

Análisis del hidrógeno como vector energético en Argentina: ¿cómo avanzamos y a donde podemos llegar?

Tesista: Inga. Julieta Rabinovich

Directora de Tesis: Dra. Inga. Silvia Daniela Romano

Buenos Aires, 2020

MAESTRÍA INTERDISCIPLINARIA EN ENERGÍA
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
CENTRO DE ESTUDIOS DE LA ACTIVIDAD REGULATORIA
ENERGÉTICA

Índice

RESUMEN EJECUTIVO	7
Objetivo de la Tesis	7
Contenido de la Tesis	7
PARTE I: EL HIDRÓGENO Y SUS APLICACIONES	11
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO 2: HIDRÓGENO	14
2.1. ¿Qué es el hidrógeno?	14
2.2. Propiedades	14
2.3. Producción	15
2.4. Almacenamiento	25
2.5. Transporte	26
2.6. POWER-TO-GAS (P2G)	27
3.1. Aplicaciones convencionales	31
3.2. Aplicaciones no convencionales	33
3.3. Aplicaciones estacionarias	34
3.4. Aplicaciones portátiles	34
CAPÍTULO 4: APLICACIONES NO CONVENCIONALES DEL HIDRÓGENO : EL TRANSPORTE	35
4.1. Antecedentes	35
4.2. Funcionamiento	37
4.3. Vehículos de transporte liviano	38
4.4. Colectivos	43
4.5. Camiones pesados	44
4.6. Montacargas	46
4.7. Trenes	47
4.8. Barcos y Ferries	48
4.9. Aviones	49
4.10. Estaciones de carga	50
4.11. ¿Autos eléctricos o a hidrógeno?	52
PARTE II: REGULACIÓN Y LEGISLACIÓN DEL HIDRÓGENO	55
CAPÍTULO 5: REGULACIÓN DEL HIDRÓGENO EN EL MUNDO Y ACCIONES CONCRETAS	56
5.1. Iniciativas internacionales conjuntas	56
5.2. Países con desarrollo de hidrógeno	57
CAPÍTULO 6: REGULACIÓN DEL HIDRÓGENO EN ARGENTINA	62
PARTE III: PERSPECTIVAS PARA EL HIDRÓGENO EN ARGENTINA	65

CAPÍTULO 7: DESARROLLO DEL HIDRÓGENO EN ARGENTINA	66
7.1. Producción y usos de Hidrógeno en Argentina	66
7.2. Zonas potenciales de producción de hidrógeno en Argentina	68
7.3. Avances del Hidrógeno en Argentina	71
7.4. Costos de producción de Hidrógeno en Argentina	71
7.5. Barreras para la creación del mercado del Hidrógeno en Argentina	73
7.6. Instituciones de investigación dedicadas al Hidrógeno en Argentina	74
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES	76
LISTADO DE INSTITUCIONES	79
BIBLIOGRAFÍA	80

Índice de figuras

FIGURA 1: MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO	15
FIGURA 2: PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL	18
FIGURA 3: ESQUEMA DE UN PROCESO DE ELECTRÓLISIS DEL AGUA	19
FIGURA 4: ESQUEMA DE UN ELECTROLIZADOR ALCALINO	20
FIGURA 5: ESQUEMA DE LA CELDA DE ÓXIDO SÓLIDO	22
FIGURA 6: RUTAS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO RENOVABLE Y NIVELES ACTUALES DE MADUREZ	22
FIGURA 7: FORMAS DE ALMACENAMIENTO	25
FIGURA 8: ESQUEMA DE POWER-TO-GAS	27
FIGURA 9: EVOLUCIÓN DEL POWER-TO-X	28
FIGURA 10: CANTIDAD DE PROYECTOS A PARTIR DE METANO E HIDRÓGENO	29
FIGURA 11: ROL DEL HIDRÓGENO EN EL SISTEMA ENERGÉTICO	31
FIGURA 12: APLICACIONES DEL HIDRÓGENO - 2018	32
FIGURA 13: STOCK DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS DE PILA DE COMBUSTIBLE (FCEV) EN 2017	36
FIGURA 14: FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE EN UN VEHÍCULO	38
FIGURA 15: DESARROLLO DE LOS AUTOMÓVILES FCEV	39
FIGURA 16: ESQUEMA FCEV	40
FIGURA 17: ESQUEMA FCEB	43
FIGURA 18: FCEB EN ESTADOS UNIDOS	44
FIGURA 19: KENWORTH T680 – BALLARD FCVELOCITY(R)-HD MODULE	45
FIGURA 20: NIKOLA HYDROGEN TRUCK	46
FIGURA 21: DEPÓSITO FEDEX Y MINI PLANTA DE HIDRÓGENO	46
FIGURA 22 : LOCOMOTORA DE DERIVACIÓN DE CELDA DE COMBUSTIBLE BNSF, IMPULSADA POR CELDAS DE COMBUSTIBLE BALLARD	47
FIGURA 23 : TREN CORADIA ILINT	48
FIGURA 24: TREN DE HIDRÓGENO REGIONAL SIEMENS MIREO	48
FIGURA 25: FERRY DE PASAJEROS HYDROGENESIS	49
FIGURA 26: HY4 AVIÓN DE PASAJEROS DE CERO EMISIONES	50
FIGURA 27: ESTACIONES DE HIDRÓGENO POR PAÍS EN 2017	51
FIGURA 28: EMPRESAS PERTENECIENTES AL CONSEJO DEL HIDRÓGENO	56
FIGURA 29: CREACIÓN DE EMPLEOS A TRAVÉS DEL DESARROLLO DE LA INDUSTRIA DEL HIDRÓGENO	57
FIGURA 30: NUMERO DE COLECTIVOS O COCHES CON PILAS DE COMBUSTIBLE REQUERIDOS PARA SUMINISTRAR LA ENERGÍA DE EMERGENCIA PARA UN DÍA	58

FIGURA 31 : HOJA DE RUTA PARA LOGRAR UNA SOCIEDAD BASADA EN EL HIDRÓGENOFUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN BASE A ESTRATEGIA BÁSICA PARA EL HIDRÓGENO, CONSEJO MINISTERIAL DE ENERGÍAS RENOVABLES, HIDRÓGENO Y ASUNTOS RELACIONADOS – DICIEMBRE 2017 [47]	59
FIGURA 32: CONSUMO DE HIDRÓGENO EN ARGENTINA - 2017	67
FIGURA 33: COSTOS DE HIDRÓGENO A PARTIR DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS HÍBRIDOS Y SISTEMAS EÓLICOS A LARGO PLAZO	68
FIGURA 34: MAPA DEL POTENCIAL DE VIENTOS EN ARGENTINA	69
FIGURA 35: MAPA DEL POTENCIAL SOLAR EN ARGENTINA EN JUNIO Y ENERO	70

Índice de tablas

TABLA 1: CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO HIDRÓGENO EN LA TABLA PERIÓDICA	14
TABLA 2: CARACTERÍSTICAS TECNO-ECONÓMICAS DE LAS TECNOLOGÍAS ALK Y PEM ...	21
TABLA 3: OBJETIVOS DE LOS PRINCIPALES PAÍSES CON DESARROLLO DE FCEV	37
TABLA 4: COMPARACIÓN DE FCEV - 2018	41
TABLA 5: OBJETIVOS DE LOS PRINCIPALES PAÍSES CON DESARROLLO DE FCEV PARA LA INSTALACIÓN DE ESTACIONES DE CARGA	51
TABLA 6: COMPARACIÓN ENTRE AUTO CI, BEV, FCEV	52
TABLA 7: COMPARACIÓN EMISIONES DE GEI	53
TABLA 8: PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO EN ARGENTINA	66
TABLA 9: COSTOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO	72
TABLA 10: COSTOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO EÓLICO EN ARGENTINA.....	73

RESUMEN EJECUTIVO

Objetivo de la Tesis

Desde hace unos años el mundo está viviendo importantes fenómenos con respecto al cambio climático. La matriz energética mundial incluye un gran porcentaje de combustibles fósiles y por medio de diferentes políticas se busca que se empiece a diversificar, para así poder cumplir con las metas que se han impuesto para que el cambio climático se vea apaciguado. La diversificación responderá a las políticas que implementan los diferentes países con respecto a la emisión de gases de efecto invernadero. La incorporación del hidrógeno como combustible para el transporte o para la generación de energía eléctrica, son soluciones para poder lograrlo. A mediano y largo plazo, el hidrógeno podría convertirse en una forma de transportar y distribuir energía renovable a largas distancias, especialmente en aquellos casos en que la red eléctrica tiene capacidad insuficiente o cuando es demasiado impráctica o costosa de construir.

La matriz energética de Argentina está conformada principalmente por combustibles fósiles. En 2018 representó el 84% de la misma¹, por lo que éste es el disparador principal para pensar en su diversificación.

Además, Argentina es un país donde las fuentes de energía renovables son abundantes y baratas, particularmente en la Patagonia, con un gran potencial eólico, podría producir hidrógeno para el uso dentro del país y para la venta a países con un potencial limitado o mayores costos de generación de energía renovable.

En esta tesis se propone analizar el grado de desarrollo del hidrógeno como vector energético en Argentina, teniendo como referencia las experiencias internacionales. El análisis que se realizó comprende diversos enfoques: tecnológico, ambiental y jurídico, para poder lograr la inserción del hidrógeno, en consecuencia, la diversificación de la matriz energética.

Contenido de la Tesis

La tesis está dividida en capítulos agrupados en tres libros:

PARTE I: EL HIDRÓGENO Y SUS APLICACIONES. Cada capítulo está enfocado en relevar y describir las utilidades del hidrógeno y principalmente sus aplicaciones, tanto las convencionales como las no convencionales.

- Capítulo 1: En la introducción se explica la necesidad de incorporar al hidrógeno como vector energético para lograr la diversificación de la matriz energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático.
- Capítulo 2: Este capítulo describe las propiedades del hidrógeno, como se produce, como se almacena y como se puede transportar. Además, posee un apartado relevante de cómo se puede usar el hidrógeno para el desarrollo del Power-to-gas, es decir, la conversión de

¹ Balance energético Nacional de la República Argentina, 2018 – Secretaría de energía

electricidad en combustibles gaseosos como el hidrógeno, como forma de almacenamiento de energía.

- Capítulo 3: En este capítulo se describen los usos del hidrógeno. Las aplicaciones convencionales son aquellas que se vienen realizando desde hace muchos años y en donde el hidrógeno es producido a partir de combustibles fósiles. Las aplicaciones no convencionales son aquellas que contribuirán al reemplazo de algunos usos como en la movilidad, la generación de electricidad y en aplicaciones portátiles. De esta manera el hidrógeno puede vincular diferentes sectores de energía y redes de transmisión y distribución, y así aumentar la flexibilidad operativa de los futuros sistemas de energía bajos en carbono.
- Capítulo 4: El transporte es uno de los sectores prioritarios en los que hay que trabajar para poder reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Como aplicación no convencional es una de las opciones más prometedoras para la utilización del hidrógeno. En este capítulo se describe la utilización del vehículo eléctrico de celda de combustible (FCEV) para los vehículos de transporte liviano, como otros medios de transporte que podrían utilizar el hidrógeno como combustible. También se desarrolla la importancia de la infraestructura de repostaje la cual deberá conectar los puntos principales por donde se desplazarán estos vehículos.

PARTE II: REGULACIÓN Y LEGISLACIÓN DEL HIDRÓGENO.

- Capítulo 5: Este capítulo tiene el objetivo de relevar hitos con respecto al desarrollo y utilización del hidrógeno como fuente de energía, a nivel mundial. Pone en evidencia los principales países (Japón, Alemania y Estados Unidos) donde está desarrollada la regulación pertinente para la investigación y utilización del hidrógeno para sus distintas aplicaciones.
- Capítulo 6: En Argentina se ha aprobado la ley 26.123 en el año 2006, y la misma no ha sido reglamentada hasta la fecha. En consecuencia, lo que se relevó en este capítulo son todas las iniciativas que se han tenido para incentivar el uso del hidrógeno.

PARTE III: PERSPECTIVAS PARA EL HIDRÓGENO EN ARGENTINA

- Capítulo 7: El desarrollo del hidrógeno en Argentina comenzó a mediados del siglo pasado para la producción de fertilizantes nitrogenados. Luego del descubrimiento de gas natural, el método de reformado de vapor se convirtió en el preferido para la producción de

hidrógeno para las industrias alimenticias, farmacéuticas y químicas, además de la de fertilizantes. En los últimos años se han probado diferentes métodos para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables. Argentina se encuentra en una posición predominante debido a su abundancia de recursos principalmente eólico y solar.

- Capítulo 8: CONCLUSIONES

Como contenido de la tesis también se encuentra un listado de instituciones tanto nacionales como internacionales en las que se puede consultar los avances de las mismas en materia de desarrollos tanto de investigación como los que se implementan.

PARTE I: EL HIDRÓGENO Y SUS APLICACIONES

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

El uso de las fuentes renovables de energía es la herramienta más importante que tiene la humanidad para minimizar el riesgo que el calentamiento global representa para nuestra civilización, y la única solución sostenible y beneficiosa para el ambiente. En particular, la transformación de hidrógeno en energía eléctrica y combustible, podría garantizar seguridad en materia de abastecimiento energético y contribuir al crecimiento económico de la mayoría de los países del mundo. Es un recurso muy valioso si se piensa como un vector energético para diversas aplicaciones de uso final que respalden la descarbonización en el transporte, la industria, los edificios y la energía.

El hidrógeno no es un recurso natural. En la actualidad, la mayor parte del hidrógeno que se produce proviene de combustibles fósiles (aproximadamente el 96%) y la manera más común de hacerlo es mediante el reformado de metano, el cual produce CO_2 y otros gases contaminantes. Solamente alrededor del 4% del suministro mundial de hidrógeno se produce mediante la electrólisis. Existen principalmente tres tecnologías para obtener hidrógeno: los electrolizadores alcalinos, los electrolizadores de membrana de intercambio de protones y los electrolizadores de óxido sólido. Los utilizados actualmente y probados, son los alcalinos y los de membrana de intercambio de protones. Estos últimos son más flexibles, por ello están ganando territorio rápidamente frente a los alcalinos utilizados durante casi un siglo. Los de óxido sólido son los que se encuentran en fase de desarrollo, pero tienen un potencial de mejorar la eficiencia energética del proceso.

La obtención del hidrógeno a partir de las energías renovables, como la solar o la eólica, suponen una gran ventaja para la transición energética a la que el mundo se está dirigiendo. Los combustibles fósiles siguen siendo un gran porcentaje en la matriz energética de casi todos los países del mundo, y el hidrógeno podría empezar a hacerse un lugar reemplazando, inicialmente, una parte de ellos. Se puede obtener a partir de electrolizadores alimentados por viento y/o fotovoltaicidad y puede emplearse puro o ser materia prima para la obtención de gas natural sintético renovable. El exceso de potencia variable generada por la energía solar y eólica podría ser utilizado en la producción de hidrógeno y el transporte, la industria, o la inyección en la red de gas.

El principal consumidor de hidrógeno es la industria química, en el proceso de síntesis de amoníaco y de metanol para uso industrial, y en refinación para el hidrocrackeo y desulfuración de combustibles. También es utilizado en la industria alimenticia, farmacéutica y en la producción de hierro, acero, vidrio, productos electrónicos, etc. Pero la demanda combinada de éstos es mínima. Otro de los usos es en la combustión para cohetes.

El principal sector de atención es el de la movilidad eléctrica, empleando hidrógeno y pilas de combustible. Las pilas de combustible, a bordo de los vehículos, son generadores de electricidad que utilizan el hidrógeno almacenado en tanques y el oxígeno del aire. La generación eléctrica en grandes motogeneradores han reportado una significativa reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, en particular óxidos de nitrógeno. Ello es posible gracias a las características del hidrógeno al emplearse en mezclas con el gas natural.

Con respecto al marco legal, en Argentina existe la ley 26.123 “Promoción del hidrógeno” redactada en el año 2006, la cual no llegó a ser reglamentada todavía. La misma declara de

interés nacional el desarrollo de la tecnología, la producción, el uso y aplicaciones del hidrógeno como combustible y vector de energía, también promueve la investigación.

Es importante que se empiecen a definir políticas y programas de acción concretos en nuestro país, empezando por reglamentar la ley. Un marco normativo para lograr una rápida penetración y alentar la inversión privada es fundamental. Teniendo como referencia el grupo de países donde hoy es significativo el desarrollo como Alemania, Japón, Canadá, China y Estados Unidos (particularmente en California). Estas políticas deberían ser aplicables en toda la cadena de suministro (fabricante de equipos, operadores de infraestructura, fabricantes de vehículos, etc.)

El hidrógeno contribuye al acoplamiento sectorial entre el sistema eléctrico y la industria, los edificios y el transporte, aumentando el nivel de flexibilidad al tiempo que facilita la integración de la variabilidad de las energías renovables en el sistema de energía. A mediano y largo plazo, el hidrógeno podría convertirse en una forma de transportar y distribuir energía renovable a largas distancias, especialmente en aquellos casos en que la red eléctrica tiene capacidad insuficiente o cuando es demasiado impráctica o costosa de construir. En Argentina, donde las fuentes de energía renovables son abundantes y baratas, particularmente en la Patagonia con su gran potencial eólico, se podría producir hidrógeno para el transporte a regiones con un potencial limitado o mayores costos de generación de energía renovable. Las tuberías son la ruta más económica para transportar hidrógeno en grandes volúmenes, por lo tanto, se podrían utilizar las redes de transporte de gas natural permitiendo que los volúmenes aumenten rápidamente y proporcionen las economías de escala necesarias para reducir el costo del hidrógeno.

La industria enfrenta desafíos en cada paso de la cadena de valor del hidrógeno, por lo que se deberá proponer un conjunto de medidas para superarlos. A corto plazo se necesita poder cubrir la diferencia de costos iniciales con las tecnologías existentes, particularmente en el caso de los vehículos y de infraestr

CAPÍTULO 2: HIDRÓGENO

2.1. ¿Qué es el hidrógeno?

El hidrógeno es el elemento más simple de la naturaleza y el gas más abundante en el universo. Se encuentra en el sol y en la mayoría de las estrellas. Se produce naturalmente en la tierra unido a otros elementos en líquidos, gases o sólidos.

Es un elemento esencial para la vida, está presente en el agua y en casi todas las moléculas de los seres vivos. Sin embargo, el hidrógeno en sí no desempeña un papel particularmente activo. Permanece unido a los átomos de carbono y oxígeno, y combinado con el carbono forma diferentes compuestos, o hidrocarburos, entre los que se encuentran el gas natural, el carbón y el petróleo. [1]

Tabla 1: Características del elemento hidrógeno en la tabla periódica

	Grupo	1	Punto de fusión	-259,16°C
	Período	1	Punto de ebullición	-252,879°C
	Bloque	s	Densidad (g/cm ³)	0,000082
	Número atómico	1	Masa atómica relativa	1,008
	Estado a 20°C	Gas	Isótopos	¹ H, ² H
	Configuración electrónica	1s ¹		

Fuente: Royal Society of Chemistry [2]. La imagen se basa en el modelo atómico icónico propuesto por primera vez por Niels Bohr en 1913.

2.2. Propiedades

El hidrógeno tiene un contenido energético más alto que cualquier combustible en peso (aproximadamente tres veces más que la nafta), y a su vez el contenido energético más bajo en volumen (aproximadamente cuatro veces menos que la nafta). Es una molécula estable, y a diferencia de los explosivos necesita una fuente de ignición externa para que se produzca la combustión. Para que arda son necesarias tres condiciones: que el hidrógeno se mezcle con un oxidante, que la mezcla esté dentro de los límites de inflamabilidad y que esté presente una fuente apropiada de ignición [3]. Las mezclas de hidrógeno con aire, oxígeno, u otros oxidantes pueden ser inflamables en un amplio rango de composición.

Los vectores energéticos permiten el transporte de energía en una forma utilizable de un lugar a otro. El hidrógeno a igual que la electricidad, es un portador de energía que debe producirse a partir de otra sustancia. Se puede producir de una variedad de fuentes, como el agua, los combustibles fósiles o la biomasa, y se puede utilizar como fuente de energía o combustible [1], como se ampliará en la siguiente sección

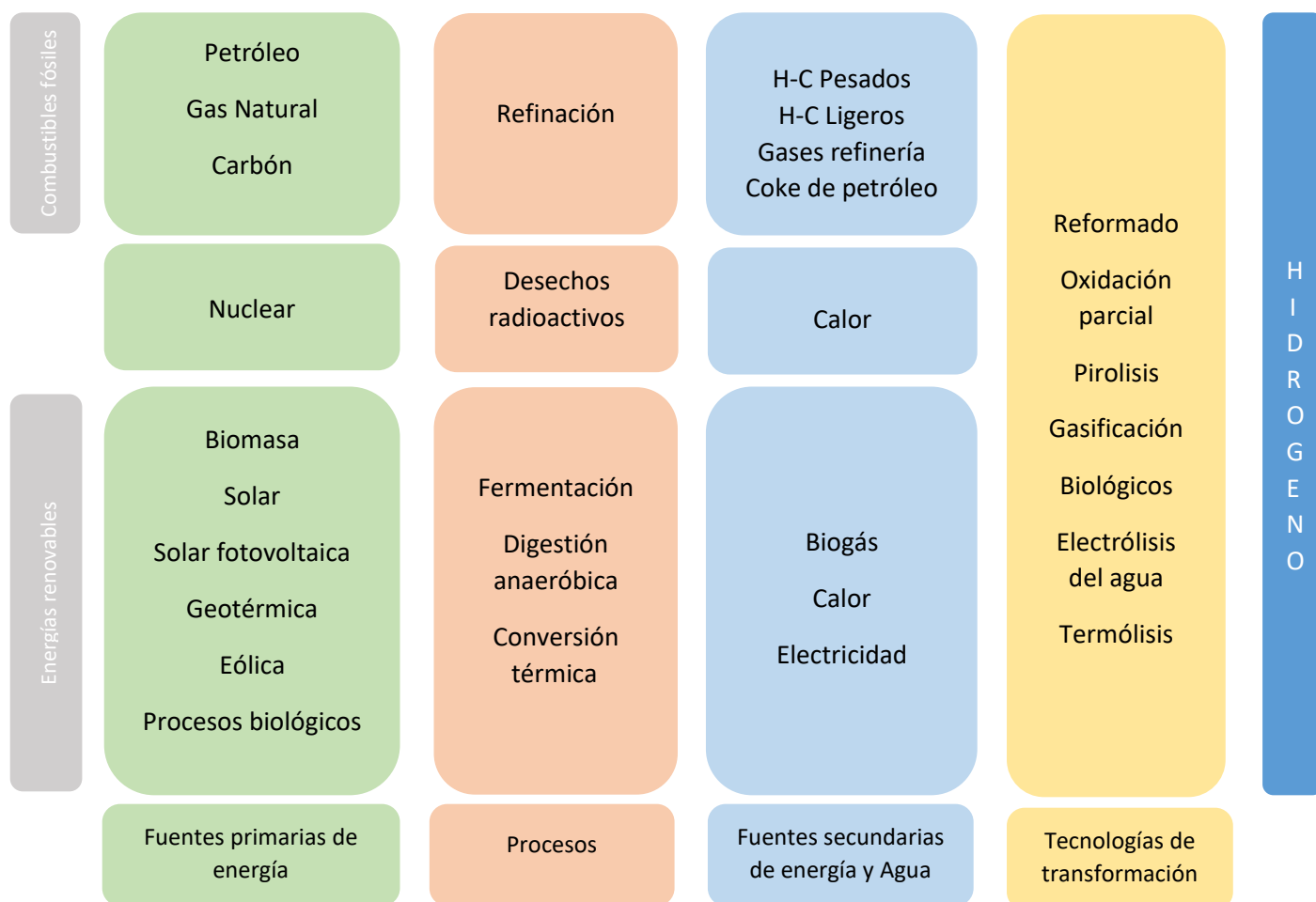
2.3. Producción

La producción de hidrógeno se puede realizar mediante diversos métodos que requieren la separación de hidrógeno de otros elementos químicos como el carbono y oxígeno. Se puede producir a partir de diversas materias primas domésticas utilizando una variedad de tecnologías en el proceso.

Cualquier sustancia que contiene hidrógeno puede ser materia prima para la obtención del mismo, como por ejemplo los combustibles fósiles, la biomasa o el agua. Si bien la mayor parte del hidrógeno se produce calentando gas natural con vapor para formar gas de síntesis (una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono), de donde se separa el hidrógeno. También existen otros métodos: usando electricidad (por electrólisis del agua), químicos (por reducción química) o calor (por termólisis). Estos métodos están menos desarrollados en comparación con la generación de hidrógeno a partir de hidrocarburos, pero han ido creciendo en los últimos años.

