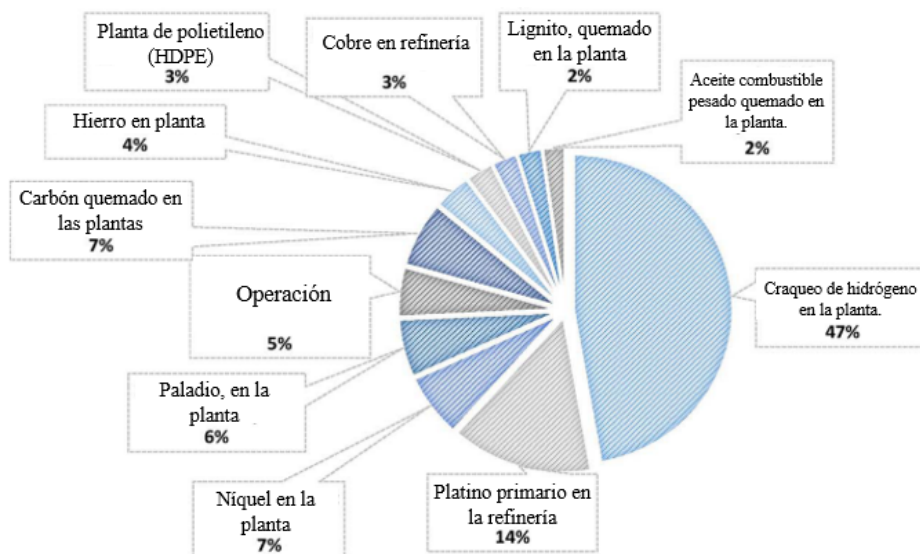


Nota. Tomado de *The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming*, Acar y Dincer, 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*

En la **figura 61** se muestra el porcentaje de contribución de algunos de los elementos y procesos en los vehículos con pila combustible a este criterio:

Figura 61

Contribución de procesos y materiales incorporados en los FCEV en la acidificación

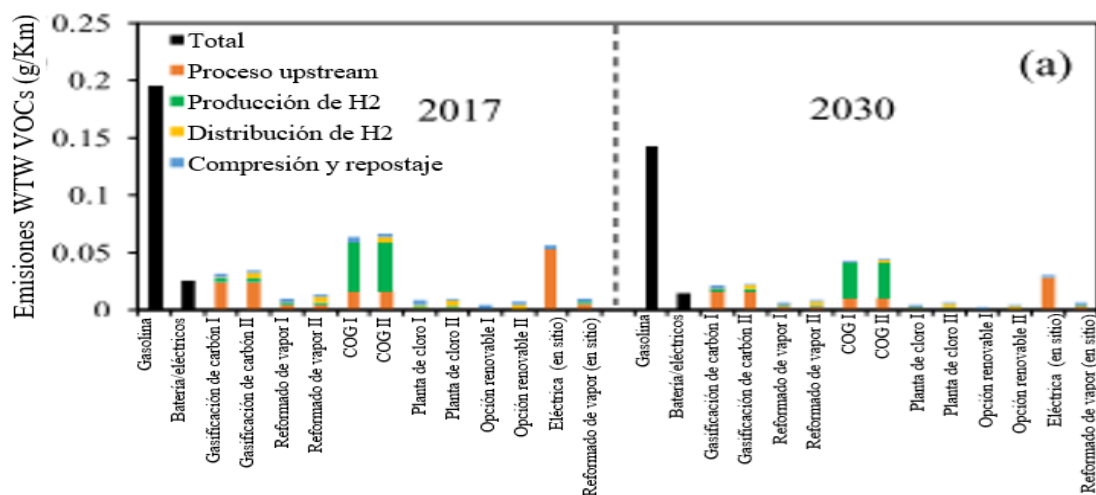


Nota. HDPE: Polietileno a alta densidad. Tomado de *Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles*, Bicer y Dincer, 2018, *Resources, Conservation and Recycling*

5.1.3 VOCs. Los compuestos orgánicos volátiles son un tipo de contaminantes del aire que se ven ampliamente reducidos si se trata de movilidad eléctrica a base hidrógeno a comparación de los transportes a gasolina, la reducción puede oscilar entre 66-96%, dependiendo del tipo de sistema de producción, almacenamiento y distribución del hidrógeno, como se delimita en la **figura 62**. En particular, en la tecnología de hidrógeno, las mayores emisiones corresponden a las plantas de quema de carbón (Q. Wang et al., 2020) y en general, como se denota en las gráficas, en todas las alternativas de HFCV se involucran todos los procesos (“upstream”, producción, distribución y compresión) ya sea en menor o mayor cantidad, con un porcentaje de contribución a los VOC.

Figura 62

Emisiones de compuestos orgánicos volátiles según sistema productivo

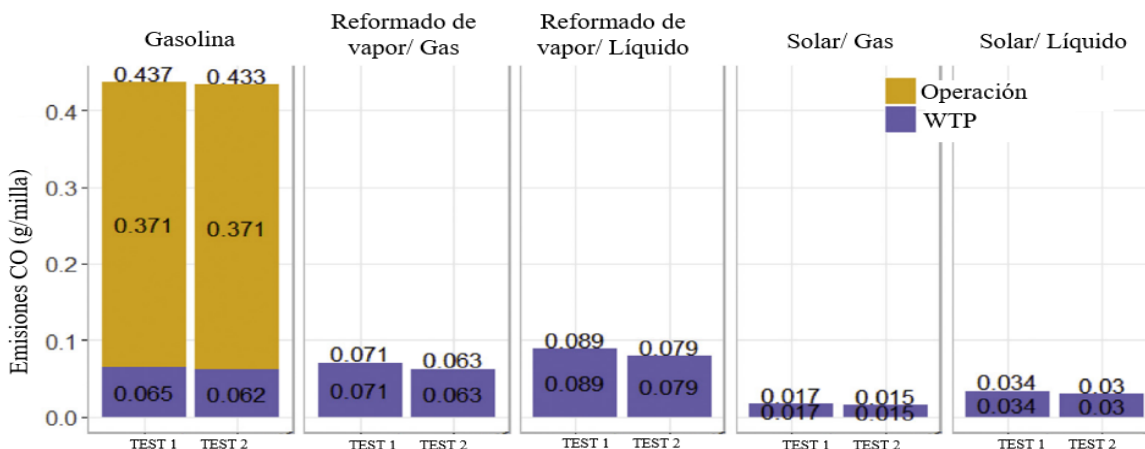


Nota. Comparativa esperada entre los años 2017 y 2030. COG: gas de horno de coque; VOC: Compuestos orgánicos volátiles; WTW: Well to well. Tomado de *Well-to-wheel analysis of energy consumption, greenhouse gas and air pollutants emissions of hydrogen fuel cell vehicle in China*, Wang et al., 2020, *Journal of Cleaner Production*

5.1.3 CO. Por su parte con el monóxido de carbono, al igual que en el dióxido de carbono, las emisiones son elevadas en la operación del vehículo convencional a gasolina (correspondiente a un 85%) y son debidas a una combustión incompleta y para los vehículos con pilas las emisiones se ven reducidas y corresponden únicamente a la parte previa a la operación; en este caso las emisiones se reducen más (hasta un 96% en el mejor caso) que las de dióxido de carbono como se puede denotar en la **gráfica 63** e igualmente depende del mecanismo de producción y de claramente si es de origen renovable (Liu et al., 2020).

Figura 63

Emisiones de metano según tecnología y sistema productivo de hidrógeno

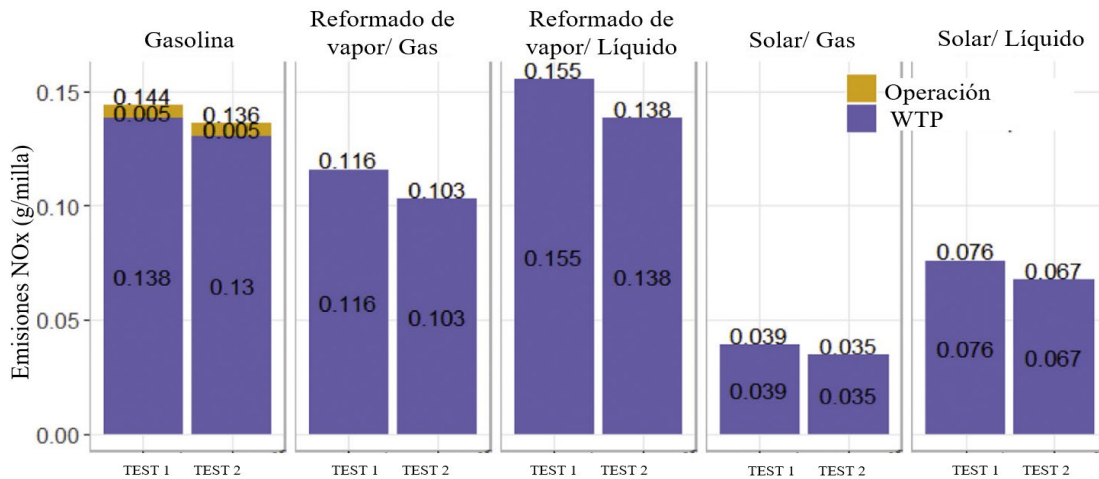


Nota. La etapa de operación aporta la mayoría de las emisiones para la opción a gasolina, emisiones que no estarán en las tecnologías vehiculares que cuentan con hidrógeno como combustible. WTP: Well to pump. Tomado de *Comparison of well-to-wheels energy use and emissions of a hydrogen fuel cell electric vehicle relative to a conventional gasoline-powered internal combustion engine vehicle*, Liu et al., 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*

5.1.4 NOx. En el caso de los NOx, la información y datos obtenidos ya varían con respecto a los anteriores comportamientos. En los motores a gasolina las emisiones no se generan ya en gran porcentaje en la operación, debido a que esto pasaría si existiera un proceso de combustión incompleta, lo cual se evita. Además, la contaminación es particularmente alta en el reformado por vapor de metano con el hidrógeno en forma líquida, incluso más elevada que en el mecanismo a gasolina, la causa de esto es el proceso de licuefacción del H₂. Las menores emisiones son las relacionadas con los HFCV por parte de fuentes renovables como la solar y con el hidrógeno en forma gaseosa. Esto se refleja en la **figura 64** (Liu et al., 2020).