En la Figura 1 se puede ver un esquema con los diferentes métodos de producción de hidrógeno.

Figura 1: Métodos de producción de hidrógeno



Fuente: Elaboración propia basado en *Procesos de Producción de Hidrógeno* - <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-processes>

A continuación, se explican brevemente las distintas tecnologías de transformación para la producción de hidrógeno.

2.3.1. Procesos termoquímicos

2.3.1.1. Reformado de hidrocarburos

El proceso de reformado con vapor de agua (conocido por las siglas SMR, “Steam Methane Reforming”) se puede aplicar a gran variedad de hidrocarburos y sus mezclas (gas natural, GLPs, hidrocarburos líquidos livianos) y alcoholes.

El reformado de metano (CH_4) con vapor es un proceso utilizado desde hace muchos años para producir H_2 . Por tratarse de la tecnología más económica, este proceso es el que se utiliza en la actualidad en la producción industrial del hidrógeno, de acuerdo a la ecuación (1)



Para el procedimiento de reformado mediante vapor, los combustibles que mejor responden a la reacción son los hidrocarburos ligeros, entre ellos el gas natural, el propano y el butano.

El gas natural reacciona con vapor de agua sobre un catalizador de níquel colocado en el reformador primario a temperaturas de 900°C y presión total de 20-30 bar. Puesto que el gas natural contiene impurezas de azufre, se requiere una etapa previa de eliminación de este contaminante para evitar el deterioro de la actividad catalítica.

Como el gas natural también contiene una pequeña proporción de otros hidrocarburos tales como etano, propano y butano, que se descomponen con facilidad y generan residuos carbonosos en las condiciones de reformado del metano, componente mayoritario, se requiere una etapa previa de reformado (pre-reformado) para transformar una parte de los hidrocarburos presentes en el gas natural en una mezcla de CO e H_2 .

En lugar de metano, se puede utilizar metanol para la producción industrial de hidrógeno. En este proceso, el metanol se hace reaccionar con vapor de agua sobre un catalizador para producir H_2 . Esta es una reacción endotérmica en la que el calor requerido se obtiene de la combustión del gas de cola junto a otra pequeña fracción de metanol. La corriente de hidrógeno se purifica en una unidad de adsorción/desorción, tal como se hace en el reformado de metano.

2.3.1.2. Oxidación parcial

Mediante la oxidación parcial (POX, por sus siglas en inglés) se puede obtener hidrógeno de una gran variedad de materias primas o de subproductos de otras reacciones. Entre estos se encuentran los hidrocarburos, los residuos industriales, el metano, la biomasa, etc.

La reacción ocurre mediante la oxidación parcial del oxígeno, a temperaturas $1150\text{-}1350^\circ\text{C}$ y se produce un gas bruto compuesto de H_2 , CO , CO_2 , y CH_4 . Las impurezas contenidas en este gas dependen de la composición de la materia prima que se utilice y de las condiciones de desarrollo del proceso (presión y temperatura), encontrándose el azufre procedente de la materia prima prácticamente en su totalidad en forma de H_2S . Luego se realizan unas etapas de depuración y de acondicionamiento, tras las cuales se obtiene hidrógeno puro. La eficiencia de este proceso esta entre el 65-75%.

2.3.1.3. Reformado autotérmico

El reformado autotérmico (ATR, “Auto-Thermal Reforming”) es un proceso aplicado industrialmente en grandes unidades centralizadas. Sólo recientemente se ha trasladado esta

tecnología a pequeños equipos. Se trata de un método que combina el SMR y el POX, de modo que el calor liberado en el último se aproveche para el primero, dando lugar a un balance calórico neto nulo. El CO producido es desplazado con agua para producir más hidrógeno y CO₂. La eficiencia del proceso es similar a la del método de oxidación parcial [3].

2.3.1.4. Gasificación

La gasificación del carbón es el proceso que se usa para producir gas de síntesis (formado por una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno, entre otros). Este es el primer método empleado para la producción de hidrógeno.

El proceso de gasificación consiste en la inyección del carbón con oxígeno y vapor de agua en una instalación llamada gasificador, a una temperatura entre 700 y 1500 °C.

El proceso que se produce en el gasificador es esencialmente una combustión con defecto de aire (10% a 50% estequiométrico). El producto final es 'syngas', y su composición final depende de las condiciones de presión y temperatura. En la mayoría de los casos es refinado aún más para obtener una mayor cantidad de hidrógeno puro.

En la gasificación de la biomasa, ésta se calienta a alta temperatura en un reactor donde se rompen las uniones de las moléculas que la forman. Esto genera un gas constituido principalmente por hidrógeno, monóxido de carbono y metano. Este metano se transforma en hidrógeno y dióxido de carbono, a partir del mismo método de reformado de vapor. [3]

La gasificación de la biomasa en presencia de O₂ genera una corriente gaseosa rica en hidrógeno que se reforma con vapor de agua a la salida del gasificador con el objetivo de producir hidrógeno adicional. El inconveniente principal de la gasificación de biomasa es la formación de alquitrán. Los residuos pesados polimerizan y forman estructuras más complejas que no resultan apropiadas para producción de hidrógeno mediante reformado con vapor. La formación de alquitrán puede minimizarse mediante diseño apropiado del gasificador, incorporación de aditivos catalíticos y también mediante el control de las variables de operación. Los catalizadores reducen el contenido de alquitrán, pero son particularmente efectivos para mejorar la calidad y conversión de la fracción gaseosa producida. Otro problema inherente de la gasificación de biomasa es la formación de ceniza, que puede producir acumulación de sólidos, taponamiento y desactivación el catalizador. Estos problemas se pueden minimizar mediante extracción y fraccionamiento de la biomasa [4].

Debido a que el crecimiento de la biomasa consume dióxido de carbono de la atmósfera, las emisiones netas de carbono de este método pueden ser bajas, especialmente si se combinan con la captura, utilización y almacenamiento de carbono a largo plazo.

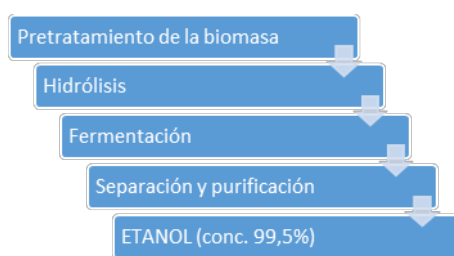
2.3.2. Procesos bioquímicos

Dentro de las formas de producir hidrógeno a partir de biomasa destacan las técnicas de fermentación, que pueden ser de tipo alcohólica o de tipo anaeróbica [5].

2.3.2.1. Fermentación alcohólica

Las plantas almacenan la energía solar captada en forma de hidratos de carbono simples (azúcares) o complejos (almidón o celulosa), a partir de los que se puede obtener bioetanol por fermentación según las siguientes fases:

Figura 2: Proceso de producción de bioetanol



Fuente: Elaboración propia basado en El Hidrógeno y la Energía. [5]

Sobre el bioetanol producido se puede llevar a cabo un reformado con vapor para la obtención de hidrógeno.

2.3.2.2. Fermentación anaeróbica

También conocida como digestión anaerobia, se trata de una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que produce una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono) conocida como biogás, y a una suspensión acuosa o lodo que contiene los componentes difíciles de degradar y los minerales inicialmente presentes en la biomasa. [5]

La materia prima para producir biogás es biomasa residual con alto contenido en humedad, especialmente purines ganaderos y lodos de depuradoras de aguas residuales urbanas. Aunque hay mucha experiencia en el proceso, su química y microbiología no siempre son conocidas en detalle. Como variables importantes en el proceso se han identificado la temperatura (lográndose un funcionamiento óptimo a 35°C), la acidez (valor óptimo de pH entre 6,6 y 7,6), contenido en sólidos (deseable inferior al 10%), existencia de nutrientes para las bacterias y ausencia de inhibidores del proceso como amoníaco, sales minerales, detergentes y pesticidas. En función de todas estas variables se logra un biogás con un contenido en metano que oscila entre el 50% y el 70%, siendo el resto mayoritariamente dióxido de carbono.

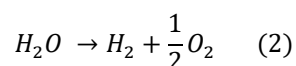
Dado el elevado contenido de metano en el biogás, éste puede ser tratado con cualquiera de los procedimientos de reformado.

2.3.2.3. Fotobiológico

Los microbios, como las bacterias y las microalgas, pueden producir hidrógeno a través de reacciones biológicas, utilizando la luz solar o la materia orgánica. Estas vías tecnológicas se encuentran en una etapa temprana de la investigación, pero tienen el potencial para la producción sostenible de hidrógeno bajo en carbono a largo plazo.

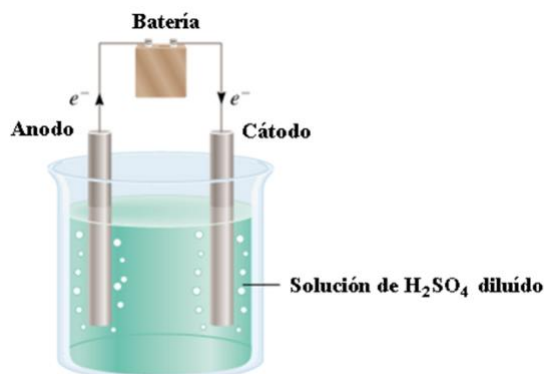
2.3.3. Electrólisis

La descomposición de un compuesto por medio de una corriente eléctrica recibe el nombre de electrólisis. La electrólisis del agua produce hidrógeno y oxígeno en proporción de 2 a 1 en volumen cuando una batería u otra fuente de corriente directa suministra energía [6] cómo se esquematiza en la Figura 3 y de acuerdo a la ecuación (2).



En el ánodo se producen iones hidrógeno (H^+) y en el cátodo se forman iones hidróxido (OH^-). Los iones pertenecientes a la solución de ácido sulfúrico diluido (H_2SO_4) no participan en las reacciones de los electrodos, su función es actuar como transportadores de la carga, es decir conducen la corriente entre los electrodos y mantienen la neutralidad eléctrica en todos los puntos de la solución.

Figura 3: Esquema de un proceso de electrólisis del agua



Fuente: Electroquímica - Electroquímica Capítulo 19 The McGraw-Hill Companies, Inc.

Existen tres tipos de tecnologías de electrolizadores los electrolizadores alcalinos (ALK), los de membrana de intercambio de protones (PEM) y los de óxido sólido (SOE).

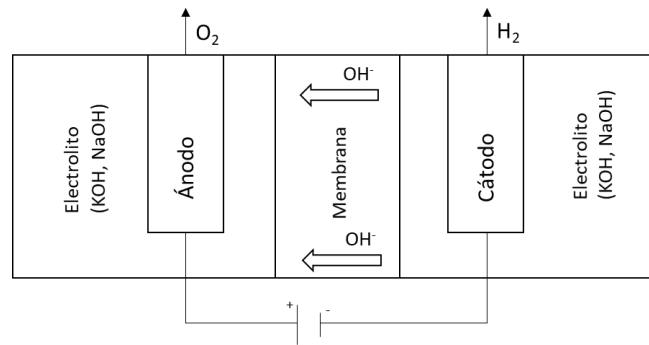
Electrolizadores alcalinos (ALK)

Un ALK es un dispositivo en el que se realiza la electrólisis del agua en el seno de un medio alcalino. En el electrolizador se produce la reacción no espontánea de separar el agua en hidrógeno y oxígeno, al hacer circular una corriente continua de manera conveniente.

La pureza del hidrógeno obtenido por electrólisis con este tipo de equipo es muy alta; se encuentra en el rango de 99.7% a 99.9%.

Como se esquematiza en la Figura 4, un electrolizador eléctrico de este tipo consiste en dos electrodos sumergidos en el electrolito y separados por una membrana. El papel de la solución es maximizar la conductividad iónica, por lo que contiene principalmente KOH (hidróxido de potasio). La temperatura de operación del proceso varía de 40 °C a 90 °C. El agua con electrolito se encuentra en ambos lados de los electrodos. La membrana es penetrada por iones oxidrilo (OH^-), que resultan de la reacción que ocurre en el cátodo. El hidrógeno se obtiene del cátodo, y el agua con una pequeña cantidad de oxígeno del ánodo. Los electrolizadores de este tipo se caracterizan por su larga duración y vida útil [7].

Figura 4: Esquema de un electrolizador alcalino



Fuente: *Análisis of Hydrogen Producción in Alkaline Electrolyzers* [7]

Esta tecnología se viene utilizando desde 1920 para fines no energéticos, particularmente en la industria química.

Electrolizadores de membrana de protones (PEM)

Los PEM producen hidrógeno de muy alta pureza y requieren un agua pura con una conductividad muy baja. El agua se suministra solo en el lado del ánodo, donde se separa en iones hidrógeno y oxígeno. La membrana solo permite pasar los iones hidrógeno, que luego se reducen en el cátodo. El oxígeno se obtiene en el ánodo, mientras que en el cátodo se obtiene hidrógeno que podría penetrar a través de la membrana. En este tipo de electrolizador hay una membrana polimérica muy delgada que separa el cátodo y el ánodo. Una desventaja de estos dispositivos es el consumo progresivo de las membranas durante el trabajo [7].

La diferencia entre los PEM y los ALK, es que los primeros son más seguros, ya que no es necesario manipular un electrolito de naturaleza caustica. Los PEM tienen mayor vida útil debido a que sufren menos desgaste y corrosión; en los ALK se atacan los componentes del electrolizador por corrosión química. Otras de las diferencias es que los ALK trabajan con rangos de temperaturas más elevados que las PEM. La principal desventaja que presentan las pilas alcalinas es su gran sensibilidad a la contaminación por dióxido de carbono. Esto hace que se necesite purificar tanto los tanques de hidrógeno como de oxígeno, siendo un proceso muy costoso.

Tabla 2: Características tecno-económicas de las tecnologías ALK y PEM

Tecnología		ALK		PEM	
	Unidad	2017	2025	2017	2025
Eficiencia	KWh/kg H ₂	51	49	58	52
Eficiencia (LHV)	%	65	68	57	64
Horas de uso	Horas de operación	80.000 h	90.000 h	40.000 h	50.000 h
CAPEX (todo el sistema)	EUR/Kw	750	480	1 200	700
OPEX	OPEX	2%	2%	2%	2%
CAPEX	% CAPEX inicial/año	340	215	420	210
Presión de operación	Bar	1	15	30	60
Vida útil	Años	20		20	

Fuente: *Hydrogen from renewable power 2018 - IRENA* [8]

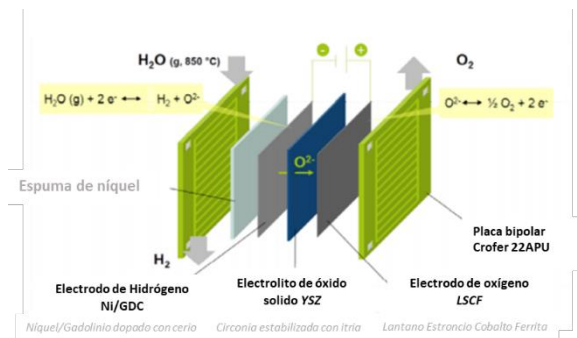
Con respecto al costo, la tecnología PEM ofrece un potencial de reducción de costos muy significativo, ya que se encuentra al comienzo de su curva de desarrollo. Un factor adicional es que la fabricación de la pila de electrolizadores se puede abordar con tecnologías planas, una configuración que es favorable para la reducción de costos, como se observa en otros dispositivos donde se aplican este tipo de tecnologías, como los paneles solares fotovoltaicos [8].

Electrolizadores de óxido sólido (SOE)

Los SOE funcionan efectivamente como celdas de combustible inversas: producen hidrógeno a partir del vapor. Las células de óxido sólido están hechas de una mezcla de materiales cerámicos y metales, conocidos como “cermets”, que pueden manejar las altas temperaturas de operación, entre 600 a 1000 °C. Estas temperaturas permiten que el electrolizador de óxido sólido funcione de manera más eficiente en comparación con su homólogo de electrolizador alcalino de baja temperatura [9].

El electrolizador en sí mismo funciona al disociar el vapor en iones hidrógeno y óxido usando electricidad en el cátodo. Los iones de óxido se transportan a través del electrolito conductor de iones al ánodo, donde se unen entre sí para formar moléculas de oxígeno [9]. En la Figura 5 se esquematizan los SOE.

Figura 5: Esquema de la celda de óxido sólido

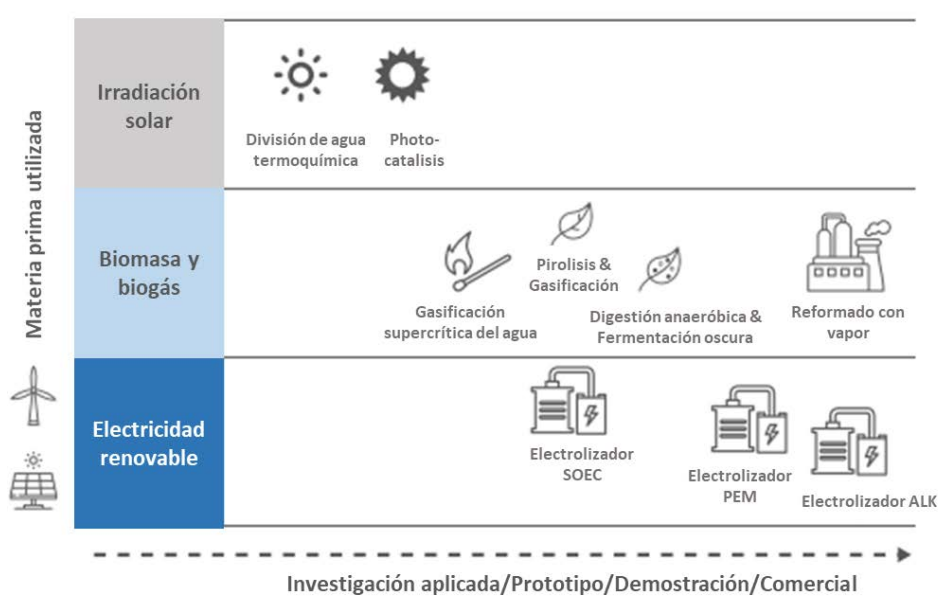


Fuente: *Hydrogen Production with Steam Electrolysis - EIFER*

La tecnología de SOE es menos madura que la de los ALK y PEM, es solo utilizada en laboratorio y en pequeñas escalas de demostración. Sus costos de inversión son altos todavía. Las altas temperaturas necesarias hacen que las fuentes renovables más adecuadas sean la energía solar concentrada y la geotérmica a alta temperatura.

Las tecnologías para producir hidrógeno por medio de biomasa, biocombustibles y energías renovables se han estado desarrollando desde hace años. En la Figura 6 se comparan algunas rutas de producción estableciendo su grado de maduración.

Figura 6: Rutas de producción de hidrógeno renovable y niveles actuales de madurez.

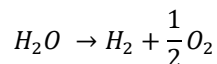


Fuente: *Hydrogen from renewable power 2018 - IRENA* [8]

2.3.4. Termólisis

Los procesos de termólisis implican la separación del hidrógeno de la molécula que lo alberga (hidrocarburo o agua) mediante la aplicación de calor. Se habla de procesos de termólisis cuando el calor procede de una fuente externa, como la energía solar concentrada o la energía nuclear de alta temperatura.

La termólisis del agua es una reacción de disociación que ocurre en un único paso, según la reacción (2):



Esta reacción presenta dos graves inconvenientes que dificultan su desarrollo. Por un lado, las elevadas temperaturas que se precisan para conseguir un grado de disociación razonable, superiores a 2500K, dan lugar a problemas de materiales y a un aumento de las pérdidas por re-radiación, disminuyendo la eficiencia de absorción. Por otro, la necesidad de una técnica efectiva de separación del hidrógeno y el oxígeno, para evitar una mezcla explosiva. Estos dos inconvenientes son la causa de que no exista de momento ninguna planta piloto en la que se realice la descomposición directa del agua [10].

2.3.5. Energías renovables

La electrólisis es el proceso más prometedor para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables. La producción a partir de la electrólisis puede ofrecer oportunidades de sinergia con la generación de energía variable, que es característica de algunas tecnologías de energía renovable.

El hidrógeno y la generación de energía eléctrica podrían integrarse en un parque eólico, permitiendo la flexibilidad para cambiar la producción para que coincida mejor con la disponibilidad de recursos con las necesidades operativas del sistema y los factores del mercado. Además, en tiempos de producción excesiva de electricidad de los parques eólicos, en lugar de reducir la electricidad como se hace comúnmente, es posible utilizar este exceso de electricidad para producir hidrógeno a través de la electrólisis.

De todas maneras es posible obtener hidrogeno por procesos distintos a la electrolisis, los cuales se mencionan a continuación dependiendo de la fuente de energía primaria.

2.3.5.1. Biomasa

La biomasa obtenida mayoritariamente en las industrias de primera y segunda transformación de productos agrícolas y forestales, de residuos de explotaciones ganaderas, de restos de aprovechamientos forestales, de residuos de provenientes de los cultivos y también de cultivos energéticos

Entre las posibles fuentes de hidrógeno, la producción con biomasa juega un papel importante, se pueden observar algunos caminos directos (gasificación y pirolisis) y secundarios como la utilización de biocombustibles, que se pueden tener a partir de la biomasa dependiendo del proceso utilizado. La ventaja de la gasificación es que es un proceso directo que no requiere de una preparación previa de la biomasa, pero su inconveniente es la baja cantidad de hidrógeno que se obtiene (hay que tener en cuenta que la biomasa contiene por término medio sólo un átomo de hidrógeno por cada nueve átomos de carbono aproximadamente). Por el contrario, la obtención de hidrógeno a partir de biocombustibles puede llegar a ser muy eficiente, pero en este caso hace falta un procesado previo de la biomasa para obtenerlos [11].

2.3.5.2. Solar - Solar fotovoltaica

La producción de hidrógeno por medio de tecnología solar puede producirse por medio de dos métodos.

1. La energía solar es convertida a electricidad en una celda fotovoltaica (PV) y el hidrógeno se genera por la electrólisis del agua.
2. Se utilizan celdas fotoelectroquímicas que producen directamente hidrógeno.

Aproximadamente el 85% de la tecnología comercial de celdas PV, están basados en silicón poli cristalino. Las otras celdas se basan en placas finas de cristales amorfos y compuestos del grupo II-IV y I-III-IV de la tabla periódica.

2.3.5.3. Geotérmica

La energía geotérmica es la única energía renovable que tiene una producción constante garantizada independientemente de las condiciones meteorológicas y que no requiere almacenamiento por separado, ya que el almacenamiento es la propia corteza terrestre. La Energía geotérmica de alta temperatura produce electricidad a partir del aprovechamiento de la energía del interior del planeta, para ello se realizan unos pozos de profundidad variable (2 a 3 km) y mediante fluidos termo portadores se extrae esa energía. El hidrógeno se genera usando electricidad de energía geotérmica estable por medio del proceso de electrolisis.

2.3.5.4. Eólica

La producción de hidrógeno desde fuentes renovables es uno de los objetivos primordiales para descarbonizar la matriz energética a largo plazo. El proceso consiste en generar electricidad por medio de una turbina de viento para llevar a cabo la electrólisis y extraer el hidrógeno del agua.

2.3.6. Energía nuclear

El hidrógeno puede obtenerse usando energía nuclear como fuente de energía primaria, por medio de fractura térmica de la molécula del agua, electrólisis o procesos termoquímicos, las tres alternativas son libres de emisiones de carbono.

El proceso de fractura de la molécula de agua tiene una eficiencia de entre 40 y 60%. Sin embargo, la temperatura necesaria para este proceso es de 850° C; estas temperaturas son alcanzadas únicamente por los reactores de alta temperatura. Los reactores de agua ligera (LWR, light water reactor) mediante electrólisis, podrían competir con el proceso de reformación catalítica de gas natural con calor nuclear; este sistema acoplado alcanza eficiencias de 30% [5].

Ciclo azufre-yodo

Es un ciclo termoquímico de hidrólisis del agua. Consiste en tres reacciones químicas, que juntas suman la disociación del agua. Requiere básicamente de dos niveles térmicos, uno a 850°C para la descomposición del ácido sulfúrico y otro a aproximadamente 360° C para la descomposición del HI (yoduro de hidrógeno).

Ciclo híbrido de Bowman-Westinghouse

Este ciclo emplea bromo en lugar de yodo y la electrólisis del ácido brómico en lugar de la descomposición térmica del HI.

Ciclo UT-3

Desarrollado en Tokio por Kameyama y Yoshida en 1978, involucra bromuros, y óxidos de hierro y calcio en cuatro etapas diferentes. El proceso UT-3 es uno de los ciclos termoquímicos de producción de hidrógeno más estudiados en el mundo. Este proceso fue desarrollado para

acoplarlo a los reactores nucleares. La eficiencia del ciclo se encuentra en el rango del 40 al 50%.