Figura 64

Emisiones NOx según tecnología y sistema productivo



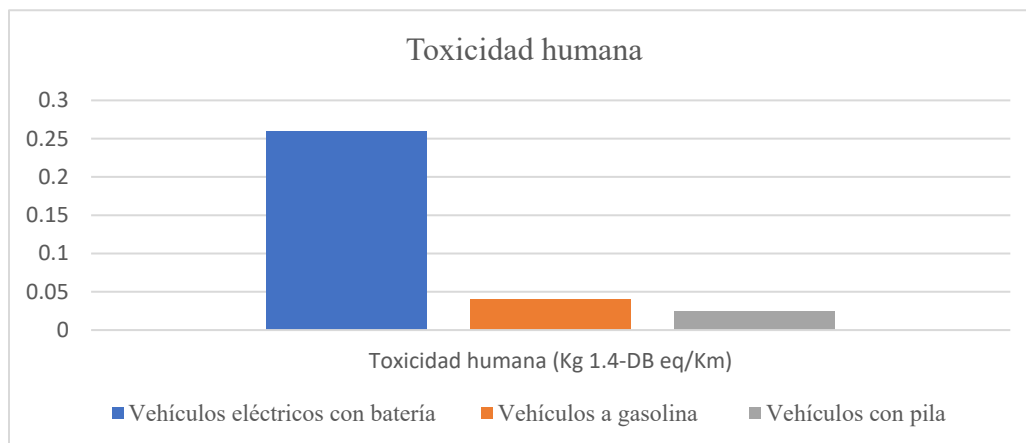
Nota. WTP: Well to pump. Tomado de *Comparison of well-to-wheels energy use and emissions of a hydrogen fuel cell electric vehicle relative to a conventional gasoline-powered internal combustion engine vehicle*, Liu et al., 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*

Así mismo según investigaciones, el promedio de NOx que se puede reducir está entre 29-79% en comparación de los motores a gasolina, de igual forma dependiendo de las alternativas de obtención de hidrógeno, también todos los valores obtenidos tienen una fuerte influencia de la infraestructura que se tiene que crear para el sistema de hidrógeno.

5.1.5 Toxicidad. A pesar de que los valores son bastantes bajos en movilidad, los vehículos eléctricos que funcionan fundamentalmente con baterías precisan impactos en este factor ambiental, precisamente por el efecto que éstas causan. Por otra parte, la diferencia entre vehículos a base hidrógeno y a gasolina no es grande y en ambos casos está por debajo de 0.05 Kg 1.4-DB eq Km-1 (Bicer y Dincer, 2018). En la **figura 65** se precisa esta información.

Figura 65

Toxicidad humana según tecnología

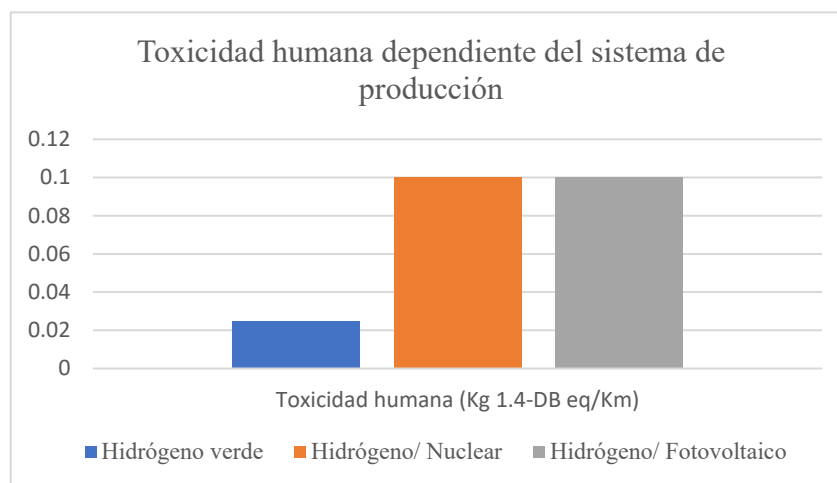


Nota. La toxicidad por parte de ambas alternativas, tanto la del hidrógeno como la de gasolina son muy bajas, en relación a un vehículo con batería. Tomado de *Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles*, Bicer y Dincer, 2018, *Resources, Conservation and Recycling*

De acuerdo también al sistema productivo existe de igual forma un rango de variación. A partir del análisis se muestra que el hidrógeno verde es el que maximiza los beneficios, seguido del hidrógeno a partir de fuentes nucleares y luego el fotovoltaico, ver la **figura 66**.

Figura 66

Toxicidad dependiente del sistema productivo

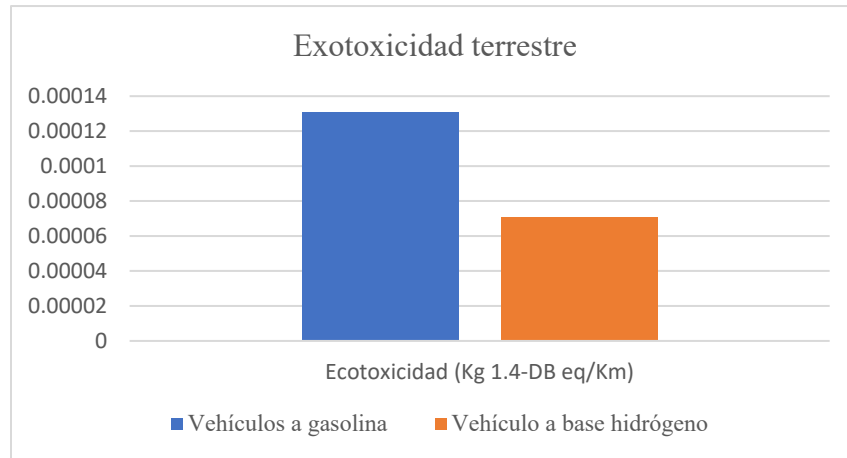


Nota. Tomado de *Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles*, Bicer y Dincer, 2018, *Resources, Conservation and Recycling*

5.1.6 Ecotoxicidad terrestre. La contaminación por ecotoxicidad terrestre se origina por sustancias que son liberadas y éstas causan consecuencias a largo plazo en los sistemas biológicos por la bioacumulación o la toxicidad. Por parte de este aspecto en la **figura 67** se establece la diferencia entre los sistemas a gasolina y los sistemas de hidrógeno (Bicer y Dincer, 2018).

Figura 67

Ecotoxicidad dependiente de la tecnología

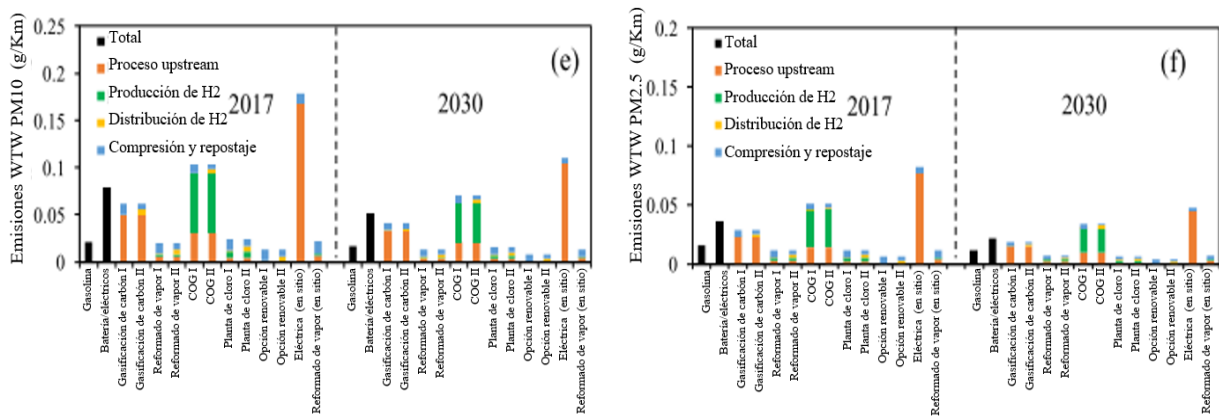


Nota. Tomado de *Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles*, Bicer y Dincer, 2018, *Resources, Conservation and Recycling*

5.1.7 PM. En el ámbito del material particulado 2.5 y 10, incluir todos los avances tecnológicos en materia de hidrógeno mejoraría para el 2030 las emisiones entre 20-26% con respecto a la actualidad, puesto que éste es un parámetro que en contraposición al resto, según estudios, da peores resultados para la mayoría de las opciones de los vehículos con pilas en referencia con los motores a gasolina, esta proposición se refleja en la **figura 68** (Q. Wang et al., 2020). Pese a esto, actualmente para el PM2.5 las alternativas de HFCV con sistemas de producción como el reformado de vapor de metano, la planta de cloro y a partir de fuentes renovables, pueden alcanzar mejoras en las emisiones del 26%, 27% y 60%, comparando con los vehículos convencionales, respectivamente y para el PM10 la única opción es el H2 a partir de fuentes renovables.

Figura 68

Emisiones de material particulado 2.5 y 10 según mecanismo productivo

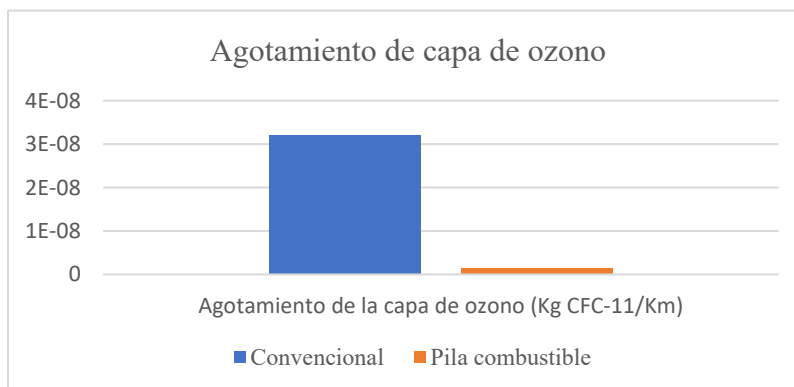


Nota. Comparativa esperada entre los años 2017 y 2030. COG: gas de horno de coque; PM: Material particulado; WTW: Well to well. Tomado de *Well-to-wheel analysis of energy consumption, greenhouse gas and air pollutants emissions of hydrogen fuel cell vehicle in China*, Wang et al., 2020, *Journal of Cleaner Production*

5.1.8 Alteración a capa de ozono. Complementando el análisis ambiental se estudia el deterioro de la capa de ozono, este parámetro se vincula directamente con los GHG y por lo tanto las diferencias en impactos será de la misma proporción. Los resultados reflejan que en términos de alteración a la capa de ozono los vehículos de hidrógeno son la opción más beneficiosa y el automóvil a gasolina es de las peores opciones. Ver la **figura 69**.

Figura 69

Agotamiento de capa de ozono según tecnología



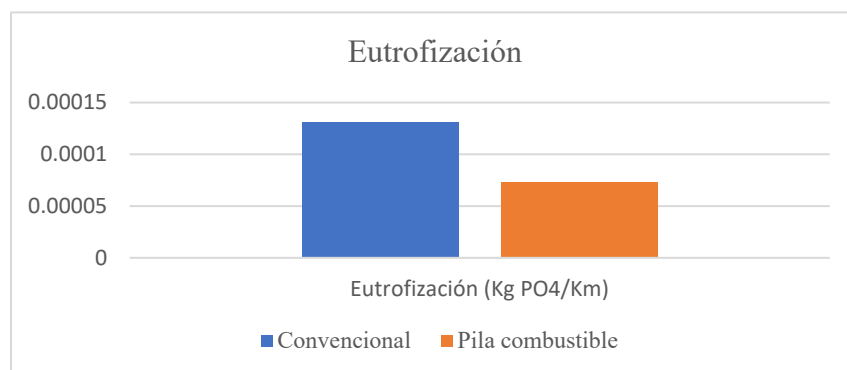
Nota. Tomado de *Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles*, Bicer y Dincer, 2018, *Resources, Conservation and Recycling*

La alteración en la capa de ozono es la principal causa de calentamiento global, los medios de transporte a base hidrógeno reportan $1.48 \cdot 10^{-9}$ kg CFC-11 eq/km, este valor es bajo debido a que hay una estrecha relación con las bajas emisiones de CO₂ en la operación de estos sistemas. Es por esto igualmente que en sentido contrario se ubican los automóviles a gasolina que reportan $3.21 \cdot 10^{-8}$ kg CFC-11 eq/km (Bicer y Dincer, 2018).

5.1.9 Eutrofización. La eutrofización es ocasionada por los macronutrientes en el ambiente por procesos de desecho, el dato más bajo corresponde al de hidrógeno con $7.29 \cdot 10^{-5}$ kgPO₄/km, sin embargo, al igual que muchos otros parámetros depende de la fuente energética utilizada para producir hidrógeno. Por su parte, en los transportes convencionales con gasolina se obtiene un valor mayor de 0.000131192 kgPO₄/km, pero no es el dato más alto entre todas las alternativas existentes de movilidad (Bicer y Dincer, 2018), ver la **figura 70**.

Figura 70

Eutrofización dependiente de la tecnología



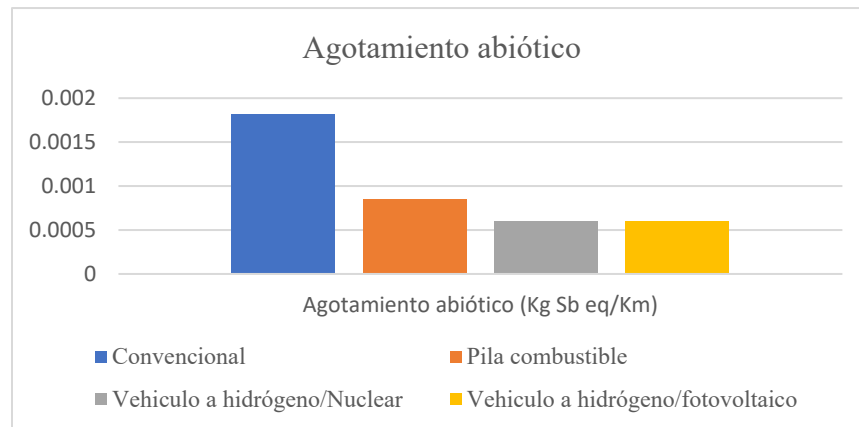
Nota. Tomado de *Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles*, Bicer y Dincer, 2018, *Resources, Conservation and Recycling*

5.1.10 Agotamiento abiótico. Al hablar de agotamiento abiótico, se conoce que el proceso de uso de pilas de hidrógeno posee ventajas con respecto a los convencionales, con valores de 0.00084 y 0.001821507 kg Sb eq/km, respectivamente, como se observa en la **figura 71**. Los procesos más influyentes en el impacto con respecto a los transportes de hidrógeno son la producción de éste y los requerimientos del tanque de almacenamiento. Es por esto que, si la electricidad para la electrólisis es de origen solar, del viento, de la biomasa o de hidroeléctricas, la reducción del efecto negativo de la tecnología por parte de la producción es clara y, además, específicamente con el almacenamiento, algunas de las especificaciones como la resistencia de los

tanques los hacen exigir unos materiales específicos como aceros o fibras de carbono que tienen su efecto adverso propio asociado a su ciclo de vida. Con lo cual, al unir estos dos factores se alcanza aproximadamente un 22% del porcentaje de contribución al agotamiento abiótico que es vinculado a la parte no operacional de los transportes de hidrógeno (Bicer y Dincer, 2018).

Figura 71

Agotamiento abiótico dependiente de la tecnología



Nota. El resultado de agotamiento abiótico en algunos casos de hidrógeno puede llegar a estar incluso por debajo de la mitad del valor para los vehículos convencionales. Tomado de *Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles*, Bicer y Dincer, 2018, *Resources, Conservation and Recycling*

5.1.11 Cuantificación económica de los impactos ambientales. Quizás hablar en términos de medidas ambientales que nos cuantifican las emisiones de los diferentes contaminantes y sus impactos en el deterioro muchas veces se nos hace poco familiar, es por esto que algunos de los estudios actuales pretenden convertir esos resultados ambientales a cuantificaciones económicas que nos acercan más a la realidad de la situación, entre ellas está la siguiente investigación que compara los vehículos a gasolina con varias alternativas de hidrógeno en un análisis WTW, los escenarios son los que se muestran en la **tabla 22**.

Tabla 22*Escenarios de análisis ambiental con cuantificación económica*

Materia prima	Combustible	Tecnología		Desempeño del vehículo (kJ/Km)
		ICE	FC	
Petróleo	Gasolina	GSN ICE		3318
Gas Natural	Hidrógeno		NG H2 FC	1525
Electrólisis de agua	Hidrógeno		WE EU 25 FC	1525
Gasificación del carbón	Hidrógeno		C H2 FC	1525
Termocraqueo nuclear	Hidrógeno		NuclTh H2 FC	1525

Nota. ICE: Motor de combustión interna; FC: Pila combustible. Tomado de *Measuring the environmental benefits of hydrogen transportation fuel cycles under uncertainty about external costs*, Chernyavs'ka y Gullí, 2010, *Energy Policy*

A partir de cada uno de estos escenarios se examinaron las emisiones reportadas tanto en “upstream” como en la parte operativa del vehículo, obteniendo los resultados mostrados en la **tabla 23**.

Tabla 23*Emisiones reportadas del análisis económico por escenario y por etapa*

Etapa	Tecnología	CO2-eq (g/km)	NOx(g/km)	SOx(g/km)	PM(g/km)	VOC(g/km)
Upstream	GSN ICE	102.733	0.324	0.321	0.061	0.137
	NG H2 FC	201.516	0.305	0.275	0.053	0.033
	WE EU 25 FC	294.933	0.388	0.902	0.092	0.032
	C H2 FC	300.589	0.295	0.312	0.063	0.112
	NuclTh H2 FC	62.225	0.155	0.275	0.044	0.026
Operación	GSN ICE	215.837	0.265	0.021	0.014	0.259
	NG H2 FC	0	0	0	0	0
	WE EU 25 FC	0	0	0	0	0
	C H2 FC	0	0	0	0	0
	NuclTh H2 FC	0	0	0	0	0

Nota. No se cuantifica emisiones en la parte operativa de los casos de hidrógeno. PM: Material particulado; VOC: Compuestos orgánicos volátiles. Tomado de *Measuring the environmental benefits of hydrogen transportation fuel cycles under uncertainty about external costs*, Chernyavs'ka y Gullí, 2010, *Energy Policy*

Tomando en cuenta estas emisiones y mediante algunos cálculos que los autores realizan a partir de coeficientes de costos según el nivel de afectación de cada contaminante, se obtiene finalmente la afectación de cada gas, pero esta vez dada en cuantificación monetaria, los datos se presentan en la **tabla 24**.

Tabla 24*Cuantificación económica de los escenarios*

Etapa	Tecnología	Clima	Impacto local y regional				Total
			CO2-eq (m€/km)	NOx(m€/km)	SOx(m€/km)	PM(m€/km))	
Upstream	GSN ICE	1.95	0.94	0.93	1.19	0.15	5.16
	NG H2 FC	3.83	0.88	0.8	1.03	0.04	6.58
	WE EU 25 FC	5.6	1.13	2.62	1.79	0.04	11.17
	C H2 FC	5.71	0.86	0.9	1.23	0.12	8.82
	NuclTh H2 FC	1.18	0.45	0.80	0.86	0.03	3.32
Operación	GSN ICE	4.1	0.77	0.15	4.81	0.28	10.11
	NG H2 FC	0	0	0	0	0	0
	WE EU 25 FC	0	0	0	0	0	0
	C H2 FC	0	0	0	0	0	0
	NuclTh H2 FC	0	0	0	0	0	0

Nota. PM: Material particulado; VOC: Compuestos orgánicos volátiles. Tomado de *Measuring the environmental benefits of hydrogen transportation fuel cycles under uncertainty about external costs*, Chernyavs'ka y Gullí, 2010, *Energy Policy*

Al analizar estos resultados, se resalta que los autores en este caso no tomaron en cuenta ningún tipo de emisiones directas en la parte operativa de las alternativas de hidrógeno, al contrario de los transportes a gasolina que se le asigna en la parte operativa 4.1 m€/km y 4.81 m€/km para el CO2-eq y el PM, respectivamente. Por otra parte, en la etapa upstream para todas las alternativas de hidrógeno como para la de gasolina se tiene valores en todos los contaminantes, en esta parte se asocia mayores costos a las alternativas de hidrógeno y sobre todo las que vienen a partir de recursos fósiles como el carbón y el gas natural, además pese a la electrólisis ser una opción amigable con el medio ambiente, en estos resultados se observa que se tiene mucha influencia en el origen de la electricidad, por ende la cuantificación económica para éste último escenario solo por parte del CO2-eq es de 5.6 m€/km. En términos totales de costos se obtiene para la opción a gasolina el valor de aproximadamente 15.3 m€/km, en contraposición de las opciones más contaminantes de hidrógeno como la gasificación del carbón y la electrólisis con valores de 8.82 m€/km y 11.17 m€/km, respectivamente, que aun siendo las peores ofrecen mejores ventajas que la opción convencional (Chernyavs'ka y Gullí, 2010).