2.4. Almacenamiento

El hidrógeno almacena mucha energía por unidad de masa, pero muy poca por unidad de volumen. Por esta razón, el almacenamiento de hidrógeno se ha estudiado durante mucho tiempo, y paralelo al avance en la tecnología de nuevos materiales.

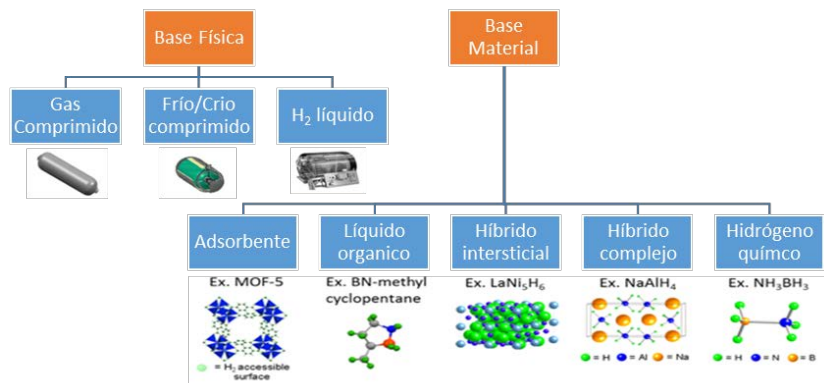
2.4.1. Almacenamiento de hidrógeno

Las posibles maneras de almacenar hidrógeno se mencionan en la Figura 7. e incluyen:

1. almacenamiento físico como gas comprimido o licuado,
2. almacenamiento material como hidruros químicos, y
3. almacenamiento en materiales en estado sólido como hidruros metálicos compuestos y nano estructuras de carbono.

El almacenamiento mediante materiales es aún objeto de investigación [12].

Figura 7: Formas de almacenamiento



Fuente: Hydrogen Europe

Los métodos físicos permiten almacenar las moléculas de hidrógeno en su forma libre, sin que se unan o sean absorbidas por otros materiales. Por lo tanto, se juega fundamentalmente con la presión y temperatura, para maximizar la capacidad volumétrica y gravimétrica del hidrógeno almacenado sobre todo para aplicaciones en el sector transporte. La capacidad gravimétrica es la relación entre la masa de hidrógeno almacenada y la masa total del dispositivo de almacenamiento con el hidrógeno incluido. Por su parte, la capacidad volumétrica es la masa de hidrógeno almacenada por unidad de volumen [12].

2.4.2. Almacenamiento subterráneo de hidrógeno

Otra forma de almacenamiento de hidrógeno a destacar es el uso de grandes cavidades subterráneas similares a las que actualmente se usan para almacenar gas natural.

Para el almacenamiento subterráneo es necesario una gran cueva o roca porosa con una capa de cierre impermeable. Una capa de roca saturada con agua es un buen ejemplo de capa de cierre. Otras posibilidades son pozos abandonados de gas natural, o cuevas realizadas por el hombre. Las formas más adecuadas de almacenamiento de hidrógeno son el uso de cavidades usadas con anterioridad por la minería, y acuíferos vacíos.

2.4.3. Hidrógeno para exceso de almacenamiento de electricidad

El hidrógeno también puede utilizarse para el almacenamiento de energía. El almacenamiento de electricidad a corto plazo en baterías para plantas pequeñas se está desarrollando dinámicamente. Sin embargo, el almacenamiento a largo plazo de grandes cantidades excedentes de electricidad requiere nuevos tipos de almacenamiento, como el almacenamiento de químicos en forma de hidrógeno. Por esta razón, puede desempeñar un papel importante en la mejora de la integración del sistema eléctrico en conjunto con las energías renovables.

El hidrógeno puede almacenarse en tanques a granel como gas presurizado y recuperarse cuando los suministros son bajos. También se puede convertir en otros portadores de energía.

2.5. Transporte

El hidrógeno gaseoso suele transportarse comprimido en depósitos con presiones entre 200 y 700 bar. Los depósitos convencionales de gas comprimido están a una presión entre 200 y 350 bar, y son de acero. Para presiones superiores, entre 400 y 700 bar, se están desarrollando nuevos materiales compuestos de fibra de carbono y polímeros o bien de aluminio reforzado con fibra de carbono. Estos depósitos se pueden transportar en camiones, ferrocarril o barco. Cuando la distancia al lugar de uso final es grande (mayor de 1000 Km.), el hidrógeno se suele licuar y se emplean camiones cisterna criogénicos para su transporte, debido a los costos. Así mismo, está establecida comercialmente la tecnología de transporte de hidrógeno por tubería, aunque no se hayan realizado redes de gasoductos para grandes distancias.

Prácticamente todas las compañías de gases industriales operan alguna red de transporte por gasoducto para atender las demandas de sus principales clientes. Los conductos existentes tienen un diámetro de 25-30 cm y operan a presiones de 10-20 bar (aunque también se usan presiones de 100 bar). Por ejemplo:

1. Air Liquide opera una línea red de transporte de 879 Km que recorre Bélgica, Holanda y Francia.
2. Air Products y Praxair operan líneas de transporte en Estados Unidos con longitudes totales de unos 175 y 275 km respectivamente.

En el proceso de licuefacción del hidrógeno se consume una gran cantidad de energía primaria que, dependiendo de la técnica seguida, puede situarse entre el 30 y el 40% del contenido

energético del hidrógeno líquido. A partir de un determinado volumen de producción puede ser conveniente licuar el hidrógeno.

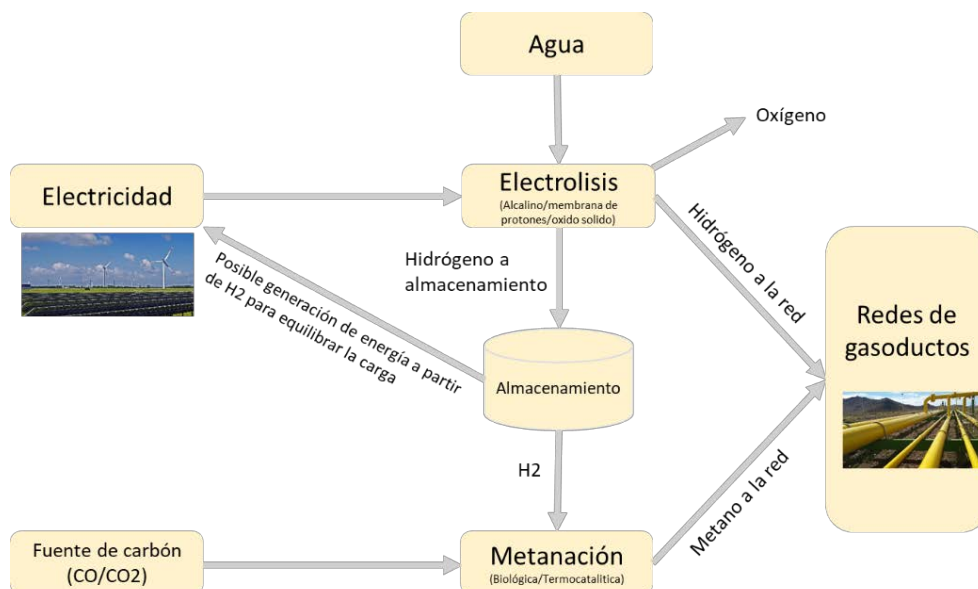
2.6. POWER-TO-GAS (P2G)

Power-to-X (también P2X) tiene dos significados. Primero, se refiere a una serie de vías de conversión de electricidad, almacenamiento de energía y reconversión que utilizan energía eléctrica excedente, por lo general durante los períodos en que la generación de energía renovable fluctúa sobre la carga. En segundo lugar, se refiere a tecnologías de conversión que permiten el desacoplamiento de la energía del sector eléctrico para su uso en otros sectores (como el transporte o los productos químicos), utilizando posiblemente energía que ha sido proporcionada por inversiones adicionales en generación [13].

El Power-to-Gas es un método que permite transportar el hidrógeno obtenido a partir de fuentes renovables a través de redes de gas natural. El punto de partida para el P2G es usar los sobrantes de la producción de energía eléctrica a partir de energía solar o eólica. Este exceso es resultado de la intermitencia de estos recursos renovables.

La inyección de hidrógeno a través de las redes de gas natural es una alternativa viable a la del almacenamiento. El hidrógeno inyectado queda mezclado con el gas natural en cierta proporción y puede ser utilizado para una gran variedad de aplicaciones de acuerdo con la Figura 8. También introduce un recurso de flexibilidad sistémica que, una vez implementado a gran escala, mejora significativamente las condiciones operativas de la generación de energía despachable necesaria al reducir la magnitud de las variaciones de carga [14].

Figura 8: Esquema de Power-to-Gas



Fuente: Elaboración propia en base a [14]

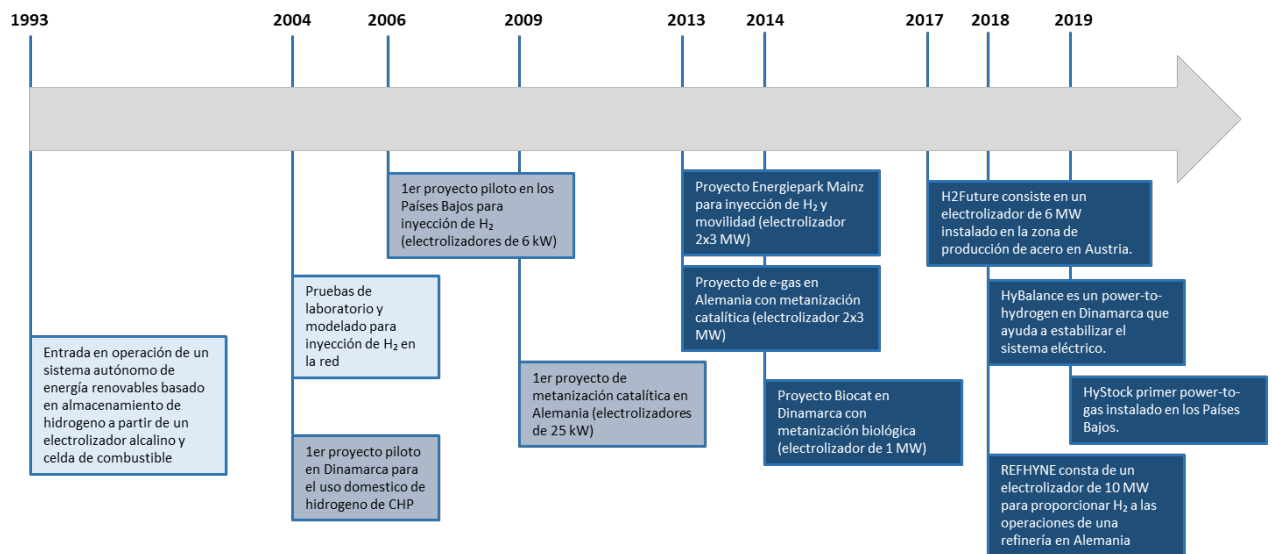
Existen dos formas de introducir el hidrógeno en la red de gas natural [15]:

1. Como aditivo
Consiste en añadir una pequeña parte de hidrógeno al flujo de gas natural existente en la línea. Esta cantidad no debe ser mayor al 2% de volumen. De esta manera, la mezcla de combustible (gas natural e hidrógeno) no representa ningún tipo de problema para la red de tuberías, ni para su utilización en los dispositivos existentes.
2. Como sustitución
Se trata de combinar el hidrógeno con CO₂. Con ello se consigue un gas sintético similar al gas natural. A este gas sintético (o metano sintético) también se le conoce por su denominación en inglés como “syngas” o gas de síntesis (CH₄+CO). Una vez obtenido el gas, puede ser inyectado directamente en la red de tuberías como sustitución al gas natural.

2.6.1. Antecedentes

Las primeras pruebas de Power-to-Gas a nivel mundial se lanzaron entre 2004 y 2009, y las pruebas operativas entre 2007 y 2012. La evolución de las diferentes pruebas se presenta a continuación en la Figura 9.

Figura 9: Evolución del Power-to-X

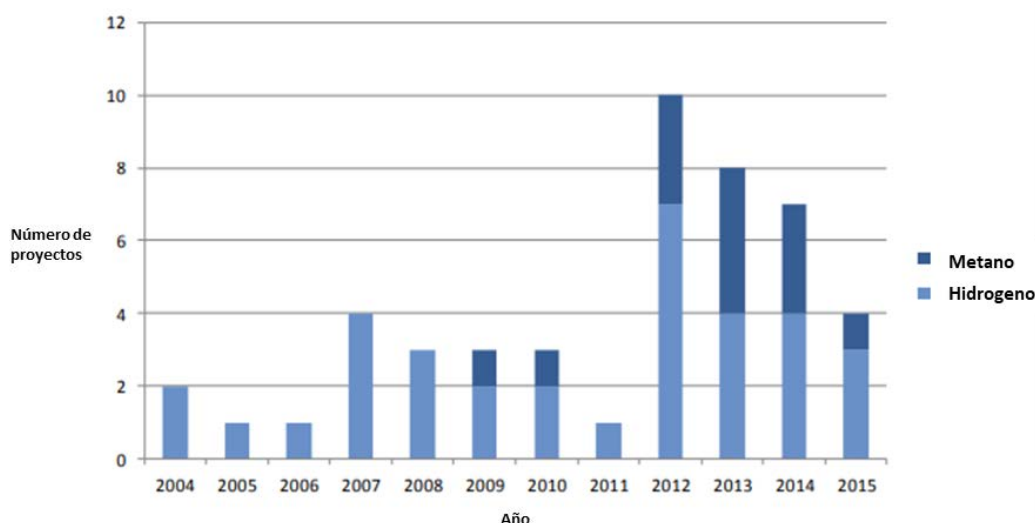


Fuente: Elaboración propia

El proyecto piloto en Lolland, en Dinamarca, fue una de las primeras pruebas de producción y uso de hidrógeno.

En 2005 y 2006, se lanzaron proyectos piloto de Power-to-Hydrogen para movilidad e inyección de red en el Reino Unido y los Países Bajos, respectivamente. El primer proyecto piloto de Power-to-Methane con metanización catalítica se lanzó más tarde en 2009 en Alemania. En la Figura 10 se puede ver la evolución de la cantidad de proyectos realizados entre 2005 y 2015.

Figura 10: Cantidad de proyectos a partir de metano e hidrógeno



Fuente: *The potential of Power-to-Gas*. ENEA [16]

La investigación y desarrollo de Power-to-Gas se ha concentrado principalmente en Europa. Alemania lidera la actividad europea de investigación y desarrollo (I+D) con 17 proyectos piloto y de demostración lanzados desde 2004. El interés de Alemania por el Power-to-Gas está directamente relacionado con su Energiewende (programa de energía) y los altos objetivos de producción de electricidad renovable. Entre estos proyectos, hay dos que son emblemáticos y se encuentran actualmente en funcionamiento en Alemania para la inyección de hidrógeno en la red (Energiepark Mainz) y la producción de Gas natural sintético (SNG por sus siglas en inglés) para movilidad [16].

En 2013 la multinacional alemana E.ON inauguró una instalación P2G, la cual inyecta hidrógeno en el sistema de gas natural a escala industrial. La planta fue construida en la ciudad de Falkenhagen, región en la que se cuenta con una gran capacidad de energía eólica instalada. La instalación utiliza energía eólica para producir H_2 mediante el proceso de electrólisis del H_2O . El H_2 producido es inyectado en la red de gas natural y queda mezclado. Este proyecto mostró que los excedentes de energía pueden ser almacenados en los gasoductos para ayudar a equilibrar el suministro y la demanda energética.

La empresa suiza HZI Etogas realiza plantas de Power-to-Gas "llave en mano". Como la generación de energía depende de las condiciones meteorológicas, con este tipo de plantas se obtiene electricidad en horas punta y se transforma en gas. La demanda eléctrica de una planta Power-to-Gas se puede ajustar sin limitaciones a la oferta energética.

La infraestructura de gas puede acomodar grandes volúmenes de electricidad convertida en gas en caso de que el suministro de energía renovable sea mayor que la capacidad de la red o la demanda de electricidad.

H2Future consiste en un electrolizador de 6 MW, instalado en el Voestalpine Linz, un sitio de producción de acero en Austria. La producción de hidrógeno se utiliza también para proporcionar un equilibrio en la red eléctrica [17].

HyBalance es un proyecto realizado en Dinamarca con apoyo de varias empresas, entre ellas Air Liquide, que muestra el uso de hidrógeno en los sistemas de energía. Mediante este proyecto,

la producción de hidrógeno consecuencia partir del exceso de energía eólica se usa para equilibrar el sistema eléctrico. El hidrógeno que es producido se utiliza en el transporte y en los sectores industriales en la ciudad de Hobro, Dinamarca [18].

REFHYNE es un proyecto que consta de un electrolizador de 10 MW establecido en una gran refinería de petróleo en Renania, Alemania, para proporcionar el hidrógeno requerido para las operaciones de la refinería y reemplazar los dos reformadores de metano existentes hasta el momento. Al mismo tiempo se espera que equilibre la red eléctrica interna de la refinería y proporcione una reserva de control primario a los operadores del sistema de transmisión alemán. El proyecto REFHYNE comenzó en enero de 2018 y tendrá una duración de 5 años hasta diciembre de 2022 [19].

HyStock es un proyecto desarrollado por EnergyStock, una filial del sistema de transmisión de gas holandés operador Gasunie, y es el primer power-to-gas instalado en los Países Bajos. La instalación comenzó a fines de 2018 y la construcción se terminó en mayo de 2019. El proyecto consta de un electrolizador con una membrana de intercambio de protones de 1 MW (PEM) junto con un campo solar de 1 MW que suministrará parte de la electricidad requerida para generar hidrógeno a partir del agua. El proyecto está ubicado cerca de una caverna de sal que puede ser utilizado como un tampón para almacenar el hidrógeno producido por el electrolizador después de su compresión. Se ha estudiado la posibilidad de insertar el hidrógeno en cilindros para ser transportado hasta los usuarios finales. Se está investigando cómo este electrolizador podría proporcionar beneficios al sector eléctrico al, por ejemplo, servicios auxiliares a la red. [20].

2.6.2. Beneficios del Power-to-Gas

1. Utilizar el exceso de energía de fuentes intermitentes

Cuando el suministro de energía excede la demanda, se necesita una utilización alternativa de la energía. Por eso la producción de hidrógeno a partir de las energías como la solar y eólica es ideal.

2. Almacenamiento de energía (tanto a corto plazo como estacional)

El Power-to-gas en combinación con turbinas de gas, celdas de combustible, etc. permite el almacenamiento de energía, ya sea por una instalación de almacenamiento dedicada o por la red de gas.

3. Transporte de energía a larga distancia cuando la red de transmisión de energía es inadecuada.

Para el transporte de energía a través de largas distancias, por ejemplo, en áreas remotas o de campo a través, la infraestructura de gas a veces puede ser mejor accesible que la infraestructura de electricidad.

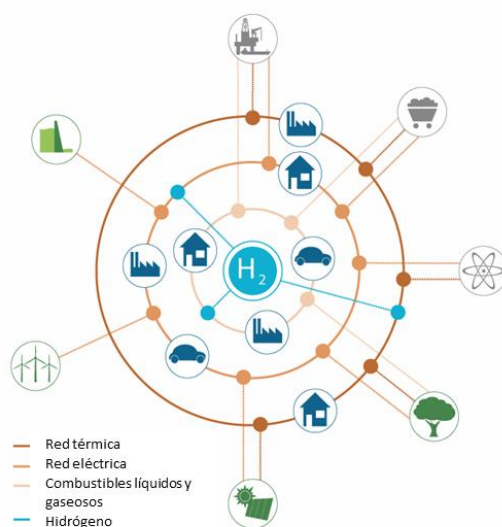
4. Producción de gas o productos químicos a partir de fuentes renovables como materia prima para la industria y la movilidad.

Mediante la producción de hidrógeno a partir de energías renovables se contribuye al objetivo de descarbonizar el sistema energético.

CAPÍTULO 3: APLICACIONES DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno puede vincular diferentes sectores de energía, así como las redes de transmisión y distribución, y aumentar la flexibilidad operativa de los futuros sistemas de energía bajos en carbono. Es un portador de energía flexible y ayuda a equilibrar la red, y como portador de energía puede permitir nuevos vínculos entre la oferta y la demanda, tanto de manera centralizada o descentralizada, potencialmente mejorando el uso del sistema energético [21]. Esto se esquematiza en la Figura 10.

Figura 11: Rol del hidrógeno en el sistema energético



Fuente: IEA – Hydrogen

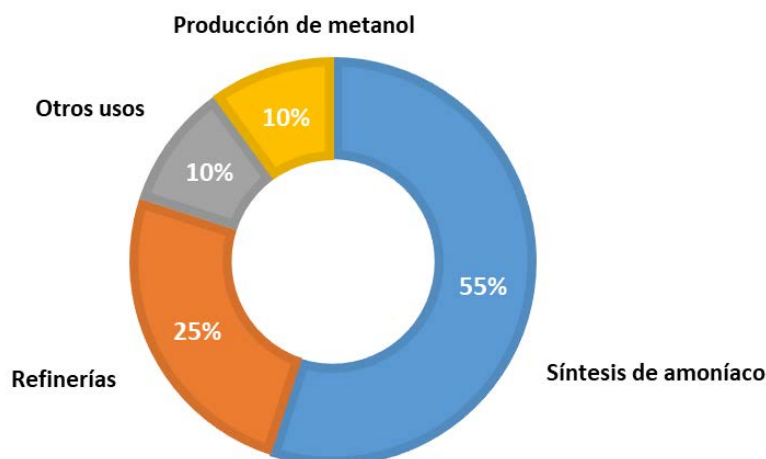
El hidrógeno se puede transformar eficazmente en cualquier forma de energía para diversos usos finales. Es apropiado particularmente para su uso en celdas de combustible que utilizan de manera eficiente el hidrógeno para generar electricidad.

El hidrógeno tiene actualmente muchos usos, tanto energéticos como no energéticos. La producción de fertilizantes a partir de amoníaco (producido con hidrógeno), en procesos de la refinación de petróleo (hydro-treating, hydro-cracking y desulfuración), en la hidrogenación de grasas y aceites, y en la producción de metanol, entre otros usos.

3.1. Aplicaciones convencionales

El hidrógeno se utiliza en numerosos procesos industriales. Entre los principales se incluyen ser materia prima en la industria química, en procesos en la industria metalúrgica, del vidrio y alimentaria. Es un elemento fundamental para la fabricación de amoníaco y por lo tanto fertilizantes y metanol, utilizados en la fabricación de muchos polímeros. Las refinerías, donde se utiliza el hidrógeno para el procesamiento de productos derivados del petróleo, son otra área de uso, de acuerdo con la Figura 12.

Figura 12: Aplicaciones del hidrógeno - 2018



Fuente: Elaboración propia a partir de Hydrogen Europe

3.1.1. Amoníaco – Fertilizantes

El compuesto de hidrógeno y nitrógeno más importante es el amoníaco (NH_3). Técnicamente, el amoníaco se obtiene a gran escala mediante el proceso de Haber-Bosch. Este proceso combina hidrógeno y nitrógeno por síntesis. Para este fin, primero se deben obtener los materiales de partida: nitrógeno e hidrógeno. En el caso del nitrógeno, esto se logra mediante la separación del aire a baja temperatura, mientras que el hidrógeno se origina hoy en día a partir del reformado con vapor de gas natural [22].

Una gran parte del amoníaco se convierte en sales fertilizantes sólidas o, después de la oxidación catalítica, en ácido nítrico (HNO_3) y sus sales (nitratos). Debido a su alta energía de evaporación, el amoníaco también se utiliza en las plantas de refrigeración como refrigerante respetuoso con el medio ambiente y de bajo costo.

3.1.2. Procesos industriales

Las aplicaciones industriales donde se utiliza hidrógeno incluyen la metalurgia (principalmente en aleaciones metálicas), la producción de vidrio plano (hidrógeno utilizado como gas de protección), la industria electrónica (utilizada como gas protector y transportador, en procesos de deposición, para limpieza, grabado, en procesos de reducción, etc.), y aplicaciones en la generación de electricidad, por ejemplo, para enfriamiento de generadores o para la prevención de la corrosión en tuberías de centrales eléctricas [22].

La reducción directa del mineral de hierro, es decir, la separación del oxígeno del mineral de hierro usando hidrógeno y gas de síntesis, podría convertirse en un proceso industrial importante en la fabricación de acero, porque en el método tradicional de alto horno se liberan grandes cantidades de carbono. La reducción directa con gas natural establecida en la producción de acero y los métodos de producción correspondientes basados en hidrógeno hasta el momento solo existen a escala piloto [23].

3.1.3. Producción de combustibles

El hidrógeno se utiliza para procesar petróleo crudo en combustibles refinados, como la nafta y el diésel, y también para eliminar contaminantes, como el azufre de estos combustibles. El uso de hidrógeno en las refinerías ha aumentado en los últimos años por diferentes razones:

1. las estrictas regulaciones que requieren bajo contenido de azufre en el diésel,
2. el aumento del consumo de petróleo crudo "pesado" de baja calidad, que requiere más hidrógeno para refinarlo y
3. el aumento del consumo de petróleo en economías en desarrollo como China y la India.

Aproximadamente el 75% del hidrógeno actualmente consumido en todo el mundo por las refinerías de petróleo es suministrado por grandes plantas de hidrógeno que lo generan a partir de gas natural u otros combustibles hidrocarbonados.

Como se mencionó anteriormente, el H_2 es una sustancia indispensable para la producción de metanol (CH_3OH). La producción de metanol (síntesis de metanol) se realiza mediante la hidrogenación catalítica del monóxido de carbono. El metanol se puede utilizar directamente como combustible en los motores de combustión interna. También se usa en celdas de combustible de metanol directo o, después de reformar, en celdas de combustible PEM.

3.2. Aplicaciones no convencionales

El hidrógeno se considera un buen candidato para contribuir a la descarbonización del sector del transporte por carretera si se produce mediante fuentes de energía renovables como por ejemplo a través del proceso de electrólisis. En este caso, las principales ventajas de los vehículos eléctricos con pila de combustible son la emisión cero de CO_2 y los contaminantes (la emisión en el tubo de escape es solo agua), y la mayor eficiencia de las celdas de combustible en comparación con los motores de combustión interna. Los vehículos de pasajeros y colectivos urbanos, entre otros vehículos, como equipo de manejo de materiales, etc., son algunos ejemplos [24].

Las opciones de aplicación para el hidrógeno como combustible para la movilidad se pueden diferenciar en primer lugar por la forma química o la unión del hidrógeno y, en segundo lugar, por el convertidor de energía mediante el cual se pone a disposición la energía almacenada en el hidrógeno.

El hidrógeno molecular puro (H_2) se puede usar directamente en medios de transporte, es decir, sin conversión adicional, como fuente de energía. En este caso, el hidrógeno se puede utilizar tanto en motores de combustión interna como en celdas de combustible.

En el uso indirecto, el hidrógeno se utiliza para producir fuentes de energía finales o se convierte por medio de pasos de conversión adicionales en combustibles gaseosos o líquidos que contienen hidrógeno. Dichos combustibles utilizados en el P2G (Power-to-Gas) y P2L (Power-to-Liquids) pueden usarse a su vez en motores térmicos.

3.3. Aplicaciones estacionarias

Estas aplicaciones se realizan en sistemas y plantas de producción de energía eléctrica. Se pueden emplear en una variedad de aplicaciones con un amplio intervalo de potencia.

Las pilas que operan a baja temperatura tienen la ventaja de un menor tiempo de puesta en marcha mientras que las que operan a alta temperatura tienen la ventaja de la posibilidad de cogeneración (obtención simultánea de energía eléctrica y térmica).

Las pilas de menor potencia (inferior a 1 kW) son útiles para suministrar potencia a equipos que trabajan en estacionario en lugares aislados, núcleos rurales o montañosos en los cuales no es rentable hacer llegar el tendido eléctrico. Las elevadas densidades de potencia de las pilas de combustible permiten tiempos de operación superiores a las baterías convencionales [3].

Para potencias medias (1 – 10 kW) se utilizan pilas en edificios y residencias, en núcleos urbanos y rurales. En la mayoría de los casos se utilizan con cogeneración para obtener agua caliente y/o calefacción [3].

Las plantas de producción de energía eléctrica de mayor potencia (10 kW – 100 MW) utilizan generalmente gas natural como combustible. Frente a las centrales convencionales, las basadas en pilas tienen la ventaja de que su eficiencia no depende del tamaño con lo cual se pueden construir plantas de producción más compactas y con menores costos de producción que las convencionales. Las plantas de potencias inferiores a 1 MW pueden utilizar cogeneración. Las instalaciones de mayor potencia se utilizan para generación distribuida y se ubican próximas a los usuarios finales [3].

3.4. Aplicaciones portátiles

Las células de combustible portátiles podrían proporcionar energía eléctrica para mucho más tiempo de funcionamiento que las baterías. Las aplicaciones portátiles son las células de combustible capaces de suministrar hasta 5 kW de potencia [3].

Las principales aplicaciones de las células de combustible de baja potencia son los teléfonos móviles, los asistentes digitales personalizados, las computadoras portátiles, las agendas electrónicas, las cámaras, los equipos médicos, entre otros. En comparación con las baterías, las células de combustible pueden proporcionar mucha más potencia por unidad de volumen o peso, aunque tienen voltajes más bajos y respuestas más lentas.

Además, tienen que operar con buenas eficiencias a temperatura y presión ambiente, por razones de seguridad y almacenamiento. Es por esto que todavía no se recomienda el uso del hidrógeno como combustible primario.

CAPÍTULO 4: APLICACIONES NO CONVENCIONALES DEL HIDRÓGENO : EL TRANSPORTE

Los vehículos que utilizan combustibles fósiles están entre los principales contaminadores del medio ambiente, por lo que es necesario encontrar soluciones y buscar combustibles alternativos para así poder cuidar el planeta. Por ello, el transporte es uno de los sectores prioritarios en los que hay que trabajar para poder reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

El desarrollo de combustibles distintos a los derivados del petróleo se viene estudiando desde 1970. La investigación y el desarrollo del hidrógeno para poder aplicarlo en el transporte sigue estando vigente y ha tomado mayor importancia en los últimos años.

Existen varias ventajas asociadas al uso del hidrógeno en el transporte [25]: Entre ellas se pueden mencionar las siguientes:

Mejoras ambientales: el uso del hidrógeno como combustible en el sector del transporte reducirá las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorará la calidad del aire local, por lo que ayudará a mitigar el cambio climático. Por otro lado, se cumplirá con los requisitos establecidos por los organismos internacionales.

Seguridad energética: dado que el hidrógeno está ampliamente disponible y puede producirse a partir de una variedad de recursos locales renovables y otros recursos energéticos, ofrece independencia de las importaciones de energía.

Desarrollo económico: la expansión de este nuevo sector proporciona la oportunidad de crear nuevos negocios y empleos locales, promover un mayor crecimiento y mantener el liderazgo tecnológico.

Equilibrio de la red: la generación de hidrógeno a partir de la electrólisis puede mejorar la eficiencia energética, así como ayudar a incorporar energía renovable en el mix energético al proporcionar servicios de equilibrio de la red, el proceso de usar el exceso de electricidad cuando el suministro de energía supera temporalmente la demanda.

Almacenamiento de energía: la generación de hidrógeno a partir de electricidad ayuda a incorporar energía renovable en el mix energético al proporcionar una opción de mayor capacidad de almacenamiento en comparación con las baterías.

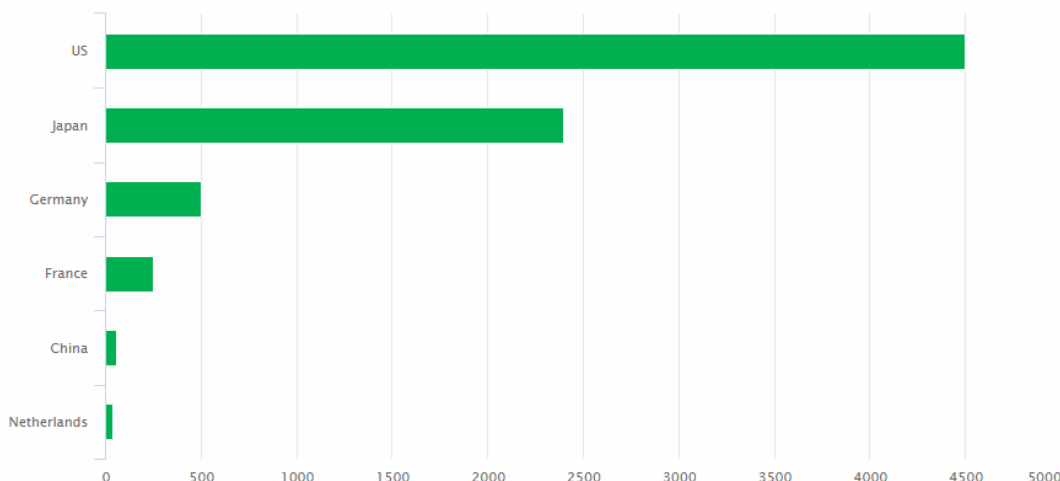
4.1. Antecedentes

Los primeros automóviles de pasajeros con celda de combustible se probaron en la década de 1960 como proyectos de demostración. Pero el desarrollo de celdas de combustible con un objetivo puntual se produjo en la década de 1990. En la mayoría de los casos, los vehículos de prueba con celda de combustible eran autos convertidos que originalmente habían sido equipados con un motor de combustión interna [25].

Desde mediados de la década del 2000 aparecen los FCEV (vehículo eléctrico de celda de combustible por sus siglas en inglés) como una tecnología que puede satisfacer la demanda de los consumidores de vehículos que generan contaminación cero, reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y no dependen de los combustibles fósiles.

A partir del programa *Hydrogen Mobility Europe* (H2ME) se ha buscado colocar una gran cantidad de vehículos con conductores que los usen para las actividades del día a día; y ayudar a desarrollar redes tempranas de estaciones de reabastecimiento de combustible para preparar el mercado para la introducción comercial de estos vehículos en los próximos años de acuerdo con la Figura 13.

Figura 13: Stock de vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV) en 2017



Fuente: IEA – Hydrogen - <https://www.iea.org/tcep/energyintegration/hydrogen/>

El stock de FCEV alcanzó las 8.000 unidades en abril de 2018. Estados Unidos representa la flota más grande con 4.500 FCEV, registrada principalmente en California, donde el Programa de Vehículos de Cero Emisiones ha impulsado las ventas. Japón tiene el segundo mayor stock de FCEV con 2.400 unidades, seguido de Alemania y Francia. Además, se han introducido 150 colectivos (FCEB) en China y 60 colectivos (FCEB) en Alemania [26].

En comparación con los BEV (Vehículos de batería eléctrica por sus siglas en ingles), la implementación de los FCEV es lenta, pero las políticas internacionales centradas en el hidrógeno que se han anunciado recientemente podrían ayudar a acelerar la implementación [25].

El BEV es un automóvil en el que las ruedas giran impulsadas por un motor eléctrico que obtiene la energía necesaria de un acumulador que la almacena, normalmente una batería aunque también podría ser un condensador, y que se puede recargar una y otra vez conectando el vehículo a una toma de corriente, convencional o específica, o bien mediante recarga inalámbrica.

El FCEV es un automóvil en el que las ruedas giran igualmente impulsadas por un motor eléctrico que obtiene la energía necesaria de un acumulador no muy grande que la almacena (normalmente también una batería), y de una pila de combustible alimentada por hidrógeno, que, al combinarlo con oxígeno tomado del aire, genera energía eléctrica a bordo del automóvil que se transfiere al motor o a la batería, según el caso.

En la Tabla 3 se presentan los principales objetivos de los países que vienen desarrollando los FCEV; estos objetivos implican tener los vehículos en funcionamiento para los diferentes años proyectados.

Tabla 3: Objetivos de los principales países con desarrollo de FCEV

	2020	2023	2025	2028	2030
<i>EUA</i>	13.000	40.000			
<i>Japón</i>	40.000		200.000		800.000
<i>Francia</i>		5.000		20.000-50.000	
<i>China</i>	5.000		50.000		1.000.000
<i>Holanda</i>	2.000				
<i>Corea del sur</i>	10.000		100.000		630.000

Fuente: IEA – Hydrogen - <https://www.iea.org/tcep/energyintegration/hydrogen/> [25]

4.2. Funcionamiento

Como se ha mencionado, los vehículos de celda de combustible son vehículos eléctricos que usan para su propulsión la energía eléctrica proveniente de una celda de combustible, generalmente acoplada junto a una pequeña batería eléctrica o supercondensadores.

En un vehículo de celda de combustible, la energía es almacenada en forma de hidrógeno comprimido a alta presión en un tanque a bordo del vehículo.

¿Que son las celdas de combustible? [21]

La celda de combustible de hidrógeno se usa para la producción de electricidad mediante el uso de químicos, hidrógeno y oxígeno, donde el hidrógeno actúa como elemento combustible, y el oxígeno es obtenido directamente del aire.

Lo que sucede en una celda de combustible se llama reacción electroquímica. Es una reacción química, porque involucra a dos sustancias que reaccionan entre sí, pero también es una reacción eléctrica porque la electricidad se produce a medida que la reacción sigue su curso.

Una celda de combustible tiene tres partes clave similares a las de una batería, de acuerdo a la Figura 14. Tiene un terminal con carga positiva, un terminal con carga negativa y un producto químico de separación llamado electrolito entre los dos que los mantiene separados.

En la Figura 14 se puede ver el funcionamiento de la celda de combustible descrito a continuación:

1. El gas de hidrógeno del tanque (círculos rojos) se alimenta por una tubería hasta el ánodo. Los tanques deben disponerse de manera segura.
2. El oxígeno del aire (círculos azules) baja por una segunda tubería hasta el cátodo.
3. El ánodo está hecho de platino, un catalizador de metal precioso diseñado para acelerar la reacción química que ocurre en la celda de combustible. Cuando los átomos de hidrógeno gaseoso alcanzan el catalizador, se dividen en iones de hidrógeno (protones) y electrones (círculos negros).

4. Los protones, que están cargados positivamente, son atraídos hacia el cátodo y viajan a través del electrolito hacia él. El electrolito es una membrana delgada hecha de una película especial de polímero (plástico) y solo los protones pueden pasar a través de él.
5. Los electrones, mientras tanto, fluyen a través del circuito exterior.
6. Al hacerlo, accionan el motor eléctrico (naranja y negro) que impulsa las ruedas del automóvil. Eventualmente, llegan al cátodo también.
7. En el cátodo, los protones y electrones se recombinan con el oxígeno del aire en una reacción química que produce agua.
8. El agua sale del tubo de escape como vapor de agua.

Las reacciones (2) (3) y (4) ocurren en la celda de combustible:

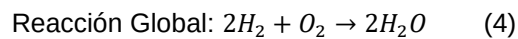
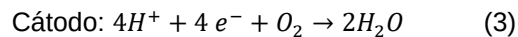
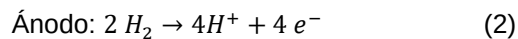
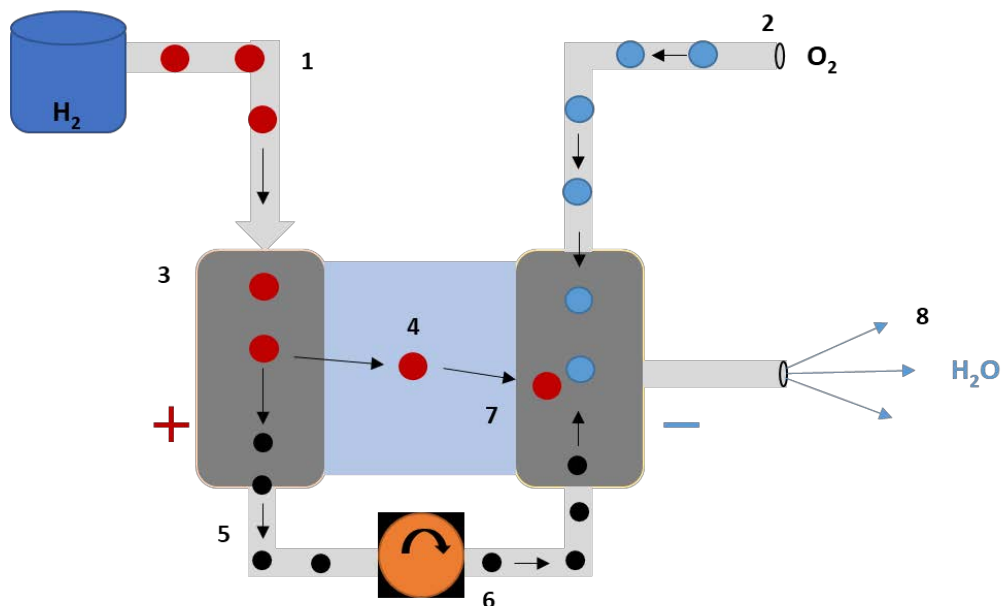


Figura 14: Funcionamiento de las celdas de combustible en un vehículo



Fuente: Elaboración propia a partir de Informes de IEA Hydrogen [25]

4.3. Vehículos de transporte liviano

Los FCEV usan electricidad para alimentar el motor eléctrico. A diferencia de otros vehículos eléctricos, producen electricidad utilizando una celda de combustible impulsada por hidrógeno, en lugar de extraer electricidad de una batería [21].

La conversión de hidrógeno en electricidad produce solo vapor de agua, y calor como subproducto, lo que significa que no genera contaminación en el caño de escape.

En comparación con los vehículos de combustión interna, reducen en gran medida las emisiones de carbono de los gases de efecto invernadero, incluso teniendo en cuenta el ciclo de vida completo del combustible. Cuando se utiliza hidrógeno generado por la electrólisis solar o eólica, las emisiones totales de CO₂ del ciclo de vida se eliminan por completo.

Al no tener partes móviles internas, las celdas de combustible también son silenciosas y altamente confiables.

Los tanques de hidrógeno son de fibra de carbono que han resistido las pruebas de choque, incendio y balística muy exigentes, y gracias a estos altos estándares de seguridad, los FCEV pueden cumplir con la estricta seguridad y calidad.

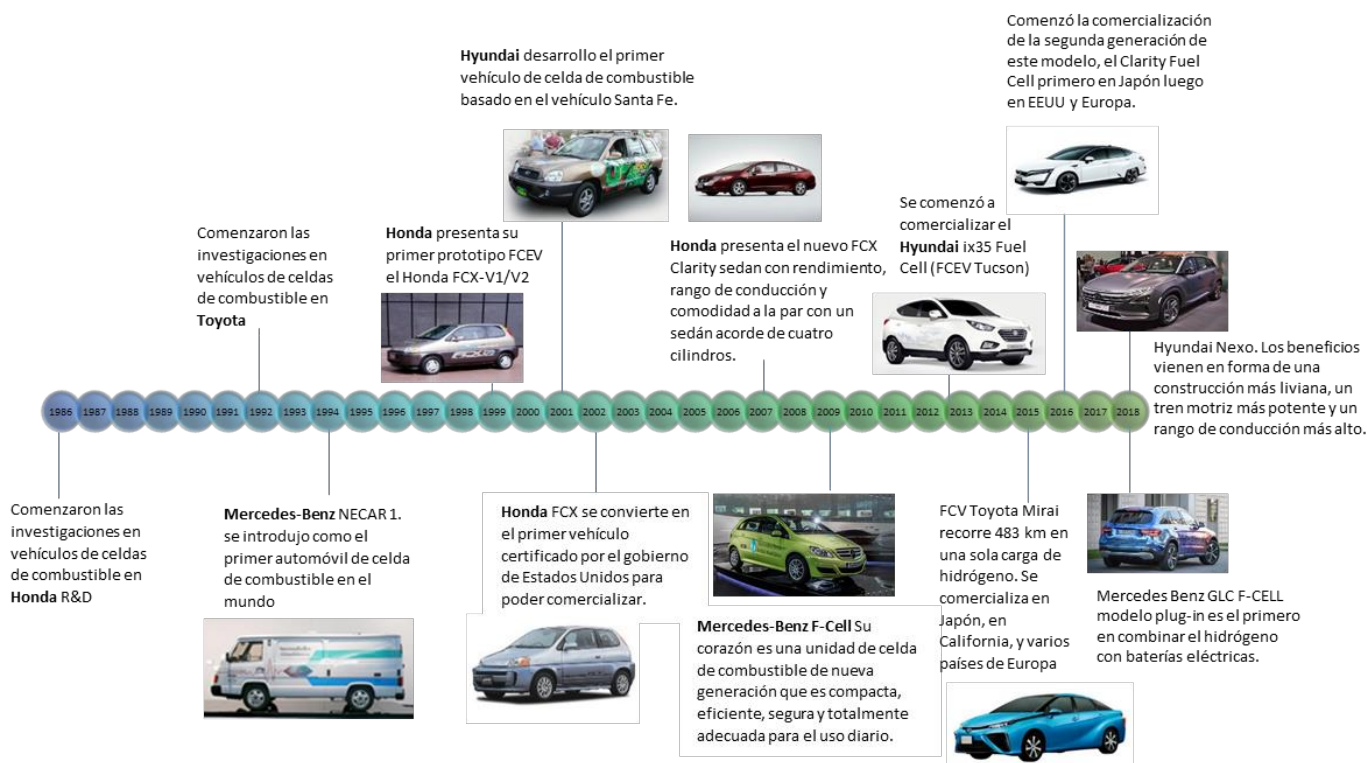
Ofrecen un rango de manejo de larga distancia comparable al de los automóviles y camionetas con nafta y diésel convencionales, y el tiempo de reabastecimiento de combustible es comparable al de los convencionales (3 a 5 minutos) [27].

4.3.1. Evolución de los autos por marca

Existen varias marcas que han apostado al desarrollo de hidrógeno como combustible automotor, pero no son tantos los que han apostado a la producción y comercialización todavía. La comercialización está sujeta a la existencia de una infraestructura que permita su viabilidad [27].

Las marcas que si lo han hecho son Honda, Toyota, Hyundai y Mercedes Benz Daimler. Honda fue la primera en el año 1986 en realizar investigaciones en vehículos de celdas de combustible (Honda R&D), seguido por Toyota en el año 1992. MENCIONAR LA FIGURA 14!!!.

Figura 15: Desarrollo de los automóviles FCEV



Fuente: Elaboración propia a partir de los sitios de Mercedes Benz, Honda, Toyota y Hyundai

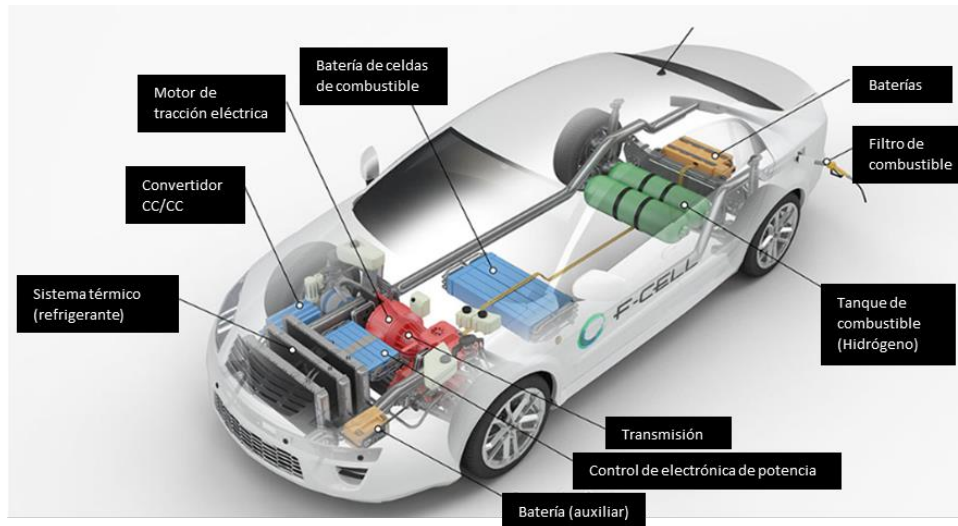
4.3.2. Diseño de los FCEV

Durante el proceso de diseño del vehículo, el fabricante define la potencia al determinar el tamaño de la celda de combustible y la cantidad de energía que se debe almacenar a bordo según el tamaño del tanque de combustible. Esto es diferente de un vehículo completamente eléctrico, donde la cantidad de energía y la energía disponible están estrechamente relacionadas con el tamaño de la batería [28].

La pila de combustible se alimenta con hidrógeno desde tanques de almacenamiento de alta presión a bordo. La presión de almacenamiento en el vehículo para los automóviles FCEV es típicamente de 700 bar, mientras que, para los FCEV con un tamaño de tanque más grande, como camionetas y colectivos, puede ser de 350 o 700 bar [29].

Un tren motriz de celda de combustible generalmente comprende los siguientes componentes de acuerdo con la Figura 16: batería de celdas de combustible, tanques de hidrógeno, batería y electrónica de potencia, y motor eléctrico.

Figura 16: Esquema FCEV



Fuente: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>

4.3.3. Actualidad

Solo unos pocos modelos están disponibles para la venta o el leasing², y la disponibilidad está limitada a áreas con estaciones de abastecimiento de hidrógeno, principalmente en California, USA. Se deben superar varios desafíos antes de que los FCEV sean una alternativa exitosa y competitiva para los consumidores.