5.1.12 Contaminantes asociados a cada combustible y tecnología vehicular a lo largo del ciclo de vida. A lo largo de toda la cadena de uso del hidrógeno, cada proceso que se lleva a cabo para el funcionamiento de estos vehículos con pila aporta una parte en la afectación ambiental en términos de cualquiera de los aspectos ambientales ya analizados. Por esto, además de hablar de

cada parámetro ambiental y su comparación entre las tecnologías a gasolina y las de hidrógeno, resulta valioso identificar de que proceso provienen y cuál es el porcentaje de contribución en cada etapa. En la siguiente **tabla 25**, se observa el consumo energético y las emisiones de dióxido de carbono en función de las distintas etapas y los combustibles.

Tabla 25

Consumo energético y emisiones GHG según proceso y tecnología

Proceso	Consumo de energía (MJ/GJ)		Emisiones de GHG (kg CO ₂ /GJ)	
	Hidrógeno	Gasolina	Hidrógeno	Gasolina
Producción de materia prima	50	62.4	23.52	3.4
Transporte de materia prima	80	8.2	1.23	0.6
Producción de combustible	530	135	99	12
Distribución de combustible	110	15	8.25	0.7
TOTAL	770	220.6	132	16.7
	Consumo de energía (MJ)		Emisiones de GHG (kg CO ₂)	
	Hidrógeno	Gasolina	Hidrógeno	Gasolina
Producción de los materiales del vehículo	54600	49800	3630	3520
Estructura del vehículo	24300	25500	1650	1760
Distribución del vehículo	2100	2100	110	110
Uso del vehículo	195000	819000	0	5903
Disposición del vehículo	300	300	0	0
TOTAL	276300	896700	5390	64423.3

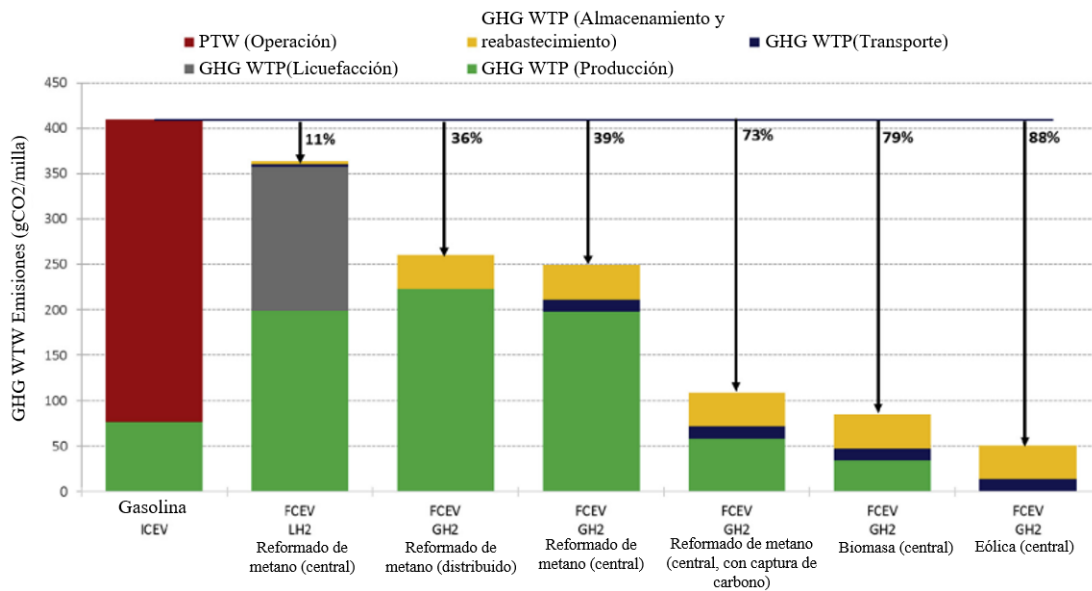
Nota. GHG: Gases de efecto invernadero. Tomado de *Life Cycle Assessment of Hydrogen Fuel Cell and Gasoline Vehicles*, Dicer y Hussain, 2010, *Electric and Hybrid Vehicles*

Los primeros procesos se dan en térmicos de MJ/GJ y kg CO₂/GJ, puesto que los resultados varían según el consumo energético que requieran los vehículos de cada clase, aun así, analizando el total para ambos combustibles de estas etapas el resultado es mayor para la opción de hidrógeno triplicando el consumo de energía y siendo casi siete veces mayor para las emisiones de CO₂. En los segundos procesos los papeles se invierten y es en este caso es la alternativa a gasolina la cual triplica el consumo energético y es hasta doce veces mayor en las emisiones de CO₂, además estos valores resultantes ya están fijos en MJ y kg de CO₂ porque no varían con la utilización del vehículo.

Complementando la idea anterior se presenta en la siguiente **figura 72**, una comparación de los g CO₂/milla de diferentes opciones vehiculares en función de las etapas (WTP y PTW) y de los procesos (licuefacción, almacenaje, producción, transporte).

Figura 72

CO₂ dependiente de la opción vehicular, de la etapa y del proceso



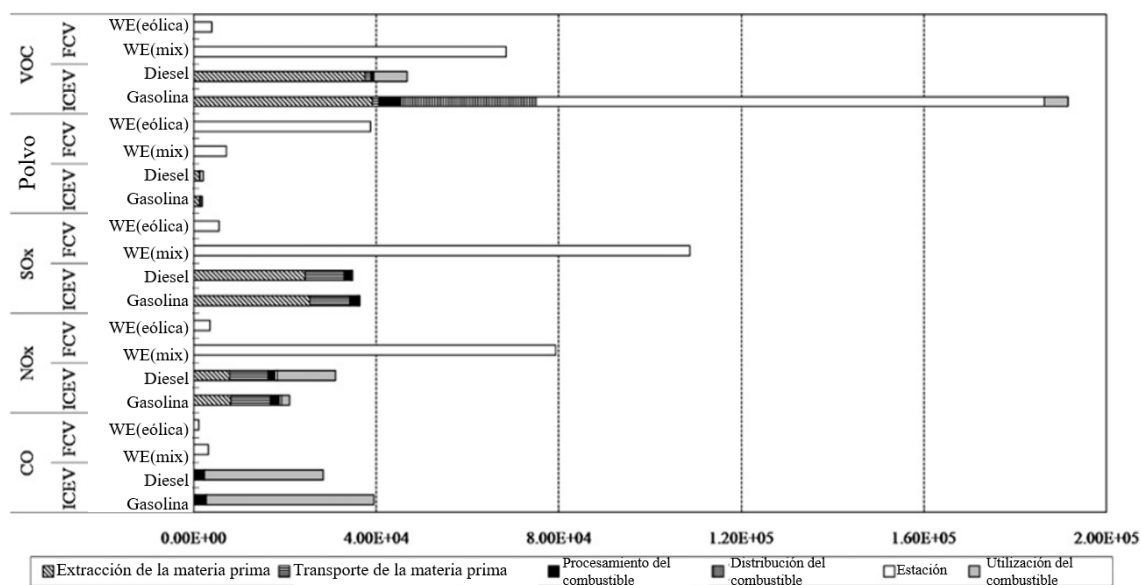
Nota. Dependiendo del tipo de tecnología de producción se logran reducciones entre el 11-88% de emisiones GHG. GHG: Gas de efecto invernadero; PTW: Pump to well; WTP: Well to pump. Tomado de *Life-Cycle Analysis of Fuels and Vehicle Technologies*, Elgowainy et al., 2017, *Encyclopedia of Sustainable Technologies*.

En la gráfica se identifica un gran bloque rojo en la tecnología ICEV en la etapa PTW debida a la operación del vehículo. En las opciones de hidrógeno predomina el color verde que es la etapa WTP en el proceso de producción, seguido del color amarillo que también está en la etapa de WTP, pero esta vez en el proceso de almacenamiento. También se puede identificar que a comparación de la línea base de contaminación del ICEV se logran reducciones entre el 11% y el 88%, dependiendo de la tecnología de hidrógeno (Elgowainy et al., 2017).

Por la parte de contaminantes como el monóxido de carbono, los óxidos nitrosos, los óxidos de azufre, el polvo y los compuestos orgánicos volátiles se presenta la **figura 73**, que compara de igual forma estos contaminantes dependiendo del vehículo y del proceso.

Figura 73

CO, NOx, SOx, VOC y polvo dependiente de tecnología vehicular y procesos



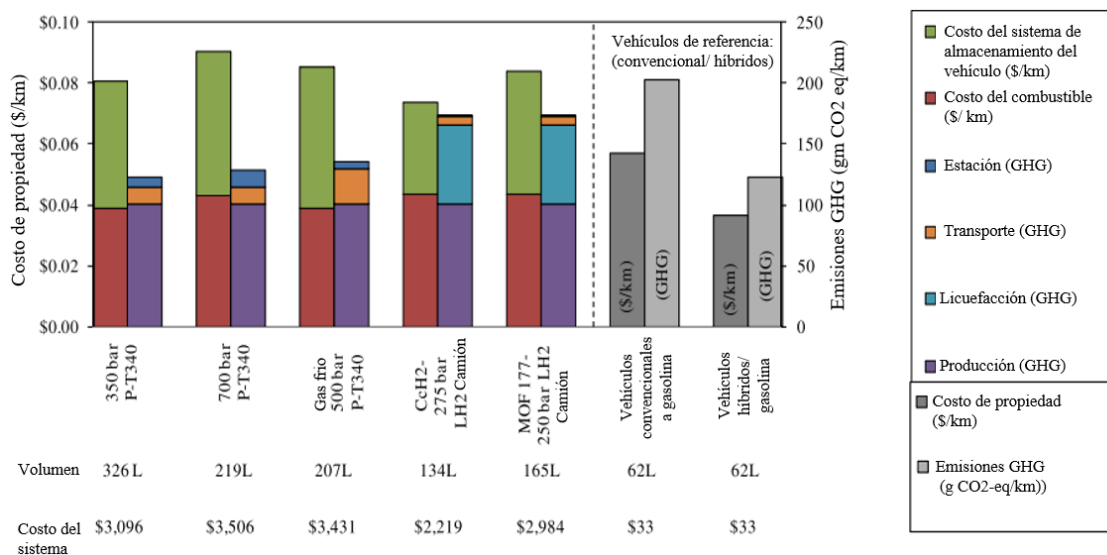
Nota. ICEV: Vehículo con motor de combustión; FCV: Vehículo con pila combustible; VOC: Compuestos orgánicos volátiles; WE: Electrólisis de agua. Tomado de *Life cycle environmental and economic analyses of a hydrogen station with wind energy*, Lee et al., 2010, *International Journal of Hydrogen Energy*

En los resultados hay una predominancia del proceso “estación” (que para este análisis involucra la parte de electrólisis del agua y compresión y almacenamiento del hidrógeno) para las opciones de hidrógeno para todos los contaminantes y para los vehículos a gasolina existe contribución por parte de todos los procesos en la mayoría de contaminantes. Los impactos en general en los vehículos a gasolina son más altos (Lee et al., 2010).