En la Tabla 4 se muestra una comparación de los FCEV que están en la actualidad siendo comercializados en Estados Unidos.

² El leasing en Estados Unidos es el alquiler del auto con posibilidad de compra.

Tabla 4: Comparación de FCEV - 2018

	2018 Honda Clarity	2019 Hyundai Nexo	2019 Hyundai Nexo Blue	2019 Toyota Mirai								
												
	Economía de combustible											
Km/L ¹	29 comb	29 ciudad	28 ruta	24 comb	25 ciudad	23 ruta	26 comb	28 ciudad	25 ruta	29 comb	29 ciudad	29 ruta
	Otras estimaciones											
Rango (km)	589			570			612			502		
Costo de combustible anual ²	1250 USD			1500 USD			1400 USD			1250 USD		
	Características de vehículos											
Clase de vehículo	Auto mediano			Pequeño SUV			Pequeño SUV			Auto subcompacto		
Motor	C.A. Sincrónico de imanes permanentes (130 KW)			C.A. Inducción (95 KW)			C.A. Inducción (95 KW)			C.A. Inducción (113 KW)		
Batería	346 V Ion-Litio			240 V Ion-Litio			240 V Ion-Litio			245 V NiMH ³		
Disponibilidad	Distribuidores seleccionados en California			Disponible en Los Ángeles/Orange Country California en 2018 con posibilidad de expansión en 2019			Disponible en Los Ángeles/Orange Country California en 2018 con posibilidad de expansión en 2019			Distribuidores en California y Hawái		

Fuente: Compare fuel cell vehicles – U.S. Department of Energy

¹ MPGE: Miles per Gallon (millas por galón = 0,425 km/l) – parámetro que mide el rendimiento del vehículo

²El costo anual de combustible se calculó asumiendo un costo de hidrógeno de USD 5.55 / kg, 15,000 millas anuales de viaje, y 55% en ciudad y 45% en carretera.

³ NiMH: Batería de níquel-metal hidruro

4.3.4. Ventajas y desafíos de los FCEV

VENTAJAS

1. Disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero
Los contaminantes que producen smog y partículas dañinas que se encuentran en el aire son producidos por los vehículos que utilizan combustibles fósiles. En cambio, los vehículos de celdas de combustible (FCEV) alimentados por hidrógeno puro no emiten gases de efecto invernadero, solo calor y agua.
La producción de hidrógeno para FCEV puede generar GEI, según el método de producción. Aun así, genera muchos menos gases de efecto invernadero que los vehículos de nafta y diésel convencionales.
2. Reducción de la dependencia al petróleo
Los FCEV podrían reducir la dependencia del petróleo extranjero, ya que el hidrógeno se puede derivar de fuentes nacionales. Estas fuentes pueden ser renovables como el agua, el biogás y los residuos agrícolas. Eso haría que la economía sea menos dependiente de otros países y menos vulnerable a los choques del precio del petróleo de un mercado petrolero cada vez más volátil.
3. Disminución de contaminantes sonora
Los vehículos a hidrógeno no producen los niveles de ruido que producen los vehículos a combustión. La máquina interna es silenciosa.

DESAFIOS

1. Costo del vehículo
Los FCEV son actualmente más caros que los vehículos convencionales e híbridos. Sin embargo, los costos han disminuido significativamente en los últimos años. Los fabricantes de automóviles deben continuar reduciendo los costos, especialmente para la pila de celdas de combustible y el almacenamiento de hidrógeno, para que los FCEV compitan con los vehículos convencionales.
2. Llevarle hidrógeno a los consumidores
La infraestructura actual para producir y llevar hidrógeno a los consumidores todavía no es lo suficientemente grande para lanzar los FCEV en masa.
Es un desafío producir e instalar la infraestructura necesaria para soportar un alto crecimiento de FCEV.
3. Durabilidad de la celda de combustible
Los sistemas de celdas de combustible aún no son tan duraderos como los motores de combustión interna, especialmente en algunos rangos de temperatura y humedad. La durabilidad de la pila de celdas de combustible en la ruta es la actualidad aproximadamente la mitad de lo que se necesita para la comercialización. La durabilidad ha aumentado sustancialmente en los últimos años de 29,000 millas a 75,000 millas, pero los expertos creen que los FCV deben alcanzar una vida útil esperada de 150,000 millas para competir con los vehículos de nafta.
4. Educación publica

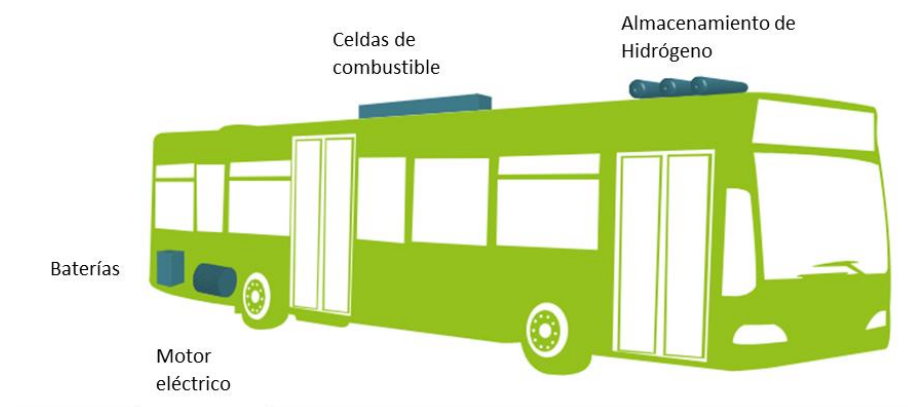
Al igual que con cualquier nueva tecnología de vehículos, los consumidores pueden tener inquietudes acerca de la confiabilidad y seguridad de estos vehículos cuando llegan al mercado por primera vez. Por esta razón los consumidores deben familiarizarse con los beneficios del hidrógeno como un nuevo tipo de combustible. La educación pública puede acelerar este proceso.

4.4. Colectivos

Los colectivos de celda de combustible (FCEB, por sus siglas en inglés) son un tipo de colectivo eléctrico. Sin embargo, en lugar de almacenar energía en baterías grandes, utilizan hidrógeno como combustible. Las celdas de combustible consumen hidrógeno y oxígeno para generar electricidad a través de un proceso electroquímico, produciendo solo agua y calor como subproductos, que luego alimentan los motores eléctricos.

El hidrógeno ofrece una densidad de energía mucho más alta que los sistemas de almacenamiento eléctrico (baterías y supercondensadores), lo que significa que los FCEB pueden operar cómodamente durante todo un día de servicio sin repostar. De acuerdo con la Figura 17 los colectivos eléctricos modernos con pila de combustible generalmente incorporan una pequeña batería o supercondensadores como parte del tren motriz, que mejora el rendimiento de la celda de combustible y la eficiencia energética general del colectivo; por ejemplo, aumentando la aceleración y permitiendo la recuperación de la energía de frenado [30].

Figura 17: Esquema FCEB



Fuente: FUEL CELL ELECTRIC BUSES: A PROVEN ZERO-EMISSION SOLUTION [30]

En Europa, se realizó el programa CHIC (Hidrógeno Limpio en Ciudades Europeas) financiado principalmente por la Empresa Común de Pilas de Combustible de Hidrógeno (FCH JU). El proyecto comenzó en 2010 y finalizó en diciembre de 2016 y demostró con éxito que los FCEB pueden ofrecer una solución funcional para que las ciudades descarbonicen sus flotas de transporte público, mejoren la calidad del aire y reduzcan sus niveles de ruido. Los colectivos pueden operar con la misma flexibilidad que un colectivo diésel sin comprometer la productividad del transporte público [31].

Se evaluaron 54 colectivos de celdas de combustible en diferentes ciudades de Europa. La diversidad de climas y tamaños de las ciudades permitió la prueba de los vehículos en diferentes condiciones.

Luego del éxito del programa CHIC, la Unión Europea comenzó a financiar nuevos proyectos. Los programas JIVE y JIVE2 buscan desplegar 148 y 152 nuevos colectivos de celdas de combustible de cero emisiones respectivamente y la infraestructura de reabastecimiento de combustible asociada en 14 ciudades europeas en Francia, Alemania, Islandia, Noruega, Suecia, los Países Bajos y el Reino Unido en los próximos seis años [32].

El equipo de validación de tecnología de NREL (National Renewable Energy Laboratory) realiza evaluaciones de los FCEB en comparación con los vehículos de referencia convencionales [33]. Los FCEB son una de las mejores aplicaciones de transporte para la tecnología de celdas de combustible. La Figura 18 corresponde a uno de los colectivos utilizados en los proyectos de NREL.

Figura 18: FCEB en Estados Unidos



Fuente: NREL [33]

4.5. Camiones pesados

El transporte de vehículos pesados es uno de los pilares para el funcionamiento de la economía y no se prevé que haya cambios significativos en los años próximos.

Se sabe que el impacto de los vehículos pesados en las emisiones de gases de efecto invernadero es muy alto. La mayoría de éstos funcionan con motores diésel que emiten altos niveles de partículas, óxidos de nitrógeno y otros contaminantes. En Estados Unidos los vehículos pesados representan solo el 2% de los vehículos en las rutas, pero son responsables del 23% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero en la carretera [34].

No todos los vehículos pesados pueden funcionar con baterías eléctricas. A medida que el rango y el ciclo de trabajo aumentan, también lo hacen los requisitos de la batería. Cuanto más grande es el vehículo y más pesado, también lo debe ser la batería para poder impulsarlo. Esto hace que se reduzca la capacidad general del transporte del vehículo [34]. En consecuencia, el reemplazo de camiones propulsados por hidrógeno sería de gran utilidad.

En un camión de celda de combustible, el motor diésel y el tren motriz convencional se reemplazan por un sistema híbrido de pila de combustible y baterías. Esta arquitectura híbrida maximiza los beneficios y el rendimiento de los camiones eléctricos en aplicaciones de servicio pesado.

Existen varias pruebas pilotos que están siendo testeadas:

1. El camión híbrido de batería de combustible Clase 8 de Kenworth completo las pruebas que comenzaron en 2017 y ya está funcionando en el estado de California. El camión cuenta con la tecnología del módulo FCveloCity® HD de Ballard y se utilizará para transportar cargas en los puertos del sur de California [35].
2. En mayo de 2017, UPS presentó su primer prototipo para un vehículo eléctrico de celda de combustible (FCEV) de rango extendido que será impulsado por el módulo Ballard FCveloCity®-MD30.
3. En 2018 Toyota presentó un nuevo prototipo de vehículo pesado de celdas de combustible llamado camión Beta. Basado en el Kenworth T680 (Figura 18). Es una tonelada más liviana, avanza 100 millas más (300 millas en total) con una carga de hidrógeno y es aproximadamente un 10% o más potente que el prototipo Alpha que Toyota presentó en el 2017.

Figura 19: Kenworth T680 – Ballard FCveloCity(R)-HD module



Fuente: Ballard

4. El camión Alpha ha estado en uso durante más de un año y ha acumulado más de 8.500 millas transportando partes importadas de Toyota desde barcos a diversos sitios de almacenamiento y preparación de vehículos en los puertos y en los distritos de almacenamiento de Estados Unidos: Los Ángeles, Orange, Riverside y San Bernardino.
5. Nikola Motor está desarrollando camiones de larga distancia clase 8³ (Figura 19) propulsado por celda de combustible que podrá reabastecerse de combustible en una red nacional de estaciones de hidrógeno construidas por Nikola.

³ Son camiones que pueden cargar 80.000 lbs (36.000 kg) o más.

Figura 20: Nikola Hydrogen Truck



Fuente: Nikola motors

6. General Motors, uno de los mayores productores de automóviles y camionetas del mundo, presentó recientemente un concepto de camión de pila de combustible de uso rudo.

4.6. Montacargas

En la actualidad, las carretillas elevadoras de combustión de hidrocarburos y de baterías son las que dominan el mercado, pero el hidrógeno tiene ventajas de mayor alcance, carga más rápida, menos tiempo de inactividad y voltajes más constantes, ocupando menos espacio y con menos problemas de reciclaje.

El Departamento de Energía y el Departamento de Defensa de Estados Unidos han estado promoviendo esta tecnología recientemente con cinco nuevos proyectos para implementar 300 montacargas en grandes compañías como FedEx, Genco y Sysco [36].

En Europa, Linde ha estado utilizando celdas de combustible de Hydrogenics para reemplazar las baterías, con 1,6 kg de hidrógeno almacenado en cilindros compuestos a 350 bar.

Figura 21: Depósito FedEx y mini planta de hidrógeno



Fuente: US Department of Energy

4.7. Trenes

En el mundo existen miles de locomotoras diésel. En la Unión Europea representan aproximadamente el 0,5% de todas las emisiones ferroviarias [37]. Algunos de los trenes de derivación del mundo tienen 40 años y deberán ser reemplazados en los próximos años.

Al igual que en los FCEV, las celdas de combustible de los trenes generan electricidad y se almacena en baterías o se alimenta directamente a los sistemas de propulsión de alto voltaje de una locomotora. Las mismas se pueden reabastecer con hidrógeno utilizando estaciones de recarga en el sitio, el único elemento de infraestructura adicional necesario. Los trenes propulsados por celdas de combustible entregan toda la propulsión necesaria sin generar emisiones de carbono ni ruidos molestos en el motor [38].

1. En Letonia, Ballard y los ferrocarriles letones completaron un estudio de ingeniería para analizar el ciclo de conducción típico de una locomotora de derivación en funcionamiento. El estudio mostró que una solución de propulsión híbrida de pila de combustible/batería es técnicamente viable para cumplir con todos los requisitos operativos, de espacio y peso. Se puede almacenar suficiente hidrógeno a bordo para proporcionar un día completo de operación, con una recarga al día.
2. En California, Ballard y BNSF probaron un módulo de energía de celda de combustible de 250kW en una locomotora de maniobra híbrida de hidrógeno. El estudio concluyó que una locomotora de derivación híbrida de celda de combustible es una solución viable para la operación en el área metropolitana de Los Ángeles. El contador de celdas de combustible combina las ventajas medioambientales de una locomotora eléctrica con los menores costos de infraestructura de una locomotora diésel-eléctrica. También emite muy poco ruido acústico.

Figura 22 : Locomotora de derivación de celda de combustible BNSF, impulsada por celdas de combustible Ballard



Fuente: Ballard

En la Figura 23 se ve uno de los dos trenes azul brillante Coradia iLint, construidos por el fabricante francés de TGV Alstom, que comenzó a recorrer una ruta de 100 kilómetros entre los pueblos y ciudades de Cuxhaven, Bremerhaven, Bremervoerde y Buxtehude, en el norte de Alemania.

Figura 23 : Tren Coradia iLint



Fuente: Ballard

La recarga de hidrógeno se realiza en depósitos móviles diseñados a tal efecto. Los tanques demoran apenas 15 minutos en cargarse. El hidrógeno llega en tanques desde Holanda, pero se calcula que en breve se instalará en la zona una planta definitiva para la recarga del combustible de las formaciones.

El tren Siemens Mireo de la Figura 24 consume hasta un 25% menos de energía en comparación con los trenes convencionales con capacidad de pasajeros similar. El mismo estará listo para entrar en servicio en 2021.

Figura 24: Tren de hidrógeno regional Siemens Mireo



Fuente: Siemens

4.8. Barcos y Ferries

En la actualidad, las emisiones de CO₂ de la industria marítima representan casi el 3% del GEI global, aproximadamente 300 millones de toneladas anuales [39].

Las baterías funcionan mejor para embarcaciones con rutas muy cortas y que tienen posibilidades de carga frecuentes, pero cuando se buscan rutas más largas y buques más grandes, las pilas de combustible se convierten en una mejor opción.

En diferentes organizaciones se han empezado a plantear objetivos a corto y mediano plazo. Algunos ejemplos se mencionan a continuación.

- Las regulaciones de la Organización Marítima Internacional reducirán las emisiones en un 50% para 2050, y las eliminarán por completo a finales de siglo.
- La Agencia Europea de Seguridad Marítima planea reducir las emisiones de CO₂ en un 50% para 2050.
- Noruega creará la primera zona del mundo con cero emisiones en el agua. Para el 2026, se prohibirán las emisiones en los fiordos, los cuales son patrimonio mundial.
- Desde 2005, el Puerto de Los Ángeles y el Puerto de Long Beach han tenido un Plan de Acción de Aire Limpio conjunto, con estrategias para reducir la contaminación de todas las fuentes. Los buques son su mayor fuente de emisiones.

Hydrogenesis es el primer barco propulsado con hidrógeno que opera en el Reino Unido. El barco fue construido en 2010 por el Ayuntamiento de Bristol como parte de sus iniciativas de Capital Verde para hacer de Bristol una ciudad baja en carbono. El ferry de pasajeros inició sus operaciones iniciales en febrero de 2013 y se lanzó oficialmente para su servicio en julio de 2013 [40].

Figura 25: Ferry de pasajeros Hydrogenesis



Fuente: Bristol Hydrogen Boats

4.9. Aviones

En el transporte aéreo, la tecnología de pilas de combustible PEM ofrece la posibilidad, de propulsar vehículos aéreos pequeños. Actualmente no se considera que las pilas de combustible sean capaces de generar la energía suficiente para propulsar aviones grandes de pasajeros. Sin embargo, se considera que esta tecnología puede ser aplicada en la implementación de APUs (Auxiliary Power Unit) en transporte terrestre, marítimo y aéreo; debido a su eficiencia, sus bajas emisiones (si se utiliza un combustible adecuado), su fiabilidad y su duración.

Su aplicación en el campo de la aviación tiene gran interés, sobre todo en el terreno militar, porque son muy silenciosas (al no tener partes móviles no hacen ruido, y los componentes no sufren tanto desgaste), producen una baja señal térmica y la gran potencia que son capaces de

desarrollar en un corto intervalo de tiempo les confiere la habilidad de poder ganar gran altura rápidamente [41].

Primeros avances en la industria de la aviación:

1. El primer avión experimental en el mundo que operó con hidrógeno líquido, fue realizado por Tupolev. Construyó un prototipo de versión impulsada por hidrógeno del avión Tu-154, llamado Tu-155, que realizó su primer vuelo en 1989.
2. Boeing Research & Technology Europe (BR&TE) fabricó un avión civil con una celda de combustible a partir de un DA20 de Diamond Aircraft Industries de dos asientos (llamado Theator Airplane).
3. En 2010, Rapid 200-FC, el primer avión en Europa y en el mundo alimentado por hidrógeno gaseoso, concluyó con éxito seis pruebas de vuelo. De acuerdo con el Código Deportivo de FAI, el avión se considera de Clase C, mientras que los planeadores (como los proyectos Boeing R&T Diamond DA20 y Antares DLR-H2) se consideran Clase D.
4. En 2011, un AeroVironment Global Observer fue equipado con un sistema de propulsión alimentado con hidrógeno.
5. HY4 se convirtió en el primer avión de pasajeros del mundo con un motor impulsado por una celda de combustible de hidrógeno. Su primer vuelo tuvo lugar en el aeropuerto de Stuttgart, Alemania, el 29 de septiembre de 2016.

Figura 26: HY4 avión de pasajeros de cero emisiones



Fuente: HY4 - <http://hy4.org/>

4.10. Estaciones de carga

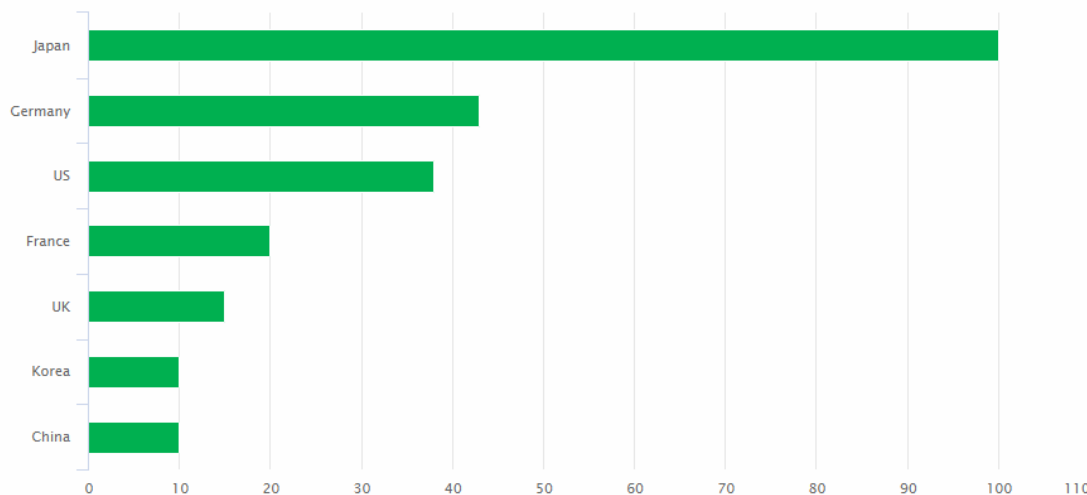
La creación de una red de estaciones de servicio es esencial para el desarrollo del mercado de los FCEV. El hidrógeno se puede producir fuera del sitio o en el sitio y proporcionar servicios de balanceo de la red.

En la producción fuera de sitio, el hidrógeno se entrega a las estaciones por medio de buques cisterna o tuberías, de la misma manera que el combustible se entrega a las estaciones de servicio. Tiene la ventaja de permitir la producción a gran escala y a bajos costos. Actualmente, la mayor parte del hidrógeno proviene del gas natural, pero a mediano plazo se planean fuentes de bajo contenido de carbono para la producción [21].

La producción in situ genera hidrógeno por electrólisis, en el mejor de los casos con la ayuda de electricidad renovable. Estas estaciones tienen el potencial de ofrecer combustible limpio de

energía renovable, así como eliminar la necesidad de entregas de combustible. En la Figura 27 se puede ver la cantidad de estaciones en el año 2017 [21].

Figura 27: Estaciones de hidrógeno por país en 2017



Fuente: IEA – Hydrogen - 2018

La "Estrategia Básica de hidrógeno" lanzada por Japón en diciembre de 2017 esboza la primera política centrada en el hidrógeno con objetivos ambiciosos para FCEV, estaciones de abastecimiento de hidrógeno y sistemas de micro CHP (Combined Heat and Power - combinación de calor y energía) a pequeña escala [42].

Tabla 5: Objetivos de los principales países con desarrollo de FCEV para la instalación de Estaciones de carga

	2020	2023	2025	2028	2030
<i>EUA</i>	80	100			
<i>Japón</i>	160		320		
<i>Francia</i>		100		400-1.000	
<i>China</i>	100		300		500
<i>Holanda</i>	100		400		1.000
<i>Corea</i>	100		210		520

Fuente: IEA – Hydrogen - 2018

La inversión en electrólisis del agua para producir hidrógeno para aplicaciones de energía limpia está en aumento. Si todos los proyectos actuales están en línea para 2020, la capacidad acumulada aumentará de 55MW en 2017 a más de 150MW. La refinería Shell Rheinland en Alemania planea introducir hidrógeno renovable en 2020, que comprende un electrolizador de 10MW, para sustituir el suministro de hidrógeno a base de combustibles fósiles y reducir las emisiones de la planta [21].

En aplicaciones estacionarias, se instalaron más de 235 MW de generadores de energía de respaldo de celdas de combustible en los Estados Unidos y en Japón. Se implementaron 42.000 sistemas de micro CHP a pequeña escala en 2017, lo que lleva las instalaciones acumuladas a casi 236.000 unidades. La transferencia de hidrógeno a largas distancias representa un desafío significativo y requerirá licuefacción (hidrógeno líquido) o conversión en compuestos ricos en hidrógeno como el amoníaco. Actualmente se planean dos proyectos de demostración para exportar hidrógeno por barco desde Brunéi y Australia en 2020 [21].

4.11. ¿Autos eléctricos o a hidrógeno?

Un vehículo eléctrico a batería (BEV, por sus siglas en inglés) es un vehículo que funciona completamente con una batería y un tren de propulsión eléctrico, y se recarga conectándolo a una fuente de electricidad externa. Al igual que todos los vehículos eléctricos, los BEV también pueden recargar sus baterías mediante un frenado regenerativo: el motor eléctrico del vehículo en realidad ayuda a reducir la velocidad del vehículo y recupera parte de la energía que normalmente se convierte en calor con los frenos.

Por el contrario, la electricidad para el tren motriz del vehículo eléctrico de celda de combustible de hidrógeno (FCEV) se genera a partir de hidrógeno y oxígeno en las celdas de combustible alojadas dentro del propio vehículo. Como resultado, no recarga un FCEV, sino que lo rellena bombeando hidrógeno comprimido en sus tanques de hidrógeno.

En la Tabla 6 se pueden ver de los parámetros más importantes para comparar las diferentes clases de autos.

Tabla 6: Comparación entre auto CI, BEV, FCEV

	Auto combustión interna (CI)	BEV – Auto eléctrico	FCEV – Auto a hidrógeno
Tipo de “combustible”	Nafta	Electricidad	Hidrógeno
Costo de combustible anual	1.150 USD	550 USD	0 -1.400 USD
Tiempo de repostaje (para llenar el tanque/ con enchufe)	3 a 5 minutos	20-30 minutos (Carga rápida) 4-12 hs (Carga completa)	3 a 5 minutos
Rango de uso por repostaje	300-400 millas 483-644 km	100-150 millas 161-241 km	300-350 millas 483-563 km
Infraestructura de repostaje	Todas las estaciones de servicio que aún no han sido remodeladas.	Ya existen bastantes puntos de recarga públicos, en los estacionamientos públicos y privados.	Estaciones de reabastecimiento de hidrógeno (HRS) disponibles para los conductores en estacionamientos privados.
Precio de compra	Varios precios	+30.700 USD	+57.500 USD

Fuente: Community Environmental Council - <https://www.cecsb.org/fcev/>

Un FCEV puede tener un rango de autonomía de hasta tres veces más alto que el de un BEV con tiempos de reabastecimiento de combustible mucho más rápidos que los tiempos de carga (BEV). Por lo tanto, dependiendo de las necesidades y circunstancias específicas de la persona o empresa en cuestión, hay ocasiones en las que un vehículo de hidrógeno podría ser más interesante que un BEV.

No existen barreras técnicas para la inserción de los FCEV. En la Tabla 7 se puede ver una comparación de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) entre autos a nafta, autos de celdas de combustible con hidrógeno producido a partir de gas natural, a partir de energías renovables (EERR) en un 33% y en un 46%.

Tabla 7: Comparación emisiones de GEI

	Auto a nafta	FCEV (H ₂ a partir de gas natural)	FCEV (H ₂ a partir de 33% de EERR)	FCEV (H ₂ a partir de 46% de EERR)
Emisión de GEI por milla	436	286	202	173
Reducción de emisiones relativa a la nafta		34%	54%	60%

Fuente: Hyundai

Es una realidad el hidrógeno limpio todavía cuesta demasiado para poder hacer un amplio despliegue y es posible que los precios no bajen hasta dentro de 10 años más.

Como se mostró anteriormente, hoy en día el hidrógeno se produce principalmente a partir de gas natural, lo que genera importantes emisiones de carbono. Según el IEA (International Energy Agency), ese tipo se conoce como hidrógeno "gris". Una versión más limpia es hidrógeno "celeste", para el cual las emisiones de carbono que resultan de la producción del hidrógeno se capturan y almacenan, o se reutilizan. Y el más limpio de todos es el hidrógeno "verde", que se genera a partir de fuentes de energía renovables sin generar emisiones de carbono [21].

Por el momento, el hidrógeno "gris" es más barato que los otros dos y se asume que el precio se mantendrá en este nivel relativamente bajo en el futuro previsible, según los especialistas en gas natural. El precio del hidrógeno "celeste" también está influenciado principalmente por los precios del gas natural. Pero su segundo controlador más importante es el costo de capturar y reutilizar o almacenar las emisiones de carbono.

El precio del hidrógeno "verde" depende de varios factores [21]:

- 1) El costo de la electrólisis. La capacidad total de electrólisis global es limitada y costosa en este momento. La mayoría de los expertos de la industria esperan que un aumento significativo de la capacidad de electrólisis reduzca los costos en aproximadamente un 70% en los próximos 10 años.
- 2) El precio de la electricidad verde utilizada en el proceso de electrólisis, que probablemente es el factor más crítico para el costo del hidrógeno verde.

De los factores mencionados durante la comparación dependen la inserción de los autos a hidrógeno en el mercado. Por un lado, el impacto que tendrá la utilización de los mismos en las emisiones de GEI, que puede ser uno de los ejes principales que empujen a la transición.

Sin embargo, el desarrollo de la infraestructura de repostaje seguramente promueva el aumento de producción de este tipo de vehículos, los que presentan claramente ventajas sobre los vehículos eléctricos.

PARTE II: REGULACIÓN Y LEGISLACIÓN DEL HIDRÓGENO

CAPÍTULO 5: REGULACIÓN DEL HIDRÓGENO EN EL MUNDO Y ACCIONES CONCRETAS

La existencia de iniciativas a nivel internacional para desarrollar las tecnologías del hidrógeno y fomentar su uso, necesitan ir acompañadas por programas específicos legislación y/o regulación. Japón, Alemania y Estados Unidos (en especial el estado de California) llevan un liderazgo entre los países que han desarrollado este tipo de iniciativas para fomentar la utilización del hidrógeno.

5.1. Iniciativas internacionales conjuntas

Durante los últimos años se han abordado varias iniciativas para el desarrollo del hidrógeno alrededor del mundo. A continuación, se mencionan algunas de ellas:

En 2018 varios países de Europa firmaron la *Iniciativa del Hidrógeno* (“Hydrogen Initiative”) en la “High-Level Energy Conference” en Austria. El objetivo de esta iniciativa es maximizar el gran potencial de esta tecnología para la descarbonización de múltiples sectores. Así también como es de gran importancia cumplir los objetivos establecidos por el Acuerdo de París a partir del gran potencial del hidrógeno renovable como una solución de almacenamiento de energía, así como un vector energético sostenible y cero emisiones [43].

El Consejo del Hidrógeno (“Hydrogen Council”) es una alianza global de empresas líderes en los campos de la energía, el transporte y la industria, con una visión única para promover la transición energética, incentivando el hidrógeno como vector energético con la finalidad de ayudar a cumplir con los objetivos del cambio climático. El objetivo principal es el aceleramiento de las inversiones en el desarrollo y comercialización de los sectores de hidrógeno y pilas de combustible y la comercialización a gran escala de soluciones de hidrógeno en las industrias de todo el mundo [44]. En la Figura 28 se pueden ver las empresas que pertenecen al Consejo del Hidrógeno.

Figura 28: Empresas pertenecientes al consejo del hidrógeno



Fuente: Hydrogen Council - <http://hydrogencouncil.com/>

Otra de las funciones del Consejo es asesorar y ofrecer recomendaciones a diferentes interlocutores tales como políticos, empresarios o agencias internacionales.

5.2. Países con desarrollo de hidrógeno

Existen países que llevan varios años trabajando con el hidrógeno en materia energética y que han desarrollado planes de acción para fomentar su investigación en distintas aplicaciones.

5.2.1. Japón

Japón es el principal referente a la hora de hablar de incentivos y programas en materia del desarrollo del hidrógeno como fuente de energía. Esto en gran parte es debido a que apenas dispone de recursos energéticos locales. [45]

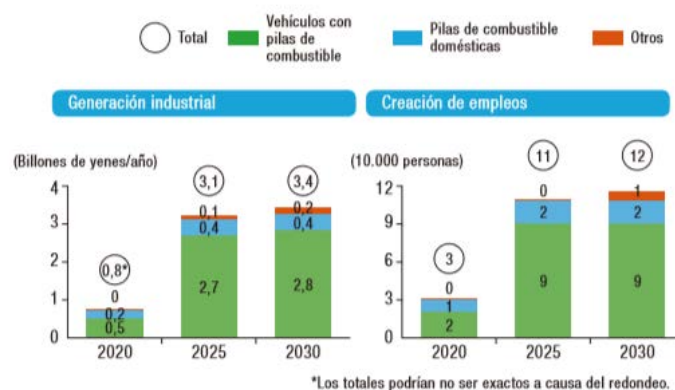
El país nipón cuenta con el apoyo del Gobierno mediante subvenciones y nuevas regulaciones para su desarrollo, a través de METI (Ministerio de Economía, Comercio e Industria) y de NEDO (Nueva Organización de Desarrollo de Energía y Tecnología Industrial).

En abril de 2014, Japón lanzó el cuarto Plan Estratégico de Energía en el que se destacó la importancia de que el desarrollo energético del país se debía producir siguiendo tres ejes. El “trilema energético” (“Energy trilemma”) compuesto de tres E: Seguridad energética (Energy Security), Eficiencia Económica (Economic Efficiency) y la sustentabilidad del medio ambiente (Environment). Se estableció que la solución a este trilema son las tecnologías bajas en carbonos [46].

Por otro lado, el Gobierno Metropolitano de Tokio ha diseñado un plan para establecer una “Sociedad de Hidrógeno”. Esta sociedad que se propone busca conseguir 4 grandes objetivos [47]:

- 1- Reducción del daño medioambiental
El H₂ solo produce agua, sería una gran ayuda para la reducción de CO₂.
- 2- Diversificación de las fuentes energéticas
El H₂ puede producirse mediante fuentes de energías renovables lo que incentivará que se promueva el uso de las mismas para empezar a sustituir el uso de combustibles fósiles, utilizado en gran porcentaje en la actualidad para la producción del hidrógeno.
- 3- Generar una cadena de efectos económicos
Las industrias relacionadas con el hidrógeno son fuentes de potencial tecnológico que pueden generar potenciales puestos de trabajo. En la Figura 29 se muestra la creación de empleos en la industria automovilística proyectada al 2030.

Figura 29: Creación de empleos a través del desarrollo de la industria del hidrógeno



Fuente: Materiales entregados por Toyota Motor en la 30ava. Reunión del Subcomité de Problemas Fundamentales del Comité Asesor de Recursos Naturales y Energía, Agencia de Recursos Naturales y Energía, Asociación de Fabricantes de Automóviles de Japón - Estado actual de la industria automovilística, marzo 2013. [45]

4- Contribuir ante las contingencias que pudieran ocurrir

El hidrógeno podría utilizarse para generar energía en caso de emergencia, cuando el suministro ordinario queda interrumpido por un desastre. En la Figura 30 se puede ver una comparación del consumo energético que se requeriría en un día para afrontar un evento de emergencia.

Figura 30: Numero de colectivos o coches con pilas de combustible requeridos para suministrar la energía de emergencia para un día

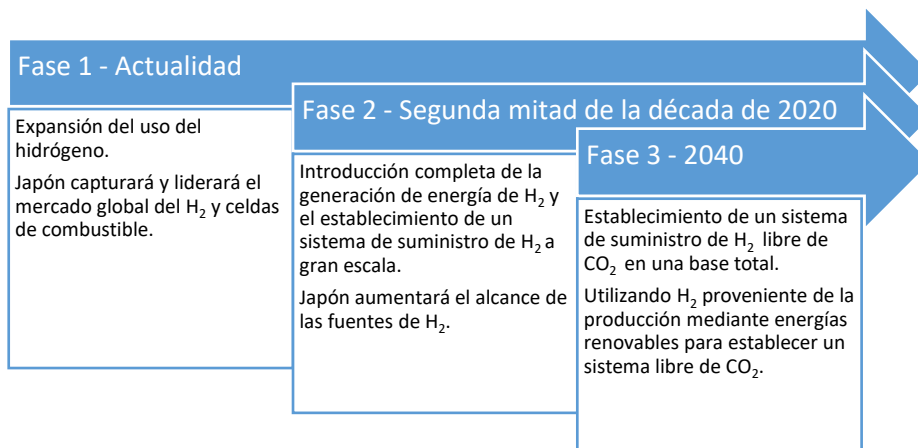
	Hospital	Tienda de 24 horas	Refugio (escuela)
Consumo energético habitual	9.628 kWh/día	500 kWh/día	—
Consumo energético de emergencia	963 kWh/día (Capacidad 10%; solo equipos de emergencia)	235 kWh/día (Capacidad 47%; solo refrigeración)	100 kWh/día (Iluminación y agua caliente para 200 personas)
Autobuses con pilas de combustible (455 kWh/día)	2 	0,5 	0,22 
Coches con pilas de combustible (120 kWh/día)	8 	2 	0,83 

Fuente: Agencia de Recursos Naturales y Energía – Acerca de los vehículos de pilas de combustible, marzo 2014 [45]

Actualmente Japón tiene una dependencia energética muy alta, lo que hace que su seguridad energética se vea amenazada todo el tiempo. La búsqueda de diferentes alternativas para lograr cubrir la demanda del país y reducir las emisiones de CO₂ se ha vuelto una de las principales metas del Gobierno Japonés.

En diciembre de 2017 el Consejo Ministerial de Energías Renovables, Hidrógeno y Asuntos Relacionados estableció la Nueva Estrategia Básica para el Hidrógeno. La misma ha planteado una hoja de ruta para la introducción y difusión de las tecnologías basadas en H₂ y como una opción de energía libre de carbono. En la Figura 31 se establece la hoja de ruta para el desarrollo de una sociedad basada en el hidrógeno.

Figura 31 : Hoja de ruta para lograr una sociedad basada en el hidrógeno



Fuente: Elaboración propia en base a Estrategia Básica para el Hidrógeno, Consejo Ministerial de Energías Renovables, Hidrógeno y Asuntos Relacionados – diciembre 2017 [46]

La estrategia planteada para lograr una sociedad basada en el hidrógeno se compone de las siguientes actividades: [48]

- *Aprovechar el uso de hidrógeno a bajo costo: utilizar energía no utilizada en el extranjero y energía renovable*
- *Desarrollar de cadenas internacionales de suministro de hidrógeno.*
- *Expandir las energías renovables en Japón y revitalizar la región.*
- *Usar el hidrógeno para la generación de energía.*
- *Usar el hidrógeno en la movilidad.*
- *Usar el potencial del hidrógeno en procesos industriales y utilización del calor.*
- *Utilizar las tecnologías de celdas de combustible.*
- *Desarrollar tecnologías innovadoras.*
- *Expandirse internacionalmente (estandarización, etc.)*
- *Promover el entendimiento nacional y la cooperación regional.*

En 2018 se creó una nueva compañía de iniciativa privada "Japan Hydrogen Station Network Joint Company" para promover los vehículos de hidrógeno y sus correspondientes estaciones.

La última iniciativa importante que presentó Japón es que durante los Juegos Olímpicos 2020 (postergados para el 2021 debido al COVID-19) que se desarrollarán allí, se creará una "sociedad del hidrógeno". Toda la villa donde se alojarán los atletas dispondrá de vehículos y climatización en base a este elemento. Se construirán tuberías similares a las de gas convencional para transportar esta sustancia hacia los alojamientos, instalaciones deportivas, restaurantes y resto de lugares que requieran energía, donde ésta se producirá localmente mediante pilas de hidrógeno para cogeneración de electricidad y agua caliente. También hacia las estaciones de carga para los colectivos y coches a pila de hidrógeno que transportarán a los deportistas, etc.

5.2.2. Alemania

Alemania se encuentra desarrollando el hidrógeno y las celdas de combustible hace años y su política energética siempre estuvo estructurada con objetivos claros. El desarrollo de las fuentes de energías renovables es muy importante debido a que debe asegurar un suministro de energía confiable, accesible y ecológicamente racional. Por esto los proyectos de investigación y desarrollo en Alemania están organizados y coordinados a nivel nacional.

En 2006 lanzó el “*Programa Nacional de Innovación en Tecnología de Hidrógeno y Celdas de Combustible*” (NIP) el cual fue un primer paso para el país. El programa estaba destinado a acelerar el proceso de preparación del mercado de productos basados en el Hidrógeno orientado al futuro. Actualmente se está desarrollando el NIP2 (período 2016-2025), el cual es un eslabón más dentro de la mejora de esta tecnología. Este programa se encarga de apoyar y financiar la investigación y el desarrollo para reducir el costo de la tecnología y la activación en el mercado [49].

La implementación se realiza a través del financiamiento realizado por el Ministerio Federal de Transporte e Infraestructura Digital (BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) y por las industrias participantes. El BMVI desarrolla una guía para la financiación llamada “Medidas de investigación, desarrollo e innovación” (Förderrichtlinie für “Maßnahmen der Forschung, Entwicklung und Innovation”), la cual es pública.

BMVI también lanzó un programa de financiamiento dentro del alcance del Plan de Acción Nacional Eficiencia Energética (NAPE - Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz) para la adquisición de dispositivos de calefacción de celdas de combustible para clientes privados.

La Organización Nacional Alemana de Hidrógeno y Tecnología de Celdas de Combustible (NOW) coordina y administra los programas para la preparación del mercado de productos y aplicaciones en las áreas de hidrógeno, celdas de combustible y tecnología de accionamiento de batería eléctrica. Es una estructura por la cual el Ministerio Federal para el Medio Ambiente, así como la investigación y educación participan activamente en el desarrollo estratégico de NIP.

En 2012 el parlamento alemán promulgó la exención de impuestos para vehículos eléctricos (puros) con licencia antes del 31 de diciembre de 2015 que luego se extendió a 10 años. De las 48 estaciones de hidrógeno construidas en 2018 en el mundo, 17 de ellas se localizan en Alemania, totalizando en 60 estaciones alrededor de todo el país.

En 2018 se pusieron en funcionamiento dos trenes Coradia iLint con combustible de hidrógeno, contruidos por el fabricante francés de TGV Alstom, los cuales recorren una ruta de 100 kilómetros entre los pueblos y ciudades de Cuxhaven, Bremerhaven, Bremervorde y Buxtehude, en el norte de Alemania. Los trenes Coradia iLint pueden recorrer alrededor de 1.000 kilómetros con un solo tanque de hidrógeno -que se recarga en 15 minutos-, una autonomía similar a la gama de trenes diésel. [50]

5.2.3. Estados Unidos (California)

California es el estado con el consumo de energía limpia más avanzado de los Estados Unidos. El transporte es la fuente de energía con mayor cantidad de emisiones de GEI, por esto California tiene objetivos agresivos de reducción de GEI, los cuales requieren de la disminución del consumo de petróleo. Estos objetivos están asociados a un plan de acción llamado ZEV (Vehículo de Emisión Cero). [51]

El Consejo Empresarial de Hidrógeno de California (California Hydrogen Business Council) tiene el compromiso de abogar por políticas públicas que reconozcan las tecnologías de hidrógeno y celdas de combustible como una fuente de energía limpia y sin emisiones, que puedan utilizarse en todos los sectores para una amplia gama de aplicaciones que incluyen: transporte, movimiento de mercancías, energía estacionaria y almacenamiento de energía.

El estado de California trabaja desde el año 2004 en una red de carreteras de hidrógeno (California Hydrogen Highway Blueprint Plan - CaH2Net) como un marco para crear la infraestructura y para asegurar que las estaciones de combustible de H₂ estuvieran en su lugar para satisfacer la demanda de vehículos de hidrógeno a través de las rutas de California. Mediante el plan BluePrint el gobierno en conjunto con las industrias condujo a políticas y fondos iniciales que aseguran el rápido progreso del H₂.

En 2006 se estableció por ley (*California Senate Bill 1505*) que la Junta de Recursos del Aire (California Air Resources Board - CARB) es la autoridad para regular las emisiones y el contenido renovable de hidrógeno producido para alimentar los vehículos de celdas de combustible. Por la misma ley se ordenó que el 33,3% del hidrógeno suministrado a través de la infraestructura de abastecimiento de combustible del estado se haga a partir de "recursos de energías renovables elegibles" según lo establecido por el código de servicios públicos. [52]

Mediante ley (California Assembly Bill No. 118), en el año 2007 se creó el Programa de Tecnología de Combustibles y Vehículos Renovables de la Comisión de Energía de California (ARFVTP). Este programa estableció a la Comisión de Energía de California (CEC) "desarrollar e implementar combustibles alternativos y renovables, y tecnologías avanzadas de transporte para ayudar a lograr las políticas estatales de cambio climático". El mismo año mediante una orden ejecutiva se establece a CARB cumplir con el objetivo de al menos un 10% de reducción en la intensidad de carbono (CI) de los combustibles de transporte de California para 2020. [52]

En 2013, Energy Independence Now publicó el Plan de Inversión de la Red de Hidrógeno (H2NIP) para abordar los desafíos que enfrenta el desarrollo de la infraestructura de abastecimiento de hidrógeno en California. [52]

La ley de la Asamblea 8 (California Assembly Bill No. 8) establece el Programa de Tecnología de Combustible y Vehículo Alternativo y Renovable (Alternative and Renewable Fuel and Vehicle Technology Program), administrado por la Comisión Estatal de Conservación y Desarrollo de los Recursos Energéticos (State Energy Resources Conservation and Development Commission), para proporcionar a entidades específicas, previa apropiación por parte de la Legislatura, subvenciones, préstamos, garantías de préstamos, préstamos rotatorios u otras medidas apropiadas para el desarrollo y despliegue de tecnologías innovadoras que transformarían los tipos de combustible y vehículos de California para ayudar a alcanzar las metas estatales de cambio climático. Esta ley ofrece hasta USD 20 millones por año para apoyar la construcción continua de al menos 100 estaciones de combustible de hidrógeno. Este enfoque permitirá que los FCEV de hidrógeno, junto con otras tecnologías de vehículos de emisión cero (ZEV), desempeñen un papel importante en el cumplimiento de los múltiples objetivos establecidos. [53]

En 2018, mediante una orden ejecutiva (EXECUTIVE ORDER B-48-18), el gobernador de California duplicó la meta de construcción del estado para las estaciones de hidrógeno, estableciendo nuevos objetivos de 200 estaciones y 5 millones de vehículos con cero emisiones en las carreteras de California para el 2030. [54]

CAPÍTULO 6: REGULACIÓN DEL HIDRÓGENO EN ARGENTINA

Argentina en los últimos años ha comenzado a buscar un futuro sostenible y libre de emisiones, por esto el hidrógeno es una alternativa que permitiría disminuir la contaminación tanto en el sector del transporte como de la energía, al mismo tiempo que ayudaría a la industria a mejorar su eficiencia energética y su viabilidad.

Sin embargo, hoy en día, el hidrógeno es, en general, un gran desconocido para la sociedad argentina. Desde el año 2000 se han estado presentado diferentes proyectos de ley en la Argentina relacionados con el hidrógeno, de los cuales ninguno prosperó demasiado [55]:

- 1) Argentina ha estado participando desde 1997 en la elaboración de normas, códigos y estándares, denominado comité técnico ISO / TC 197, por medio del IRAM, donde funciona el respectivo comité local de hidrógeno.
- 2) En abril del 2003 se aprobó una resolución la cual declara de interés nacional toda iniciativa referida a la investigación y aplicación de normas de manejo y seguridad para la obtención de hidrógeno como combustible no contaminante y sustentable de la republica argentina.
- 3) En mayo de 2003 se aprobó el comienzo de la construcción de una planta integral destinada a la producción de hidrógeno en Pico Truncado, provincia de Santa Cruz, a partir de energía eólica.
- 4) En marzo de 2005 el Poder Ejecutivo Nacional aprobó declarar de interés nacional y ambiental al congreso nacional sobre hidrógeno y fuentes sustentables de energía (Hyfusen 2005).
- 5) En agosto de 2006 fue promulgada la ley nacional N.º 26.123 "Régimen para el desarrollo de la tecnología, producción, uso y aplicaciones del hidrógeno como combustible y vector de energía". Esta ley declara de interés nacional el desarrollo de la tecnología, la producción, el uso y aplicaciones del hidrógeno como combustible y vector de energía. Y promueve la investigación, el desarrollo, la producción y el uso del hidrógeno como combustible y vector energético, generado mediante el uso de energía primaria y regula el aprovechamiento de su utilización en la matriz energética [56]. Hasta el momento no ha sido reglamentada.
- 6) En los años posteriores a la aprobación de la ley 26.123, se presentaron diferentes proyectos para reglamentar la ley y para modificar y/o actualizar artículos de la misma que fueron quedando desactualizados. Y, por otro lado, ya que la ley no se había reglamentado, buscar la manera de hacer cumplir ciertos artículos que eran necesarios para los estudios y proyectos que se estaban realizando en ese momento.
- 7) En el año 2014 se declaró mediante la ley 27.038 a la ciudad de Pico Truncado, provincia de Santa Cruz, capital nacional del hidrógeno.
- 8) En 2015 se redactó un Plan Nacional de Hidrógeno (PNH), pero no fue aprobado. El principal objetivo del PNH era implementar y utilizar el hidrógeno como combustible en Argentina en un futuro cercano, sentar las bases y establecer etapas para que ello ocurra, poniendo el

foco en el desarrollo propio de tecnología y en la educación y la difusión de las ventajas y potencialidades del hidrógeno.

El plan se estructuraba en programas de corto, mediano y largo plazo con un número de proyectos definidos. Entre los Programas se pueden mencionar aquellos que promueven el desarrollo de tecnología propia en torno a electrolizadores y reformadores, sistemas de almacenamiento, pilas de combustible, así como también los que contemplan la inserción del hidrógeno en el mercado nacional a través de acciones concretas dirigidas a la sociedad y las empresas.