Como se ha podido observar en la mayoría de análisis que comparan ambos sistemas de movilidad se hace una revisión profunda de la influencia del sistema productivo en los esquemas de hidrógeno puesto que es actualmente el factor de mayor influencia, pero si en dado caso de que se tome variaciones con respecto al sistema de almacenaje y se mantuviera un mismo sistema productivo se obtendrían resultados como los que se delimitan en la **figura 74**.

Figura 74

Variación del sistema de almacenaje y su influencia



Nota. En las últimas dos opciones hay cuantificación de emisiones de gas efecto invernadero debido a la licuefacción. CcH2: Hidrógeno líquido criocomprimido a 275 bar y 30 K, GHG: Gas efecto invernadero, MOF 177: sistema de almacenamiento basado en material adsorbente a 250 bar y 100 K. Tomado de *Hydrogen storage technology options for fuel cell vehicles: Well-to-wheel costs, energy efficiencies, and greenhouse gas emissions*, Paster et al., 2011, *International Journal of Hydrogen Energy*

Mediante la figura se puede identificar que, al no variar el sistema productivo, las emisiones asociadas a este no varían, pero, por otra parte, si existen variaciones en las emisiones pertenecientes a otros procesos como el de transporte, estación de reabastecimiento y licuefacción, todos estos procesos dependientes del sistema de almacenamiento. Por ejemplo, para los tres primeros tipos de almacenamiento (350 bar, 700 bar, cold gas-500 bar) hay un pequeño porcentaje de aporte tanto del proceso transporte como el de estación y a partir del cuarto deja de haber una influencia del proceso de estación y cobra mayor importancia el proceso de licuefacción para estos dos últimos tipos de almacenamiento ya que necesitan el hidrógeno en estado líquido. En relación de si el efecto es mayor o menor que el de un vehículo convencional, en la figura se observa que aún los valores de los HFCV con estas especificaciones siguen estando por debajo, incluso relacionando que el sistema productivo que se manejó fue reformado de metano por vapor (Paster et al., 2011).

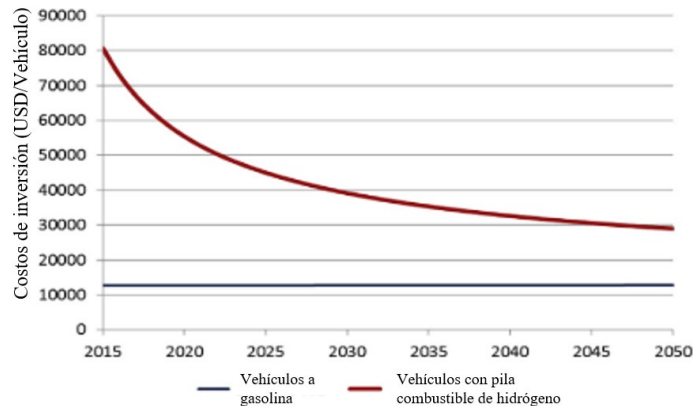
5.2 A nivel técnico

Adicionalmente a la parte ambiental existen otra serie de criterios de evaluación determinantes y limitantes que son de origen técnico, que proporcionaran una hoja de ruta futura para la incorporación sucesiva de las tecnologías de hidrógeno, entre ellos están:

5.2.1 Costos de inversión. Quizás una de las mayores barreras en la implementación de medios de transporte a base hidrógeno es el costo inicial, el costo de inversión, el alto gasto inicial que quizás se debe hacer en un vehículo de pilas de hidrógeno debido a que la tecnología aún sigue en fase de desarrollo y mejoría de sus subprocesos. Se pronostica que para el año 2050 la disminución en los costos será de aproximadamente 50000 euros por carro (Ajanovic y Haas, 2020), esta curva de descenso del precio se refleja en la **figura 75**.

Figura 75

Costos de inversión

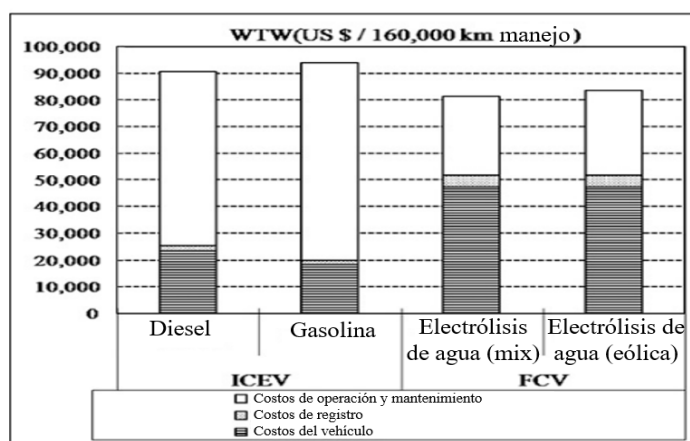


*Nota. Disminución progresiva de costos de inversión debido a mejoras tecnológicas e infraestructurales. Tomado de *Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector*, Ajanovic & Haas, 2020, *International Journal of Hydrogen Energy**

Haciendo una discriminación de los costos asumidos por cada vehículo, en la **figura 76** se relaciona los costos de mantenimiento y operación, los de costos de registro y también los de inversión. Pese al menor costo de los vehículos a gasolina, al final se acaba incurriendo en más gastos en esta opción por el dinero asumido en la operación y mantenimiento de éstos, que es casi del doble tomando como referencia el HFCV.

Figura 76

Discriminación de los gastos en los ICEV y HFCV

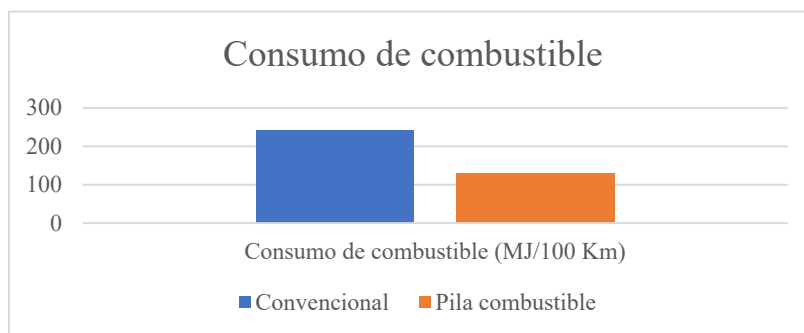


Nota. ICEV: Vehículo con motor de combustión; FCV: Vehículo con pila combustible; WTW: Well to well. Tomado de *Life cycle environmental and economic analyses of a hydrogen station with wind energy*, Lee et al., 2010, *International Journal of Hydrogen Energy*

5.2.2 Consumo de combustible. El consumo de combustible, ya sea gasolina o hidrógeno, durante la utilización del vehículo comparativamente entre las dos alternativas expone ventajas para la opción de pilas de hidrógeno, como se delimita en la **figura 77**. Aproximadamente, el consumo de combustible en motores a combustión interna es de 240 MJ/100 km y el de automóviles con pila de hidrógeno es de alrededor de 130 MJ/100 km (Acar y Dincer, 2020).

Figura 77

Consumo de combustible según tecnología

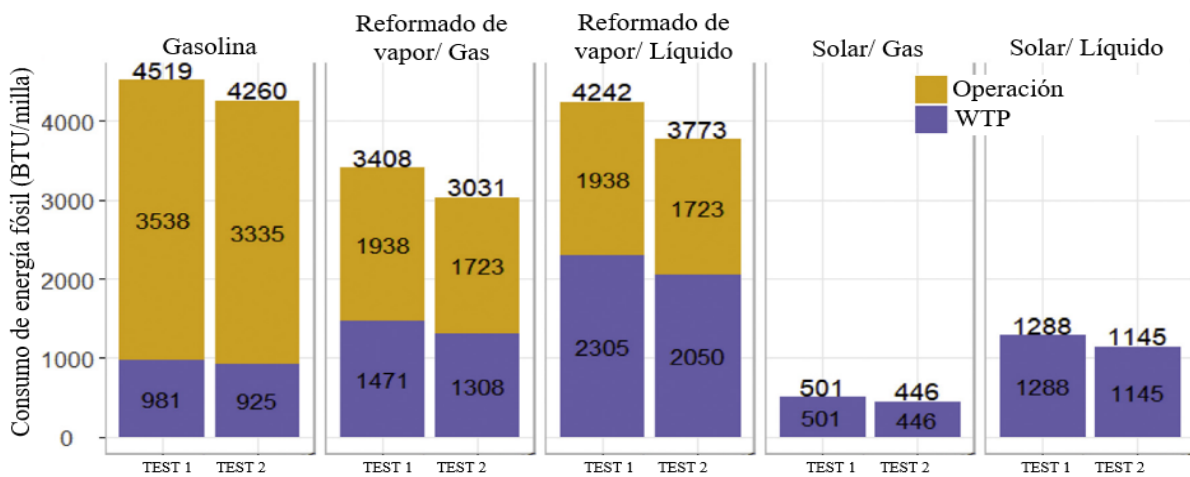


Nota. Tomado de *The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming*, Acar y Dincer, 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*

Desde un punto de vista más completo, incluyendo todo el ciclo de vida del hidrógeno para ser utilizado en los vehículos con pila, el consumo de combustible en los FCV varía en gran medida de acuerdo a el sistema productivo como se ve en la **figura 78**, además, a comparación de los vehículos convencionales a gasolina el consumo energético es mayor en la parte de WTP, que en la operación como tal de éste. Particularmente, en el reformado de vapor se incluye una porción del consumo energético en esta parte de operación del vehículo, la cual no existe en la opción solar (Liu et al., 2020). Aproximadamente el consumo de la opción de SMR G.H2 en la parte operacional corresponde solo al 55% de la misma etapa para el vehículo a gasolina, como tal esta fase operacional en estos últimos vehículos aporta un 78% del total de su consumo de combustibles. En las opciones de hidrógeno la energía que se refleja es debida a la producción de éste por medio de fuentes fósiles y otros procesos como la licuefacción y compresión.

Figura 78

Consumo de energía fósil según tecnología y sistema productivo



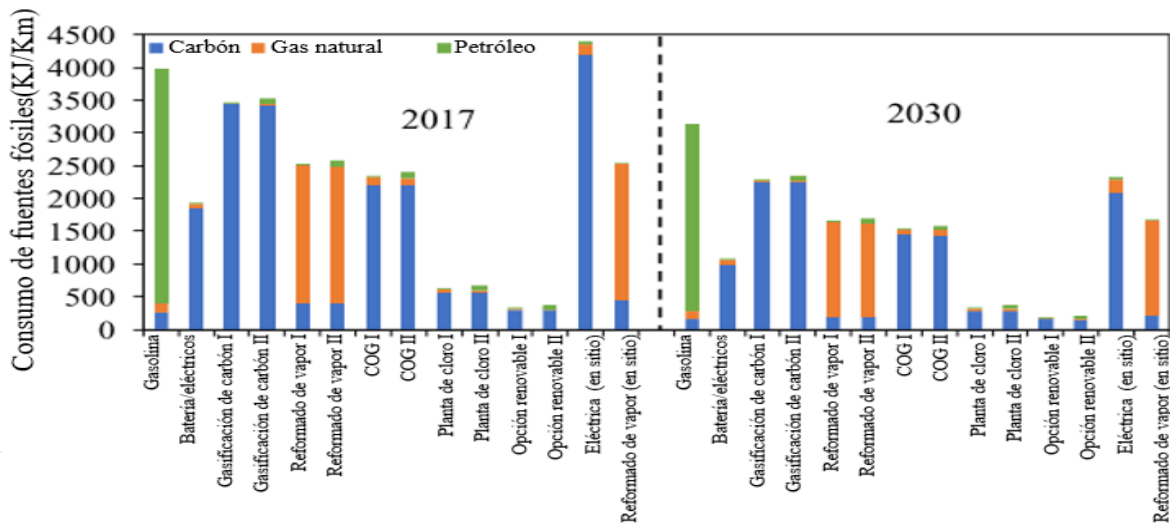
Nota. WTP: Well to pump. Tomado de Comparison of well-to-wheels energy use and emissions of a hydrogen fuel cell electric vehicle relative to a conventional gasoline-powered internal combustion engine vehicle, Liu et al., 2020, International Journal of Hydrogen Energy

En términos generales, en la mayoría de patrones de producción de hidrógeno se consume en el WTW menos cantidad de combustible fósil, según sea la opción seleccionada la reducción de este consumo puede estar entre el 11-92% y claramente las fuentes renovables brindan mejores resultados. Desde otro punto de vista, algunos estudios han mostrado que si se selecciona algún mecanismos de producción de H2 que incorpore en su proceso plantas de quema de carbón para los HFCV, se puede incurrir incluso en mayor consumo energético que los motores a gasolina (Q.

Wang et al., 2020). A futuro se espera que tanto la incorporación sucesiva de las energías renovables como la mejoría en la economía de combustible potencializarán una baja en el consumo como se interpreta en **la figura 79**. En la figura se delimita adicionalmente que de los combustibles fósiles, el gas natural y el carbón son los más utilizados en los esquemas de los vehículos con pila combustible.

Figura 79

Consumo de energía fósil actual y futura esperada

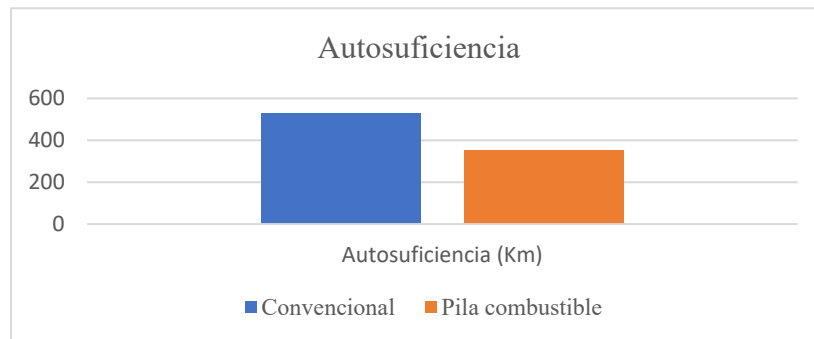


Nota. Comparativa esperada entre los años 2017 y 2030. COG: gas de horno de coque. Tomado de *Well-to-wheel analysis of energy consumption, greenhouse gas and air pollutants emissions of hydrogen fuel cell vehicle in China*, Wang et al., 2020, *Journal of Cleaner Production*

5.2.3 Autosuficiencia. La autosuficiencia, como ya se había comentado con anterioridad, posee limitantes por la cantidad de hidrógeno que puede ser almacenado en los tanques, esto actualmente se está abordando como un tema de investigación para poder maximizarla y se logren las metas de autosuficiencia energética que se tienen ya para los motores convencionales. En la **figura 80** se identifica que pese a esto la autosuficiencia para las pilas es ya de casi unos 350 km, comparativamente con el de un medio de transporte convencional que es de 530 km aproximadamente (Acar y Dincer, 2020).

Figura 80

Autosuficiencia según tecnología

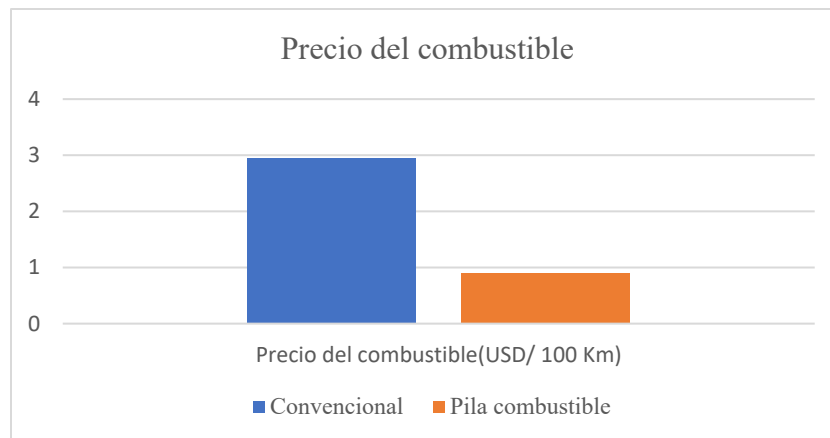


Nota. Tomado de *The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming*, Acar y Dincer, 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*

5.2.4 Precio de combustible. El precio del combustible también es un aspecto de comparación debido a la operatividad futura de los vehículos en el día a día, el costo de la gasolina fluctúa según un gran número de factores socioeconómicos, pero en promedio es de 2.94 USD/100 km y el precio del hidrógeno se proyecta sea 0.9 USD/100 km (Acar y Dincer, 2020). Ver **figura 81**.

Figura 81

Precio del combustible según tecnología

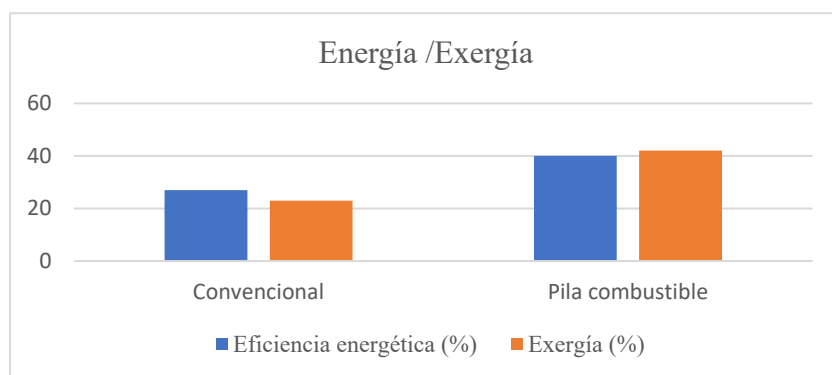


Nota. Se observan beneficios por reducción en el precio de combustible en los vehículos con pila. Tomado de *The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming*, Acar y Dincer, 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*

5.2.5 Eficiencia energética. La eficiencia energética y la exergía conseguida por los motores a gasolina es del 27% y 23%, respectivamente. Los vehículos con pila combustible por su parte en este criterio tanto en la eficiencia energética como en la exergía brinda mayores resultados, siendo 40% y 42%, es decir, aprovechan mejor el combustible para generar potencia mecánica (Acar y Dincer, 2020). Ver **figura 82**.

Figura 82

Energía y exergía según tecnología



Nota. Mejor aprovechamiento energético y exérgico por parte de las pilas combustibles. Tomado de *The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming*, Acar y Dincer, 2020, *International Journal of Hydrogen Energy*

5.2.6 Peso de los vehículos. En última instancia, el último aspecto técnico de análisis es el peso de los vehículos. Las opciones vehiculares que se tomaron en cuenta para el resultado del peso de los vehículos están en la **tabla 26**. Además, se hace un estimado de las posibles mejoras técnicas que se podrían conseguir para el 2030 en cuanto a la capacidad del tanque, el autoabastecimiento y algunas variables del motor, batería, pila, entre otros.

Tabla 26

Alternativas tecnológicas de movilidad para comparación de peso de los vehículos

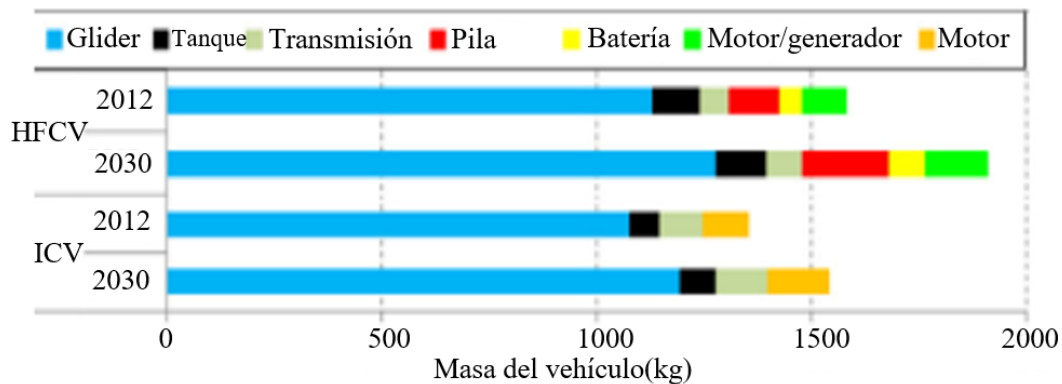
Tecnología	Año	Rango de combustible(km)	Poder (kW)					Almacenamiento de energía	
			Motor	Motor y controlador	Batería	Pila	Transmisión	Tanque (MJ)	
ICEV-g	2012	700		117				117	1956
	2030	700		103				103	1518
FCV	2012	500		145	79	145	145		819
	2030	700		120	66	120	120		919

Nota. ICEV: Vehículo con motor de combustión; FCV: Vehículo con pila combustible. Tomado de *The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life Cycle Assessment based on a novel scenario analysis framework*, Bauer et al., 2015, *Applied Energy*

En la **figura 83** se especifica el peso discriminando cada componente del vehículo. Allí se tiene que el glider es el elemento de mayor peso oscilando entre 1000 kg y 1250 kg para ambas alternativas y años. Por su parte los FCV tienen un peso directamente asociado a la pila combustible, a la batería y al motor de alrededor de 100 Kg, 50 kg y 100 kg, respectivamente. Así mismo, con respecto a los ICEV se toma en cuenta el peso del motor de combustión que oscila entre 75-100 kg. Para ambas opciones se considera el peso del tanque y de la transmisión. Finalmente, comparando ambas opciones de movilidad, según este estudio, se tiene que es más pesada la opción con pila combustible de hidrógeno, aproximadamente en unos 300 kg y que esta diferencia se reducirá a 200 kg para el 2030 (Bauer et al., 2015).