- 9) En noviembre de 2016 se presentó un proyecto de ley para crear un ente público autárquico, llamado “Instituto para la Promoción del Estudio y Uso del Hidrógeno”. El mismo estaría compuesto por un equipo de expertos, el cual actuará como órgano de asesoramiento y consulta de las distintas dependencias del Estado Nacional que estén directa o indirectamente vinculadas a la planificación energética. Este proyecto busca impulsar un uso más sostenible de la energía y apunta a promover acciones tendientes a la investigación y sistematización sobre la viabilidad, factibilidad y costo-beneficio de los posibles usos del hidrógeno como fuente energética secundaria para el transporte automotor. La misma fue archivada en 2017.
- 10) En noviembre de 2017, presentó un proyecto de ley para actualizar la ley 26.123, la cual requiere que se tengan en cuenta todos los avances tecnológicos logrados en I+D a nivel mundial y así estimular la inversión del sector privado y el empleo, en paralelo a la mitigación del impacto ambiental. [57]

Este proyecto propone un incentivo al desarrollo de hidrógeno como almacenamiento de energía eléctrica renovable y para la producción de fertilizantes. En el mismo se reflota la idea de la conformación de un “Plan Nacional del Hidrógeno”, donde se pide garantías de implementación de políticas de modo coordinado con los restantes organismos de la Administración Pública Nacional y de las jurisdicciones provinciales con competencia en la materia. La ley 26.123 ya establecía mecanismos de financiamiento, pero aquí se fomentan otros beneficios fiscales y tratados de cooperación.

Este proyecto está pendiente en la cámara de diputados.

- 11) En junio de 2018, se volvió a presentar el proyecto para la creación del “Instituto para la Promoción del Estudio y Uso del Hidrógeno”. El mismo sigue pendiente.
- 12) En abril de 2019 se presentó un proyecto de ley para la modificación de la ley 26.123 para así poder favorecer el desarrollo de la actividad.

Los antecedentes enumerados indican que existe un interés en reglamentar la ley de hidrógeno para su investigación y desarrollo, y su implementación. Solo resta formar acuerdos e impulsarla.

PARTE III: PERSPECTIVAS PARA EL HIDRÓGENO EN ARGENTINA

CAPÍTULO 7: DESARROLLO DEL HIDRÓGENO EN ARGENTINA

El hidrógeno se ha estado utilizando como materia prima junto al nitrógeno, para producir fertilizantes nitrogenados. A mediados del siglo pasado y gracias a la existencia de importantes reservas de gas natural, se impuso la tecnología de reformado con vapor de gas natural para producir gas de síntesis, con la cual se genera hidrógeno con la pureza adecuada para ingresar a la planta de síntesis de amoníaco, para producir fertilizantes nitrogenados. En Argentina, además de estos usos el hidrógeno tiene otras aplicaciones en la industria alimenticia, en la industria farmacéutica y en las refinerías de petróleo.

7.1. Producción y usos de Hidrógeno en Argentina

La producción de hidrógeno comercial en Argentina se basa en la tecnología de reformado de gas metano con vapor. Existen al menos 10 empresas que producen hidrógeno (Tabla 8):

Tabla 8: Producción de hidrógeno en Argentina

Empresa	Localización	Producto final	Capacidad (t/a)	Producción H ₂ (m ³ /h)
Profertil	Bahía Blanca	Urea	1.320.000	186.000
		Amoníaco	790.000	
Pampa Energía (Ex PASA S.A.)	Campana	Amoníaco, Urea	115.000	1.145
Fábrica Militar	Río Tercero	Amoníaco	12.000	122
YPF S.A.	Ensenada	Metanol	25.000	3.600
	Plaza Huincul	Metanol	400.000	57.500
	Lujan de Cuyo	Jet Propulsión	19.700	25.000
Arauco (ex Resinfor Metanol S.A.)	General San Martín	Metanol	50.000	7.190
Siderca	Campana	Hierro esponja		70.200
Siderar	San Nicolás	Hierro esponja		
Air Liquide	Campana	Gases especiales	11.500	14.500
AGA	Buenos Aires	Gases especiales		200
VASA	Buenos Aires	Vidrio Plano	160	200

Fuente: Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Buenos Aires, 31 de octubre 2014.
https://www.ancefn.org.ar/user/files/conferencia_Laborde.pdf

Air Liquide posee una planta de hidrógeno en Campana desde el año 2010 con una capacidad de producción de 14.700 m³.

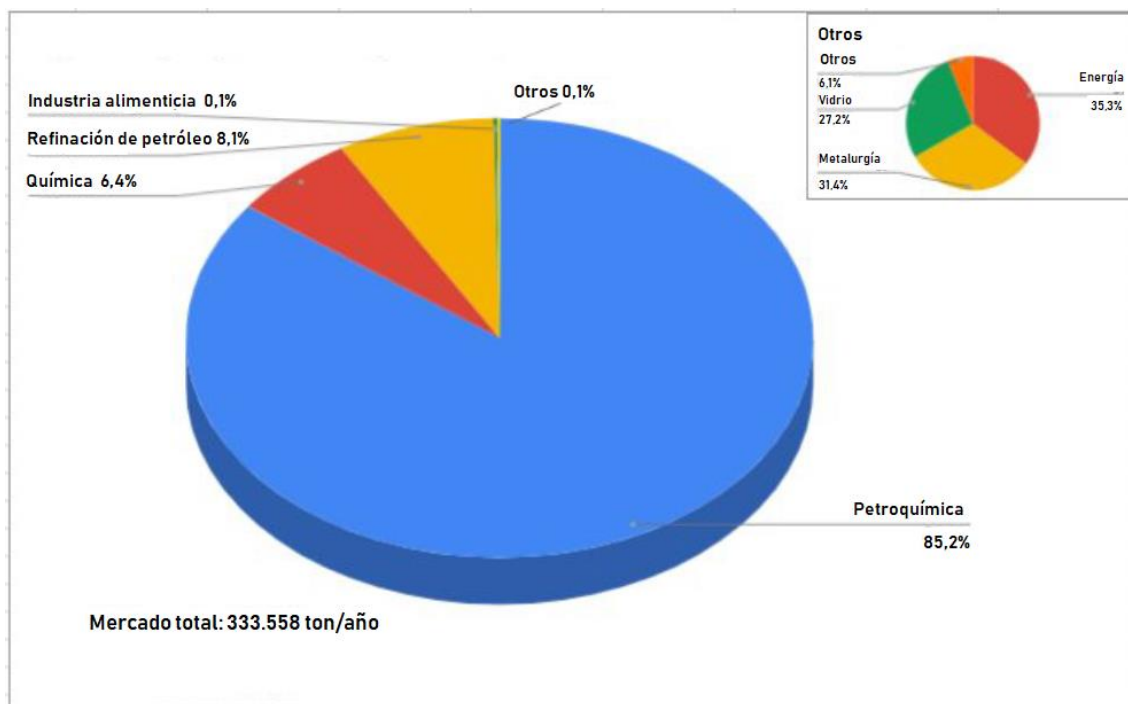
La planta de hidrógeno en Pico Truncado comenzó siendo experimental en el año 2005 y actualmente es una planta semi industrial. En la etapa experimental, la planta producía 1 m³ nominal hora de hidrógeno y ½ m³ de oxígeno; y en la etapa industrial está teniendo una capacidad de producción de 100 m³ nominal hora de hidrógeno y 50 de oxígeno saliendo a baja presión (6 a 10 bares).

Otra planta importante es la de Hychico la cual se alimenta a partir de electricidad proveniente del parque eólico Diadema con una potencia instalada de 6,3 MW. La planta de hidrógeno fue inaugurada en 2008 y se ubica a 20 Km de la Ciudad de Comodoro Rivadavia en la Provincia de Chubut. La planta cuenta con dos electrolizadores con una capacidad total de 120 Nm³/h de hidrógeno y 60 Nm³/h de oxígeno. El hidrógeno de alta pureza (99,998 %) es mezclado con gas natural para alimentar un moto-generator de 1,4 MW, que posee un motor de combustión interna adaptado especialmente para operar con gas rico y/o pobre mezclado con hidrógeno. Es

importante destacar que la pureza del hidrógeno producido lo hace especialmente apto para su uso en celdas de combustible. Cabe señalar que las proporciones alcanzadas de hasta un 42% de hidrógeno en mezcla, se encuentran por encima de los rangos internacionales usuales para estos motores de alta potencia, logrando buenos desempeños en cuanto a rendimientos y reducción de emisiones (CO₂, CO y NO_x). El oxígeno producido, también de alta pureza (99,998%), es comercializado a alta presión en el mercado de gases industriales [58].

El consumo de hidrógeno en Argentina por sector se muestra en la Figura 32.

Figura 32: Consumo de hidrógeno en Argentina - 2017



Fuente: Air Liquide Argentina S.A – Copyright

Actualmente todo el hidrógeno que se genera en Argentina es a partir de fuentes convencionales, particularmente se utiliza como materia prima el gas natural. Esto genera contaminación ambiental a partir de los gases de efecto invernadero que ocurren durante su producción. Esta es la razón principal por la cual se debe buscar otra forma de producción de hidrógeno. La producción a partir de fuentes renovables está creciendo fuertemente en todo el mundo y Argentina es un país con dos recursos sumamente importantes y necesarios para la producción a partir de las fuentes renovables (energía solar y eólica).

7.2. Zonas potenciales de producción de hidrógeno en Argentina

Argentina se encuentra dentro del grupo de países donde la producción de hidrógeno por medio de electrólisis generada a partir de electricidad renovable (solar y eólica) tendría un costo significativamente bajo para poder ser competitivo contra el hidrógeno convencional. Esto se debe a que el recurso en las zonas rojas y anaranjadas que se puede observar en la figura 33 es abundante y con condiciones excelentes. Se puede observar también que el costo de producir en estas zonas está entre los 1,6 USD/kgH₂ y los 2 USD/kgH₂ [59].

La Figura 33 está desarrollada a partir de los siguientes parámetros:

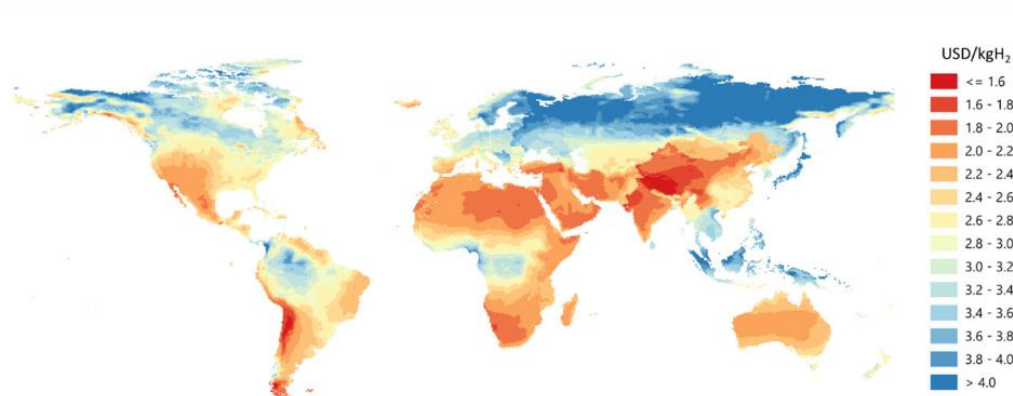
CAPEX del electrolizador = USD 450 / kWe,

Eficiencia (LHV⁴) = 74%;

CAPEX fotovoltaico solar y CAPEX eólico terrestre = entre USD 400–1 000 / kW y USD 900–2 500 / kW, dependiendo de la región;

Tasa de descuento = 8%.

Figura 33: Costos de hidrógeno a partir de sistemas solares fotovoltaicos híbridos y sistemas eólicos a largo plazo



Fuente: IEA Hydrogen

El excedente de electricidad de las energías renovables variables tiene bajos costos, pero el número de horas durante las cuales ocurre este excedente es generalmente bajo. Sin embargo, la caída de los costos significa que las energías renovables dedicadas a la producción de hidrógeno en regiones con excelentes condiciones de recursos podrían convertirse en una fuente confiable de hidrógeno de bajo costo [59].

Por lo tanto, Argentina es un candidato potencial para producir hidrógeno, utilizarlo dentro de la industria, y expandir su uso al transporte, la calefacción y la generación.

⁴ Lower Heating value (Valor calorífico inferior)

7.2.1. Potencial de Energía eólica

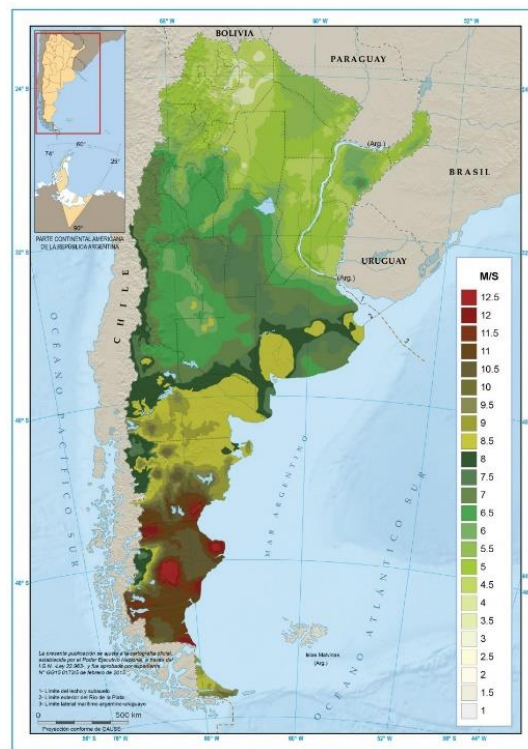
En la región austral de Argentina las condiciones de viento son tales que ubican a la Patagonia entre las zonas más aptas del planeta para la producción y aprovechamiento de la energía eólica.

La dirección, constancia y velocidad del viento en la región indican el extraordinario potencial para la generación de esta. Según la Asociación Argentina de Energía Eólica, Argentina dispone de vientos de más de 6 m/s en el 70% de su territorio como se indica en la

Figura 34, con una dirección y constancia tal que permiten obtener factores de capacidad del 35% y superiores [60].

La experiencia mundial indica que con vientos medios superiores a 5 m/s es factible el uso del recurso eólico para la generación eléctrica. Así, la región patagónica no solo presenta mayores velocidades que la media, sino también mayores expansiones de tierra potencial para la generación eólica [61].

Figura 34: Mapa del Potencial de vientos en Argentina



Fuente: ENERGIA DE MI PAIS - <http://energiasdemipais.educ.ar/>

La Patagonia Argentina presenta muy buenos vientos comparados con otros lugares del mundo, lo que se traduce en muy altos factores de carga⁵. Los mismos son el doble que los que se

⁵ El factor de carga (también llamado factor de planta) es una de las variables más relevantes al analizar la factibilidad de cualquier inversión en una central de generación eléctrica. Éste se define como el cociente entre la energía generada en un determinado período de tiempo y el máximo que sería posible producir en el mismo período (potencia máxima multiplicada por cantidad de horas del período de tiempo).

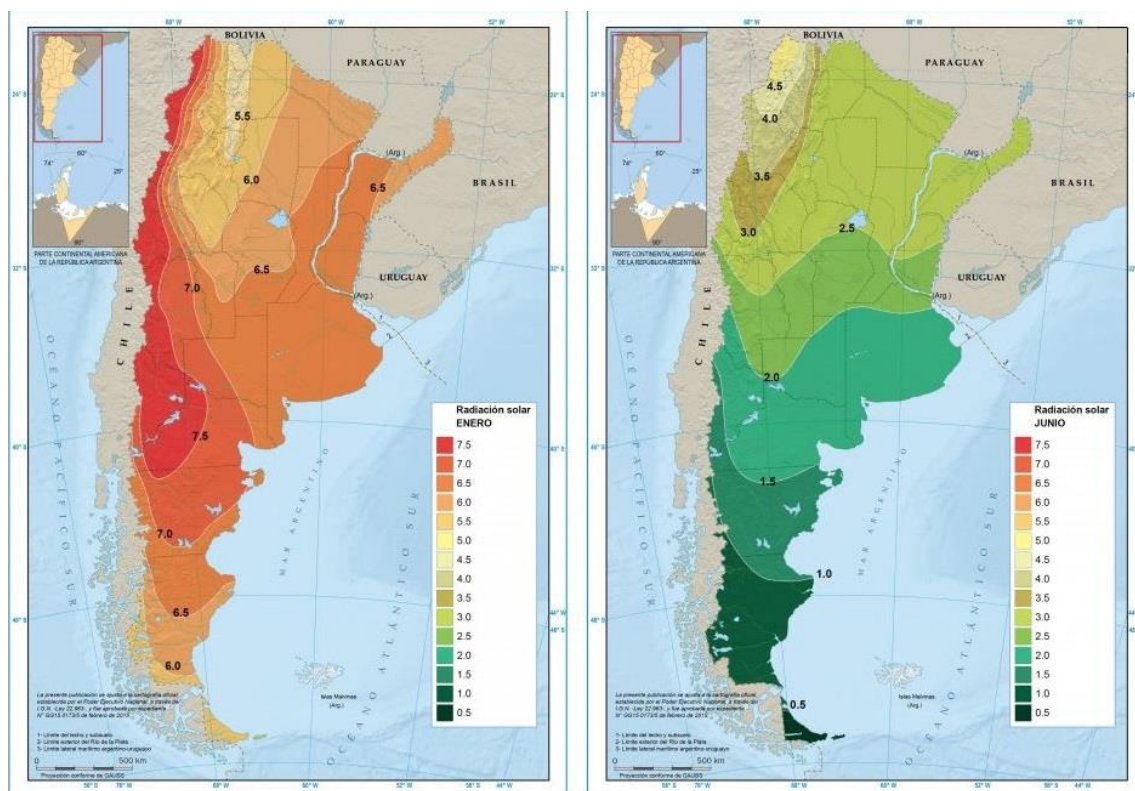
encuentran, en promedio, en algunos países europeos y un 50% más altos que países europeos con mejores vientos (Dinamarca, Irlanda, Reino Unido) [60].

7.2.2. Potencial de Energía solar

La Argentina tiene un gran potencial para el desarrollo de la energía solar. Especialmente en las regiones andinas y subandinas, desde Jujuy hasta Neuquén, y en la Puna y la Quebrada de Humahuaca.

La región del noroeste argentino (La Rioja, Salta, Jujuy) y el área montañosa del centro este de Argentina (Cuyo: Mendoza, San Juan y San Luis) tienen la mayor irradiación solar del país. En estas dos regiones, la irradiación solar va de 1800 KWh/m² a 2200 KWh/m² por año también presentan niveles significativos de radiación como se puede ver en la Figura 35.

Figura 35: Mapa del Potencial solar en Argentina en junio y enero



Fuente: ENERGIA DE MI PAIS - <http://energiasdemipais.educ.ar/>

Los primeros sistemas de energía solar fotovoltaica de Argentina se instalaron como parte del Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER) entre 1999 y 2012. La primera planta solar conectada a la red, un proyecto piloto de 1,2 MW en el departamento de Ullúm, se construyó en 2010.

En el caso de la tecnología solar fotovoltaica, la caída de los costos de los módulos fotovoltaicos y el aumento de la eficiencia de los mismos es el principal causante de la reducción tan drástica del CAPEX en estos proyectos. Entre los años 2010-2018 se experimentó una reducción de los costos de inversión del 74%, lo cual en números de inversión equivale a USD 4.621/kW en 2010 a USD 1.210/kW en 2018 [62].

Esto hizo que invertir en proyectos solares fuera más fácil. Por medio de los programas de la secretaria de energía (RenovAr) se han adjudicado más de 1.700 MW desde el 2016 hasta el día de hoy.

7.3. Avances del Hidrógeno en Argentina

Los antecedentes en Argentina se remontan a la década del 70. La AAH (Asociación Argentina del Hidrógeno) fundada en 1996 en conjunto con instituciones académicas y de investigación y desarrollo han logrado establecer una planta experimental en Pico Truncado y, a escala de laboratorio, ensayar motores, grupos electrógenos, quemadores, pequeñas pilas de combustible PEM, vehículos, compresores y electrolizadores, entre otros. Y se instaló una pequeña planta piloto en la base Esperanza, Antártida Argentina [63].

En los años 1997-1998, apoyado por la Usina Popular Cooperativa de la ciudad de Necochea, se desarrolló un automóvil (Renault 9) con modificaciones en el motor para funcionar con hidrógeno. La conversión demandó diseñar y construir inyectores específicos de importante volumen por la baja densidad del hidrógeno gaseoso, junto con la electrónica de control correspondiente. Al automóvil se lo bautizó con el nombre de “Quequén 1” y permitió experiencias inéditas en nuestro país para que el motor de un automóvil se alimente con hidrógeno como combustible exclusivo [63].

En el año 2006 se implementó un motor de una camioneta Ford Ranger, cedida por Panamerican, de Comodoro Rivadavia, el cual se adaptó para que funcionara con una mezcla de gas natural más 20% de hidrógeno en volumen. Esta conversión es más simple y podría permitir la introducción del hidrógeno como combustible simultáneo en diversos vehículos [63].

Desde el año 2008, la empresa argentina Hychico opera una planta de hidrógeno electrolítico de 120 nm³/h de hidrógeno, que, mezclado con gas natural, alimenta un motogenerador de 1400 KW con reducción de gases GEI (gases de efecto invernadero).

Una experiencia muy relevante es la que Hychico está llevando adelante con el almacenamiento subterráneo de hidrógeno, a 800 metros bajo el nivel del suelo, en un pozo depletado de hidrógeno. Está vinculado a la experiencia europea denominada “Hyunder”. Esta alternativa tecnológica puede brindar la capacidad de almacenamiento masivo de hidrógeno, rango de ciento de miles a millones de metros cúbicos de hidrógeno, a un costo muy competitivo [63].

En 2019 los gobiernos de Argentina y Japón suscribieron un Memorándum de Cooperación para trabajar en el desarrollo del hidrógeno como combustible no contaminante, tecnología que varias automotrices en el mundo exploran para el futuro de una movilidad sustentable. El Memorándum promoverá las inversiones en este campo y generará el marco propicio para la integración de Argentina en las cadenas globales de valor energéticas sustentables, según aseguró la Cancillería.

7.4. Costos de producción de Hidrógeno en Argentina

Es importante tener una noción de los costos derivados de cada método de producción de hidrógeno, renovable y no renovable. Para esto hay que tener en cuenta el nivel de avance de la tecnología de producción, la disponibilidad de infraestructura existente y el precio de la materia prima. Todas estas variables generan fuertes incertidumbres del costo de producción del hidrógeno.

En la Tabla 9 se muestran los costos del hidrógeno a partir de los diferentes métodos de producción explicados en 2.3 .

Tabla 9: Costos de producción de hidrógeno

Proceso productivo	Fuente de energía	Materia Prima	Costo del hidrógeno (USD/kg)
Reformado de vapor con captura de carbono	Combustibles fósiles	Gas Natural	2,27
Reformado de vapor sin captura de carbono	Combustibles fósiles	Gas Natural	2,08
Reformado autotérmico de metano con captura de carbono	Combustibles fósiles	Gas Natural	1,48
Pirólisis de metano	Vapor generado	Gas Natural	1,59-1,70
Pirólisis de biomasa	Vapor generado	Biomasa de leña	1,25-2,20
Gasificación de biomasa	Vapor generado	Biomasa de leña	1,77-2,05
Biofotólisis directa	Solar	Agua + algas	2,13
Biofotólisis indirecta	Solar	Agua + algas	1,42
Fermentación		Biomasa orgánica	2,57
Foto fermentación	Solar	Biomasa orgánica	2,83
Electrólisis Solar fotovoltaica	Solar	Agua	5,78-23,27
Electrólisis Solar térmica	Solar	Agua	5,10-10,49
Electrólisis del viento	Viento	Agua	5,89-6,03
Electrólisis nuclear	Nuclear	Agua	4,15-7
Termólisis nuclear	Nuclear	Agua	2,17-2,63
Termólisis solar	Solar	Agua	7,98-8,40
Foto electrólisis	Solar	Agua	10,36

Fuente: Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies -2019 [64]

Según la Tabla 9, los métodos económicamente más ventajosos para la producción de hidrógeno son el reformado con metano, el carbón y la gasificación de biomasa. Los ciclos termoquímicos nucleares también parecen ser competitivos. Todavía la electrólisis eólica y solar proporcionan un costo de producción por kg de hidrógeno alto para competir con los métodos que son a partir combustibles fósiles. A medida que los costos de producción de energía solar y eólica sigan bajando, esta producción será más competitiva.

En Argentina existe un alto potencial de fuentes energéticas renovables, como ejemplo en la región austral del país las condiciones de viento son tales que ubican a la Patagonia argentina entre las zonas más aptas del planeta para la producción y aprovechamiento de la energía eólica. Esta información se desprende de los altos valores del Factor de Capacidad (FC, energía generada por unidad de potencia nominal) que indican que los mismos podrían duplicar los promedios mundiales⁶.