Figura 83

Comparación del peso de los FCV y ICEV



Nota. ICEV: Vehículo con motor de combustión; FCV: Vehículo con pila combustible. Tomado de *The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life Cycle Assessment based on a novel scenario analysis framework*, Bauer et al., 2015, *Applied Energy*

CONCLUSIONES

Existe una gran variedad de procesos de producción y almacenamiento de hidrógeno. En lo que concierne a los diferentes mecanismos de producción de hidrógeno, la mayoría de las aplicaciones tradicionales requieren del uso de combustibles fósiles y entre ellos el mecanismo de reformado de vapor es actualmente la tecnología de mayor uso por sus altas eficiencias de conversión energética y su facilidad técnica. Sin embargo, es una técnica en la que se emite directamente CO₂ de la reacción principal. Es por esto, que a futuro si se quiere pensar en una descarbonización, esta tecnología debe dejarse de implementar para dar paso a los mecanismos de producción con base a energías renovables como la eólica y la solar. El uso de fuentes renovables para la producción de hidrógeno presenta altas eficiencias de conversión (>70%), pero existe una brecha aún en la infraestructura disponible y en algunos de los diseños. Particularmente, en el uso de la energía solar fotovoltaica, se debe tener en cuenta dos aspectos relevantes, primero, el análisis de algunos de los materiales implementados en la construcción de los paneles fotovoltaicos (que generan un impacto ambiental asociado a su producción) y segundo, la construcción de una infraestructura mayor como son los parques eólicos. La energía nuclear, por otra parte, posee grandes ventajas, sin embargo, este tipo de tecnología no es socialmente tan aceptada por los requerimientos de seguridad que son necesarios para su implementación.

En términos del almacenamiento del hidrógeno, el proceso por medio de tanques comprimidos es el que está más avanzado y es en el que más se ha destinado estudios para mejorar su estructura para que sea posible soportar las altas presiones. Los almacenamientos criogénico y criocomprimido son dos nuevas alternativas que están menos implementadas y que aportan beneficios como mayor densidad energética, pero, hay que tener en cuenta también que existe un gran gasto energético en la licuefacción del hidrógeno y el aislamiento requerido en estos tanques es un requisito fundamental. Desde otro punto de vista, los almacenamientos químicos como los hidruros y en materiales como el grafito son técnicas a nivel experimental que están demostrando ser buenas opciones, sin embargo, para su introducción en la industria habría que superar algunos impedimentos como las lentas cinéticas de las reacciones para liberar el hidrógeno o el correcto manejo térmico.

Con relación a la fibra de carbono existente en los equipos de almacenamiento se tiene que, es el componente que supone tanto más costos (en algunos casos puede constituir hasta el 70% de la inversión en el tanque), como también mayores delimitaciones ambientales, por el gasto

energético implicado y las emisiones correspondientes en cada una de las etapas en su proceso productivo.

Adicional a los dos subprocesos anteriores, las pilas combustibles son equipos que dependiendo el tipo pila tienen unas características o barreras diferentes. Por un lado, las pilas PEMFC, que son las de mayor uso, se ven afectadas por diferentes aspectos técnicos como son los cambios en el nivel de la humedad, por la diferencia de voltajes, por las temperaturas de operación, por existencia de contaminantes en los reactivos, entre otros. Esto se ha mejorado estudiando los diseños, las reacciones electroquímicas y los materiales incorporados en éstas, que se ha utilizado para obtener una mejor conducción iónica, sin embargo, deben seguirse analizando. Aparte, es de amplio reconocimiento que el platino es aquel componente de las pilas que se debe irse cambiando por uno que permita manejar las reacciones de la forma más indicada y efectiva, pero en este caso sin generar tantas afectaciones a nivel ambiental. Otros metales y materiales de impacto ambiental que son añadidos en las pilas son el cobre, el aluminio y el grafito.

Claramente se pudo identificar que, a nivel ambiental dentro de los procesos de producción, almacenamiento y pilas combustibles, se tiene que los procesos productivos son los que tienen un mayor peso o la más alta incidencia, generando según sea el proceso cantidades de CO₂, que en muchos casos no los hacen tan sostenibles hacia un futuro.

Así y todo, el uso de hidrógeno mediante pilas combustibles consiste en una técnica que definitivamente brinda buenos resultados en términos ambientales y técnicos. Pese a ser dependiente de los diferentes enfoques de los estudios, la mayoría de éstos concuerdan que es en la parte operacional donde los vehículos con pila combustible dan los mayores resultados positivos con respecto a los vehículos a gasolina. Las emisiones de CO₂, de NO_x, de PM, de polvo, y en general de la mayoría de contaminantes se ven reducidas en los HFCV tomando en cuenta un estudio WTW y están fuertemente influenciadas del sistema de producción del hidrógeno como se pudo ver en el capítulo quinto a lo largo de todas las tablas mostradas. Ejemplificando con distintos parámetros se tiene que:

- Tan solo con el CO₂ se puede lograr una reducción entre el 11- 88%.
- En la acidificación reducciones de SO₂ en un 66%.
- En los VOC reducciones entre un 66-96%.
- En los CO reducciones hasta de un 96%.
- En el NO_x reducciones entre 29-79%.

En otro sentido, aspectos como la autosuficiencia y la alta inversión son barreras que impiden la incorporación más rápida de este tipo de tecnología, pese a que como ya se vio, estos dos son factores técnicos que rápidamente pueden llegar a ser superados. En contraposición, otros aspectos técnicos, pero de los cuales ya actualmente se obtienen resultados competitivos con respecto a los transportes a gasolina son el consumo energético, la energía y exergía del sistema y el precio del combustible.

Finalmente, se identifica también que si se lograra conseguir una infraestructura equivalente para el sistema de hidrógeno como la que se tiene para el sistema a gasolina los aportes positivos que presentarían los vehículos eléctricos con este sistema de pilas serían numerosos en todas las dimensiones, tanto económicamente, como socialmente, como técnicamente y principalmente ambientalmente.

PERSPECTIVAS

A futuro se espera que sean más desarrollados e implementados los mecanismos de producción basados en energías renovables, que si aportan un beneficio neto a nivel ambiental, técnico y económico. Habría que pensar en cómo generar una infraestructura necesaria para estos mecanismos (solar/eólica) que genere un aporte de energía considerable para que puedan ser considerados como técnicas aplicables y puedan superar sus principales impedimentos. Además, es necesario elaborar más estudios acerca de algunos de los procesos prometedores como la fotoelectrólisis, los mecanismos a partir de la biomasa y los ciclos termoquímicos para mejorar sus procedimientos y conseguir así aumentar sus eficiencias de producción de hidrógeno.

En el almacenamiento de hidrógeno se tiene unas elevadas expectativas en los almacenamientos sólidos y químicos, en los cuales hay que seguir experimentado en temas como cuáles pueden ser las nuevas implementaciones de materiales; el manejo de temperaturas, de reacciones y de cinética; el peso de los dispositivos u otras opciones, que consigan ayudar a estas tecnologías a surgir en este campo. Ya que, debido a las cuestiones de seguridad, económicas y ambientales de los almacenamientos físicos, no se ha conseguido del todo que en temas de almacenamiento del hidrógeno se concrete una opción completa, que contemple como siempre la meta final de conseguir almacenar la mayor cantidad de hidrógeno (para una mayor autosuficiencia), con el menor espacio e impacto posible y las más altas consideraciones de seguridad. Si se habla de almacenamiento físico, habría que contemplar un análisis de los tanques direccionado hacia un enfoque donde se reduzcas los costos asociados a su diseño por el manejo de todas las condiciones de presión y temperatura y además que considere una reducción en el gasto energético que actualmente está implicado tanto en cada una de las fases de su producción (como por ejemplo en la polimerización de la fibra de carbono), como también en los procesos ya sea de compresión o licuefacción del hidrógeno.

En lo referente a pilas combustibles, se debe estudiar la identificación de nuevos elementos, diseños, condiciones operativas y también materiales para cada una de sus partes fundamentales, como por ejemplo nuevos compuestos para la membrana o para los electrocatalizadores, todo esto para que no se generen algunos de los problemas que se tienen actualmente y que alteran el funcionamiento de la pila como cambios en el nivel de humedad, corrosión o la contaminación dada por parte de los reactivos que es producida en pilas con temperaturas de operación bajas. Lo que se quiere, es que con algunas nuevas consideraciones se logre conseguir una alta conductividad,

una buena resistencia química y física y en general un proceso bien controlado, para lograr una buena conversión del hidrógeno en electricidad, un más alto ciclo de vida de la pila y un menor impacto ambiental asociado a sus partes. Incursionar en las modificaciones de las pilas SOFC Y AFC son otras opciones que también podrían considerarse.

El reciclaje de los metales en las pilas (principalmente el cobre, aluminio y platino) es uno de los focos centrales que al implementarlo reduciría factores como el cambio climático, el uso de combustibles fósiles y la acidificación. Por lo cual, una revisión del cómo se estandarizaría este proceso ayudaría a mejorar la visión acerca de este tema.

La etapa de manufactura de un vehículo a base hidrógeno es uno de aquellos procesos que sin duda deben ser tomados en cuenta, debido a la alta producción de GHG por la fabricación de cada una de sus partes, por lo que si este valor de emisiones se consiguiera bajar se impulsaría aún más este tipo de movilidad eléctrica y pasaría a tener mejores perspectivas.

Introduciendo todas estas nuevas implementaciones a lo largo de todo el ciclo de vida de la utilización de hidrógeno en pilas combustibles, se debería lograr reducir aún más las emisiones WTW de los diferentes esquemas de HFCV (concretamente, conseguir más beneficios en la parte WTT, que es donde existen más limitaciones) a comparación de los vehículos gasolina; en muchos casos se podría incluso llegar a tener respuestas favorables en aspectos que no presentan en este momento resultados positivos hacia la técnica como lo es el material particulado. Adicionalmente, por lo sucesivo también se debería obtener alternativas de hidrógeno económicamente más competitivas y una infraestructura más organizada que establezca una buena base para la transición a este tipo de vehículos eléctricos.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdalla, A. M., Hossain, S., Nisfindy, O. B., Azad, A. T., Dawood, M., y Azad, A. K. (2018). Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review. *Energy Conversion and Management*, 165(March), 602–627. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.088>
- Acar, C., y Dincer, I. (2020). The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(5), 3396–3406. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.149>
- Ajanovic, A., y Haas, R. (2019). Economic and Environmental Prospects for Battery Electric- and Fuel Cell Vehicles: A Review. *Fuel Cells*, 19(5), 515–529. <https://doi.org/10.1002/fuce.201800171>
- Ajanovic, A., y Haas, R. (2020). Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.122>
- Benitez, A., Wulf, C., de Palmenaer, A., Lengersdorf, M., Röding, T., Grube, T., Robinius, M., Stolten, D., y Kuckshinrichs, W. (2021). Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on type IV carbon fiber hydrogen tank. En *Journal of Cleaner Production* (Vol. 278). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123277>
- Bicer, Y., y Dincer, I. (2018). Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles. *Resources, Conservation and Recycling*, 132(September 2017), 141–157. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.036>
- Breeze, P. (2017). Fuel Cells. *Fuel Cells*, 23–32. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-101039-6.00003-0>
- Chalk, S. G., y Miller, J. F. (2006). Key challenges and recent progress in batteries, fuel cells, and hydrogen storage for clean energy systems. *Journal of Power Sources*, 159(1 SPEC. ISS.), 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.04.058>
- Chanda, C. K., y Bose, D. (2020). Challenges of Employing Renewable Energy for Reducing Greenhouse Gases (GHGs) and Carbon Footprint. En *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11170-1>
- Choi, W., Yoo, E., Seol, E., Kim, M., y Song, H. H. (2020). Greenhouse gas emissions of conventional and alternative vehicles: Predictions based on energy policy analysis in South Korea. *Applied Energy*, 265(September 2019), 114754. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114754>

- Conde, E., y Hernández, R. (s/f). *Producción Y Almacenaje De Hidrógeno*.
- Dadashzadeh, M., Kashkarov, S., Makarov, D., y Molkov, V. (2018). Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(12), 6462–6475. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.195>
- Dagdougui, H., Bersani, C., Sacile, R., y Ouammi, A. (2018). *Hydrogen Infrastructure for Energy Applications*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812036-1.00002-0>
- Dincer, I., y Zamfirescu, C. (2016). Sustainable Hydrogen Production. En *Sustainable Hydrogen Production*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-801563-6.00002-9>
- Duclos, L., Lupsea, M., Mandil, G., Svecova, L., Thivel, P. X., y Laforest, V. (2017). Environmental assessment of proton exchange membrane fuel cell platinum catalyst recycling. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2618–2628. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.197>
- eia. (2020, junio). *Where greenhouse gases come from - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. <https://www.eia.gov/energyexplained/energy-and-the-environment/where-greenhouse-gases-come-from.php>
- Espinosa Valderrama, M., Cadena Monroy, Á. I., y Behrentz Valencia, E. (2019). Challenges in greenhouse gas mitigation in developing countries: A case study of the Colombian transport sector. *Energy Policy*, 124(April 2018), 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.09.039>
- García, A. (2008). Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno. *Asociación Española del Hidrógeno*, 2008, 1–16.
- Garraín, D., y Lechón, Y. (2014). Exploratory environmental impact assessment of the manufacturing and disposal stages of a new PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(4), 1769–1774. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.11.095>
- Granovskii, M., Dincer, I., y Rosen, M. A. (2006). Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles. *Journal of Power Sources*, 159(2), 1186–1193. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.11.086>
- Hwang, H. T., y Varma, A. (2015). Hydrogen Storage Methods for Fuel Cell Vehicles: Current Status. En *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering* (Vol. 350). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.11132-1>
- Liu, X., Reddi, K., Elgowainy, A., Lohse-Busch, H., Wang, M., y Rustagi, N. (2020). Comparison of well-to-wheels energy use and emissions of a hydrogen fuel cell electric vehicle relative to a conventional gasoline-powered internal combustion engine vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(1), 972–983.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.192>

- Lowesmith, B. J., Hankinson, G., y Chynoweth, S. (2014). Safety issues of the liquefaction, storage and transportation of liquid hydrogen: An analysis of incidents and HAZIDS. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(35), 20516–20521. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.002>
- Mao, Y., Gao, Y., Dong, W., Wu, H., Song, Z., Zhao, X., Sun, J., y Wang, W. (2020). Hydrogen production via a two-step water splitting thermochemical cycle based on metal oxide – A review. *Applied Energy*, 267(March), 114860. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114860>
- Miotti, M., Hofer, J., y Bauer, C. (2017). Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(1), 94–110. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0986-4>
- Moradi, R., y Groth, K. M. (2019). Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 12254–12269. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041>
- Navas-Anguita, Z., García-Gusano, D., Dufour, J., y Iribarren, D. (2020). Prospective techno-economic and environmental assessment of a national hydrogen production mix for road transport. *Applied Energy*, 259(August), 114121. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114121>
- Nazir, H., Louis, C., Jose, S., Prakash, J., Muthuswamy, N., Buan, M. E. M., Flox, C., Chavan, S., Shi, X., Kauranen, P., Kallio, T., Maia, G., Tammeveski, K., Lymperopoulos, N., Carcadea, E., Veziroglu, E., Iranzo, A., y Kannan, A. M. (2020). Is the H2 economy realizable in the foreseeable future? Part I: H2 production methods. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(27), 13777–13788. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.092>
- Nazir, H., Muthuswamy, N., Louis, C., Jose, S., Prakash, J., Buan, M. E., Flox, C., Chavan, S., Shi, X., Kauranen, P., Kallio, T., Maia, G., Tammeveski, K., Lymperopoulos, N., Carcadea, E., Veziroglu, E., Iranzo, A., y Kannan, A. M. (2020). Is the H2 economy realizable in the foreseeable future? Part II: H2 storage, transportation, and distribution. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.241>
- Ogungbemi, E., Wilberforce, T., Ijaodola, O., Thompson, J., y Olabi, A. G. (2020). ScienceDirect Selection of proton exchange membrane fuel cell for transportation. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.147>
- Ozbilen, A., Dincer, I., y Rosen, M. A. (2013). Comparative environmental impact and efficiency assessment of selected hydrogen production methods. *Environmental Impact Assessment Review*, 42, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.03.003>

- Paster, M. D., Ahluwalia, R. K., Berry, G., Elgowainy, A., Lasher, S., McKenney, K., y Gardiner, M. (2011). Hydrogen storage technology options for fuel cell vehicles: Well-to-wheel costs, energy efficiencies, and greenhouse gas emissions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(22), 14534–14551. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.07.056>
- Pehnt, M. (2001). Life-cycle assessment of fuel cell stacks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26(1), 91–101. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(00\)00053-7](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(00)00053-7)
- Santiago, O. (2017, octubre). *Almacenamiento de hidrógeno comprimido: tipos de tanques | Apilados*. <http://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/>
- Schallenberg, J. C., Gonzalo, R., Izquierdo, P., Hernández Rodríguez, C., Unamunzaga, P., Ramón, F., Déniz, G., Díaz, M., Delia, T., Pérez, C., Martel Rodríguez, G., Pardilla, J., Vicente, F., y Ortin, S. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*.
- Sharma, S., Panwar, A. K., y Tripathi, M. M. (2020). Storage technologies for electric vehicles. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.04.004>
- Shell. (2017). *Energy of the future?*
- Shusheng, X., Qiuji, S., Baosheng, G., Encong, Z., y Zhankuan, W. (2020). Research and development of on-board hydrogen-producing fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.236>
- Siddiqui, O., & Dincer, I. (2019). A well to pump life cycle environmental impact assessment of some hydrogen production routes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(12), 5773–5786. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.118>
- Smith, L., Ibn-Mohammed, T., Yang, F., Reaney, I. M., Sinclair, D. C., y Koh, S. C. L. (2019). Comparative environmental profile assessments of commercial and novel material structures for solid oxide fuel cells. *Applied Energy*, 235(June 2018), 1300–1313. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.028>
- Solaymani, S. (2019). CO2 emissions patterns in 7 top carbon emitter economies: The case of transport sector. *Energy*, 168, 989–1001. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.145>
- Sørensen, B., y Spazzafumo, G. (2018). *Hydrogen and fuel cells*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100708-2.00002-3>
- Sundén, B. (2019a). *Hydrogen, Batteries and Fuel Cells*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816950-6.00003-8>
- Sundén, B. (2019b). *Hydrogen, Batteries and Fuel Cells*. 123–144. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816950-6.00008-7>

- Thomas, J. M., Edwards, P. P., Dobson, P. J., y Owen, G. P. (2020). Decarbonising energy: The developing international activity in hydrogen technologies and fuel cells. *Journal of Energy Chemistry*, 51, 405–415. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.03.087>
- Valente, A., Iribarren, D., Candelaresi, D., Spazzafumo, G., y Dufour, J. (2019). Using harmonised life-cycle indicators to explore the role of hydrogen in the environmental performance of fuel cell electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.059>
- Wang, Q., Xue, M., Lin, B. Le, Lei, Z., y Zhang, Z. (2020). Well-to-wheel analysis of energy consumption, greenhouse gas and air pollutants emissions of hydrogen fuel cell vehicle in China. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123061. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123061>
- Wang, X., Hoekman, S. K., Han, Y., Chow, J. C., Watson, J. G., Wu, X., Wu, Y., Schuetzle, D., y Schuetzle, R. (2020). Potential emission reductions by converting agricultural residue biomass to synthetic fuels for vehicles and domestic cooking in China. *Particuology*, 49(x), 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2019.04.008>
- Wang, Y., Wang, B., y Seo, B. (2020). Fundamentals, Materials, and Machine Learning of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Technology. *Energy and AI*, 2, 74. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2020.100014>
- Yazdanie, M., Noembrini, F., Dossetto, L., y Boulouchos, K. (2014). A comparative analysis of well-to-wheel primary energy demand and greenhouse gas emissions for the operation of alternative and conventional vehicles in Switzerland, considering various energy carrier production pathways. *Journal of Power Sources*, 249, 333–348. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.10.043>
- Zhang, Y. T., Claudel, C. G., Hu, M. Bin, Yu, Y. H., y Shi, C. L. (2020). Develop of a fuel consumption model for hybrid vehicles. *Energy Conversion and Management*, 207(January), 112546. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112546>