⁶ Cámara argentina de energías renovables

A partir de un estudio realizado por la Universidad Nacional de la Patagonia Austral [65] para las zonas con alto factor de capacidad eólico en Argentina, se obtuvieron los siguientes resultados para el costo de producción de hidrógeno:

Tabla 10: Costos de producción de hidrógeno eólico en Argentina

FC Eólico	USD/kg de hidrógeno eólico
< 30%	> 3,82
30%-35%	3,55-3,82
35%-45%	3,17-3,55
45%-55%	2,92-3,17
55%-60%	2,83-2,92
> 60%	< 2,83

Fuente: Universidad Nacional de la Patagonia Austral [65]

A partir de la Tabla 10 se observa que:

El menor costo por kilogramo de hidrógeno se obtuvo en las provincias de Santa Cruz y Chubut. Para un FC eólico de 63%, este valor alcanza 2,78 USD/kg de H₂. Tomando el costo actual de energía eólica como 50 USD/MWh, el costo de producción de hidrógeno eólico resulta 2,5 USD/kg H₂.

Por lo tanto, el costo de producción de hidrógeno en Argentina se encuentra dentro de valores competitivos a nivel mundial.

7.5. Barreras para la creación del mercado del Hidrógeno en Argentina

7.5.1. Barreras tecnológicas

Aunque existen importantes avances tecnológicos, la implementación de la economía del hidrógeno tomará tiempo para que se establezca. El desarrollo y la aplicación del hidrógeno como combustible del futuro avanza lento debido a que se requiere aún más investigación y pruebas para que se muestren resultados.

Desde el punto de vista de la producción del hidrógeno, hay que considerar que los métodos actuales resultan costosos y se basan principalmente en la gasificación de combustibles fósiles. Los procesos basados en energías renovables o energía nuclear no se encuentran suficientemente desarrollados y a nivel industrial su costo es aún mayor.

Otro punto importante es el progreso de las estaciones de repostaje para así poder dar respuesta a una demanda global de este tipo de energía. La concentración de estas estaciones está dada en Estados Unidos, Europa y Japón principalmente. La transición hacia una economía del hidrógeno exigirá la creación y mantenimiento de una vasta infraestructura que produzca y distribuya esta nueva energía, lo que sólo podrá conseguirse si el equipamiento utilizado es plenamente operativo, seguro y de fácil utilización.

Por último, el almacenamiento del hidrógeno es un reto que se debe resolver ya que, debido a su baja densidad energética, se necesitan enormes volúmenes de hidrógeno para alimentar procesos con alta demanda energética.

7.5.2. Barreras económicas

Los factores económicos están ligados a la tecnología, dado que es la inversión más fuerte dentro de un proyecto de generación de hidrógeno. El precio de las pilas de combustible y su fiabilidad supone una barrera a la aplicación masiva de esta tecnología. El uso de electrodos con catalizadores de metales nobles como el paladio y el platino, con un elevado precio de mercado, y los problemas de envenenamiento, sobre todo en procesos que utilizan hidrógeno de menor pureza, también son objeto de investigación.

7.5.3. Barreras legales

Existe una escasez de reglamentación y normativa relativa a las nuevas tecnologías del hidrógeno en los distintos países que han desarrollado este combustible. El rápido crecimiento de las tecnologías del hidrógeno ha provocado la necesidad de elaborar estándares relativos a las mismas que puedan servir para elaborar una legislación al respecto. La producción, el almacenamiento y la distribución de hidrógeno debe cumplir ciertas regulaciones.

La creación de nueva legislación lleva tiempo y requiere de un considerable conocimiento de la tecnología. La legislación hace al mundo empresarial más seguro. Un vacío en la legislación siempre es motivo de incertidumbre debido al riesgo que existe a que las compañías se vean forzadas a abandonar la tecnología o actividad en la que ya han invertido dinero.

7.5.4. Barreras sociales

La barrera social más importante es la falta de información de una economía basada en el hidrógeno. Hoy en día, en relación a las tecnologías del hidrógeno, existe un desconocimiento por parte de la población, en general, sobre lo que representa y cómo funciona. Este hecho está motivado por el carácter novedoso de la tecnología. Gran parte de la población ve al hidrógeno como una tecnología que no es segura, por ello, el factor social toma un papel muy importante en la implantación del hidrógeno. Además, en nuestro país está muy inculcada la cultura basada en los hidrocarburos, y esto crea una barrera de rechazo hacia la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías como son las renovables, entre las que se encuentra el hidrógeno.

7.6. Instituciones de investigación dedicadas al Hidrógeno en Argentina

- Asociación Argentina de Hidrógeno
- CNEA (Comisión de Energía Atómica) trabajan en almacenamiento y purificación de hidrógeno, CAB (Centro Atómico Bariloche) y CAC (Centro Atómico Constituyentes) están dedicados a las pilas de combustible tipo PEM.
Almacenamiento de hidrógeno en forma de hidruros, materiales para pilas de combustible de alta temperatura, óxidos sólidos, fragilización por hidrógeno en metales.
- UTN (Universidad Tecnológica Nacional), Facultad Regional Buenos Aires.
Laboratorio de mecánica y máquinas térmicas. Evaluación de motores en banco de ensayo que funcionan con H₂ en mezclas combustibles.
- ITBA (Instituto Tecnológico Buenos Aires):. Tecnologías del hidrógeno “power to gas”, es el aprovechamiento de la generación eléctrica, especialmente desde las fuentes renovables y variables como la eólica y solar, para la obtención de combustible hidrógeno.

- UBA (Universidad de Buenos Aires). La Planta piloto de producción y purificación de hidrógeno está ubicada en el Departamento de Ingeniería Química (DIQ) de la Facultad de Ingeniería (FIUBA), diseñada y montada por profesionales del DIQ y del Instituto de Desarrollo y Diseño - INGAR y la UTN con sede en Santa Fe.
- En el CITEDEF (Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa) existen grupos que desarrollaron pilas de combustible a hidrógeno, en particular PEM y óxido sólido, y que tienen prototipos del orden de 100 watts, con muy buenas prestaciones, probados en la Antártida.
- Grupos con experiencia en membranas, síntesis de catalizadores y/o diseño de plantas, que se encuentran en diversos institutos del CONICET o institutos Universidad-CONICET (INCAPE, INGAR, PLAPIQUI, INTEQUI, CINDECA, INIFTA, ITHERS).
- Y-TEC (YPF Tecnología S.A. –51% YPF, 49% CONICET–) es la empresa argentina líder en generación y transferencia de soluciones tecnológicas para la industria energética. Entre los proyectos destacados se encuentra el avance en los estudios de la producción de hidrógeno a partir de agua y energía solar, empleando materiales con propiedades ópticas mejoradas que permiten absorber más eficientemente la luz del sol y catalizar la reacción de clivaje del agua, obteniendo hidrógeno y oxígeno como productos.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES

El cambio climático está atribuido, directa o indirectamente, a las actividades humanas que alteran la composición global de la atmósfera y a la variabilidad climática que está sucediendo. Este es uno de los mayores desafíos que se tiene en la actualidad.

En el último informe presentado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change) de la ONU se realiza una evaluación del aumento del nivel del mar y sus causas a lo largo de las últimas décadas. Allí se determinan las emisiones acumuladas de CO₂ desde la época preindustrial con el objetivo de concientizar a la población y limitar el calentamiento a menos de 2°C. Uno de los puntos más relevantes del informe es que el cambio de temperatura actual está sucediendo en un espacio de tiempo muy corto y la limitación del calentamiento global a 1.5°C comparado con 2°C podría ser más atinado e ir de la mano con el compromiso de asegurar una sociedad más sostenible.

La matriz energética argentina tiene un consumo primario de 86% de combustibles fósiles, donde el 53% es gas natural. Para poder cumplir con las metas pactadas con los organismos internacionales a partir del acuerdo de París, este consumo debe comenzar a reducirse.

Por esta razón, encontrar energías alternativas, entre ellas el hidrógeno, a las utilizadas convencionalmente que son aquellas que producen el mayor porcentaje de gases de efecto invernadero es sumamente importante para garantizar una mejor calidad de vida y un mundo más estable para las generaciones venideras.

La descarbonización del transporte incluye la electrificación de todos los medios de transporte, mediante el uso directo de la electricidad, el almacenamiento de la energía en baterías o en combustibles que actúen como un vector energético, en donde entraría el hidrógeno. El hidrógeno luego se utilizaría para generar la electricidad de nuevo a bordo de los propios vehículos.

Es importante diferenciar entre los diferentes tipos de producción de hidrógeno, los cuales dependen de la energía usada para producirlo y el método obteniendo un hidrógeno gris, celeste o verde. El método de producción que no genera contaminación es el que se basa en fuentes renovables (hidrógeno verde), de este modo se favorece la gestión de la intermitencia asociada a ellas, evitando la dependencia energética externa basada en combustibles fósiles, y generando un hidrógeno que no contiene impurezas.

Argentina tiene una gran ventaja: contar con fuentes de energías renovables inagotables, limpias y de precios muy competitivos, donde las tecnologías del hidrógeno pueden ser desarrolladas como hidrógeno limpio o “verde”, aportando a la descarbonización de la matriz o exportando este elemento.

El Power to gas es una opción prometedora para la producción de hidrógeno (H₂) por electrólisis del agua y la siguiente conversión de H₂ y dióxido de carbono (CO₂) en metano (CH₄) y monóxido de carbono (CO). Luego de separar al H₂ del CO, la electricidad renovable puede almacenarse en la infraestructura de gas natural, accediendo a la gran capacidad de transporte de la red y los sitios de almacenamiento de gas.

Uno de los puntos más importantes en relación al marco legal es poder avanzar con la normalización y establecimiento de reglamentos para regular el uso del hidrógeno y sus aplicaciones. La reglamentación de la ley 26.123 ya aprobada será un puntapié muy importante

para que las empresas que desarrollan las tecnologías relacionadas con el hidrógeno lo hagan en un marco regulatorio adecuado.

Los proyectos en marcha que han alcanzado sus objetivos podrán ser utilizados como prototipos para en todo el país. Cabe recordar que tanto en el norte del país donde se posee un excelente recurso solar como en el sur donde los vientos tienen una velocidad inmejorable en comparación con el resto del mundo.

Para promover las plantas de hidrógeno es necesario que el concepto de hidrógeno como vector energético sea conocido por la administración y las autoridades, al mismo tiempo que los procedimientos legales y administrativos requeridos para estas infraestructuras estén claros y no produzcan incertidumbre.

En cuanto a la movilidad, el desarrollo de autos con hidrógeno o la conversión de los autos a gas natural que pertenecen hoy en día al parque automotor precisan que sean impulsados de alguna manera con incentivos, como así también con el desarrollo de la infraestructura de estaciones de repostaje que deberán estar asociadas con la demanda.

Para que cualquiera de estas soluciones sea viable, se necesita una legislación apropiada para facilitar el desarrollo de la infraestructura adecuada. Es sumamente importante empezar a trabajar en este sentido, poder conseguir inversiones para el desarrollo de proyectos.

Establecer como uno de los objetivos a nivel país exportar hidrógeno podrá traer muchos beneficios económicos y relaciones diplomáticas con mercados objetivo como Japón, Alemania y Holanda.

A partir de lo mencionado en esta tesis, queda claro que Argentina posee numerosas ventajas para el desarrollo del hidrógeno como vector energético entre las cuales están las siguientes:

- Un excelente recurso solar y eólico para que la producción de hidrógeno sea limpia y así poder contribuir con el planeta y cumplir con los compromisos ambientales.
- Es uno de los primeros países en utilizar GNC como combustible para vehículos, con lo cual existe el conocimiento necesario para la reconversión necesaria que se deba realizar, o el mantenimiento del mismo.
- Instrumentos legales que impulsan el transporte ecológico y las metas para la reducción de gases de efecto invernadero, tanto en la movilidad como en la producción y generación de energía eléctrica.
- Gran experiencia en la industria ya que existen plantas de producción de hidrógeno y/o de gas de síntesis para producir fertilizantes, metanol, oxoalcoholes, hierro esponja, entre otros productos. Esto implica que se tiene el know how para el manejo de plantas de producción de hidrógeno.
- Grupos en institutos de investigación y en universidades con capacidad y experiencia para participar en desarrollos relacionados con el hidrógeno y para llevar a cabo emprendimientos vinculados con el hidrógeno como vector energético.

De superar todos los obstáculos legales y económicos, Argentina estaría preparada para introducir el hidrógeno como vector energético, demostrando innovación y cuidado por el medio ambiente.

LISTADO DE INSTITUCIONES

- Hydrogen Council (Consejo del Hidrógeno) - <http://hydrogencouncil.com/>
- Bureau of Environment Tokyo Metropolitan Government (Oficina Medioambiental del Gobierno Metropolitano de Tokio) – <https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/en/index.html>
- METI - Ministry of Economy, Trade and Industry (Ministerio de Economía, Comercio e Industria) - <https://www.meti.go.jp/english/>
- NEDO – New Energy and Industrial Technology Development Organization (Nueva Organización de Desarrollo de Energía y Tecnología Industrial) - <https://www.nedo.go.jp/english/>
- 'Japan Hydrogen Station Network Joint Company - <http://www.jari.or.jp/portals/0/jhfc/e/jhfc/company/index.html>
- National Innovation Programme Hydrogen and Fuel Cell Technology (NIP) - <https://www.now-gmbh.de/en/national-innovation-programme>
- Ministerio Federal de Transporte e Infraestructura Digital (BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) - <https://www.bmvi.de/DE/Home/home.html>
- "Medidas de investigación, desarrollo e innovación" (Förderrichtlinie für "Maßnahmen der Forschung, Entwicklung und Innovation) - <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/foerderrichtlinie-forschung-nip.html>
- Plan de Acción Nacional Eficiencia Energética (NAPE - Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz) - https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/nationaler-aktionsplan-energieeffizienz-nape.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- Organización Nacional Alemana de Hidrógeno y Tecnología de Celdas de Combustible (NOW) - <https://www.now-gmbh.de/en>
- Zero-Emission Vehicle Program - <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/zero-emission-vehicle-program>
- Consejo Empresarial de Hidrógeno de California (California Hydrogen Bussines Council) - <https://www.californiahydrogen.org/>
- California Hydrogen Highway Blueprint Plan - CaH2Net - http://alset.at/wp-content/uploads/2013/05/California_Hydrogen_Blueprint_Plan.pdf
- California Air Resources Board - <https://ww2.arb.ca.gov/homepage>
- Programa de Tecnología de Combustibles y Vehículos Renovables de la Comisión de Energía de California (ARFVTP) - <https://ww2.energy.ca.gov/transportation/arfvtp/investmentplans.html>
- Energy Independence Now - <https://einow.org/>
- Asociación Argentina de Energía Eólica - <https://argentinaeolica.org.ar/>
- PERMER - <https://www.argentina.gob.ar/energia/permer>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) - https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml

BIBLIOGRAFÍA

- [1] US Energy Information Administration, Hydrogen explained, https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=hydrogen_home, 2018.
- [2] Royal Society of Chemistry, Periodic table - Hydrogen, <http://www.rsc.org/periodic-table/element/1/hydrogen>, 2018.
- [3] Clara Fernandez - Bolaños Badía, «ENERGÉTICA DEL HIDRÓGENO: CONTEXTO, ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVA DE FUTURO», nº <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3823/>, 2005.
- [4] J. L. G. FIERRO, El hidrógeno: metodologías de producción, http://www.fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/hidrogeno_metodologias_de_produccion.
- [5] B. Y. M. S. José Ignacio Linares Hurtado, «El Hidrógeno y la Energía», *Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI*, 2007.
- [6] R. A. Burns, «Fundamentos de química», 2003.
- [7] M. J. D. W. W. O. Janusz Kotowicz, «Analysis of Hydrogen Production in Alkaline Electrolyzers», *Journal of Power Technologies*, 2016.
- [8] IRENA, «Hydrogen from renewable power», nº https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf, p. 20, 2018.
- [9] UCL, «Solid Oxide Electrolysers», pp. <https://www.ucl.ac.uk/ucell/about/research-areas/electrolysers>, 2018.
- [10] Universidad de Sevilla, «Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica-El caso de la producción de Hidrógeno.», pp. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/30127/fichero/Cap%C3%ADtulo+2+-+Producci%C3%B3n+de+Hidr%C3%B3geno.pdf>, 2009.
- [11] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), «Biomasa: Cultivos energéticos», 2007.
- [12] Office of energy efficiency and renewable energy, «Hydrogen Storage», pp. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>.
- [13] RWTH AACHEN UNIVERSITY, «Power-To-X: Entering the Energy Transition with Kopernikus», pp. <https://www.rwth-aachen.de/go/id/kvyv/lidx/1>, 2016.
- [14] The Oxford Institute for Energy Studies, «Power to Gas Linking Electricity and Gas in a Decarbonising World Insight», 2018.
- [15] ENAGAS, «Potencial del transporte de hidrógeno en la red de gas natural: P2G, estado actual y retos», 2018.
- [16] ENEA, «The potential of Power-to-gas», 2016.
- [17] H2future, H2future project, <https://www.h2future-project.eu/>.
- [18] Hybalance, Hybalance project, <http://hybalance.eu/>, 2018.
- [19] REFHYNE, REFHYNE project, 2018: <https://refhyne.eu/about/>.

- [20] Energystock, The hydrogen project HyStock, <https://www.energystock.com/about-energystock/the-hydrogen-project-hystock>, 2018.
- [21] IEA, «Hydrogen - Tracking Clean Energy Progress,» p. <https://www.iea.org/tcep/energyintegration/hydrogen/>, 2018.
- [22] A. B. AFICHEM, Uses of Hydrogen, <https://www.thechemicalengineer.com/features/uses-of-hydrogen-part-1-industry/>, 2019.
- [23] J. L. G. FIERRO, El hidrógeno: metodologías de producción, Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (CSIC).
- [24] Fernández-Bolaños y C. Badía, ENERGÉTICA DEL HIDRÓGENO: CONTEXTO, ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVA DE FUTURO.
- [25] Hydrogen Mobility Europe , « Introduction to hydrogen mobility,» pp. http://h2me.eu/wp-content/uploads/2018/11/H2ME_Emerging-Conclusions-_introduction-H2-mobility.pdf, 2018.
- [26] I. E. Agency, «IEA Hydrogen,» p. <https://www.iea.org/tcep/energyintegration/hydrogen/>, 2018.
- [27] Electric Vehicle Transportation Center, Analysis of Fuel Cell Vehicle Developments, U.S. Department of Transportation's , 2014.
- [28] US Department of energy, How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen?, 2019.
- [29] The Society of Motor Manufacturers and Traders (SMMT)., HYDROGEN FUEL CELL ELECTRIC VEHICLES - A QUICK GUIDE TO THE UK MARKET, TECHNOLOGY AND INFRASTRUCTURE, 2019.
- [30] CLEAN HYDROGEN IN EUROPEAN CITIES, «FUEL CELL ELECTRIC BUSES: A PROVEN ZERO-EMISSION SOLUTION,» p. https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents/CHIC_publication_final_0.pdf, junio 2016.
- [31] Hydrogen Europe, Clean Hydrogen in European Cities, <https://hydrogeneurope.eu/project/chic>, 2010.
- [32] Fuel Cell Electric Buses, Towards clean public transport, <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/jive-2>.
- [33] NREL, «Fuel Cell Electric Bus Evaluations,» pp. <https://www.nrel.gov/hydrogen/fuel-cell-bus-evaluation.html>, 2018.
- [34] US Department of Transportation study, «Highway Statistics 2015,» 2015.
- [35] N. Pocard, «Fuel Cell Trucks: Solution to Heavy Duty Transport Emissions?,» pp. <https://blog.ballard.com/fuel-cell-truck>, 2018.
- [36] US Department of energy , «Early Markets: Fuel Cells for Material Handling Equipment,» p. https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/early_markets_mhe_fact_sheet.pdf.
- [37] Parlamento Europeo, Emisiones de CO2 de los coches: hechos y cifras, <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>, 2019.
- [38] Ballard, «Hydrogen Powered Trains: The Next Generation of Shunters?,» pp. <https://blog.ballard.com/hydrogen-powered-trains>, 2018.
- [39] Instituto marítimo español, Emisiones de CO2 en el transporte marítimo, 2018.
- [40] Bristol City Council, Hydrogenesis Passenger Ferry, <https://www.ship-technology.com/projects/hydrogenesis-passenger-ferry/>.

- [41] A. I. C. Romero, «Pilas de Combustible en el sector aeronautico,» p.
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60211/fichero/Pfc+Ana+Isabel+Castro+Romero.pdf>, 2014.
- [42] METI, Basic Hydrogen Strategy, https://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003a.pdf.
- [43] Federal Ministry Republic of Austria, «The Hydrogen Initiative,» pp.
<https://www.bmnt.gv.at/dam/jcr:a535d30b-5e41-4e51-9878-ec29d92a5c1d/The%20Hydrogen%20Initiative.pdf%20>, 2018.
- [44] Hydrogen Council, <https://hydrogencouncil.com/en/>.
- [45] Sitio web oficial de la Oficina Medioambiental del Gobierno Metropolitano de Tokio,
<https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/en/index.html>.
- [46] Ministerial Council on Renewable Energy, Hydrogen and Related Issues, «Basic Hydrogen Strategy,» p.
http://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003b.pdf, December 2017.
- [47] Initiative, Metro Government Undertakes Pioneering, «Tokyo Aims to Realize “Hydrogen Society” by 2020,»
p. https://www.japan.go.jp/tomodachi/2016/spring2016/tokyo_realize_hydrogen_by_2020.html, 2016.
- [48] D. Matsuda, Japan’s vision to realize a “Hydrogen-Based Society”, DLA PIPER, 2019.
- [49] Energy, Federal Ministry for Economics Affairs and, «Fuel cells and hydrogen - Present situation in energy terms,» *ARTICLE - Energy Research*, pp. <https://www.bmw.de/Redaktion/EN/Artikel/Energy/research-priorities-fuel-cells-and-hydrogen.html>, 2018.
- [50] ALSTOM, <https://www.alstom.com/es/press-releases-news/2018/9/estreno-mundial-los-trenes-de-hidrogeno-de-alstom-empiezan-prestar>.
- [51] California Air Resources Board, Zero Emission Vehicle Program, <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/zero-emission-vehicle-program/about>.
- [52] Energy Independence Now, Renewable Hydrogen Roadmap, 2018.
- [53] DIGEST, LEGISLATIVE COUNSEL'S, «Assembly Bill No. 8 - CHAPTER 401,» p.
http://leginfo.legislature.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill_id=201320140AB8, 2013.
- [54] Governor’s Office of Planning and Research, Zero-Emission Vehicles - Executive Order B-48-18,
<http://opr.ca.gov/planning/transportation/zev.html>, 2018.
- [55] M. d. J. y. d. humanos, Sistema Argentino de Información Jurídica, <http://www.saij.gob.ar/home>, 2019.
- [56] Poder Legislativo Nacional, «Ley 26.123,» pp. <http://argentinambiental.com/legislacion/nacional/ley-26123-energia-hidrogeno/>.
- [57] HDCN, HIDROGENO - LEY 26123 -. MODIFICACIONES, PARA FAVORECER EL DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD.,
<https://www.hcdn.gob.ar/proyectos/proyecto.jsp?exp=1769-D-2019>.
- [58] Hychico, Planta de Hidrogeno, <http://www.hychico.com/esp/planta-hidrogeno.html>.
- [59] International Energy Agency - IEA, Hydrogen, a key part of a clean and secure energy future,
<https://www.iea.org/topics/hydrogen/production/>, 2019.
- [60] D. Margulis, Factor de carga en los parques eólicos argentinos, Buenos Aires, Argentina: Economía de la energía, 2016.
- [61] Secretaría de Energía, Energías renovables, 2019.

- [62] S. d. E. R. y. E. Energética, ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA, Buenos Aires, 2019.
- [63] J. C. Bolcich, Hidrogeno y energias renovables: antecedentes y perspectivas en Argentina, Asociacion Argentina del Hidrogeno.
- [64] M. D. D. D. F. Francesco Calise, Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies, Academic Press, 2019.
- [65] A. A. P. V. S. A. S. C. R. R. E. M. D. Maximiliano Fernando Medina, Análisis de la producción central y la entrega de hidrógeno, aplicado al Circuito Patagónico Austral, 2010.
- [66] J. Llorca, «El hidrógeno y nuestro futuro energetico,» 2010.
- [67] B. e. al, PRODUCCIÓN BIOLÓGICA DE HIDRÓGENO: UNA APROXIMACIÓN AL ESTADO DEL ARTE, Colombia, 2007.