



OBS Business
School

¿Por qué hidrógeno y por qué ahora?

Análisis de la coyuntura de la
industria del hidrógeno y su
futuro.

Marcos Rupérez Cerqueda

Colaborador de OBS Business School y consultor de
proyectos de ingeniería relacionados con el hidrógeno.

Octubre, 2022

Partner Académico:



UNIVERSITAT DE
BARCELONA



OBSbusiness.school

Autor

➤ **Marcos Rupérez Cerqueda**
Colaborador de
OBS Business School



Marcos Rupérez Cerqueda es Colaborador de OBS Business School es **Ingeniero Industrial por la universidad de Zaragoza, máster en hidrógeno y pilas de combustible en la universidad de Aalborg (Dinamarca) y MBA del instituto de empresa (IE Business School Madrid)** con especialidad en finanzas corporativas.

Comenzó su carrera profesional como ingeniero responsable de proyectos en **hidrógeno y energías renovables dentro del centro tecnológico Fundación Hidrógeno Aragón**. Entre otros fue responsable de diseño y construcción, del sistema de hidrógeno y de tracción eléctrica del primer velero 100% renovable en dar la vuelta al mundo navegado en la regata Vendee Globe. En 2014 junto a otros socios fundo la empresa Quionne, empresa de ingeniería en la que realizó proyectos de hidrógeno, movilidad eléctrica y piezas de fibra de carbono. El equipo de ingeniería de Quionne **fue el responsable de ingeniería eléctrica del primer coche eléctrico en participar en el rally Dakar en el año 2015**, coche que fue originariamente diseñado como un vehículo de hidrógeno a pila de combustible. En **2019 fundó junto a otros socios EWM soluciones (Energy and Waste Management)** para aportar soluciones de ingeniería innovadoras al sector de los residuos, desde la perspectiva energética.

Actualmente se dedica a la consultoría y ejecución de proyectos de ingeniería relacionados con el hidrógeno como vector energético. Asesora a empresas en sus inversiones y proyectos, así como a centros tecnológicos en base a su experiencia en integración de pilas de combustible, movilidad con hidrógeno, diseños de piping, dimensionamiento y planificación de proyectos complejos industriales, gestión de residuos y valorización energética de residuos.

www.marcosruperez.com 



Índice

Capítulo 1	Introducción a los retos ¿Por que hidrógenoy por qué ahora? _____	5
Capítulo 2	Características relevantes del gas hidrógeno _____	11
Capítulo 3	La industria actual y su consumo _____	15
3.1.	Refinerías _____	17
3.2.	Amoniac para fertilizantes _____	18
3.3.	Metanol _____	20
3.4.	Usos metalúrgicos (DRI) y otros usos _____	21
Capítulo 4	¿Cómo se produce el hidrógeno hoy en día? _____	23
Capítulo 5	¿Cómo se produce hidrógeno sin emitir CO ₂ ? _____	25
Capítulo 6	La industria que viene ¿qué problemas postula solucionar? _____	29
6.1.	Movilidad y transporte _____	31
6.2.	Calor de alta temperatura _____	33
6.3.	Transporte de energía (mezcla con gas natural, blending) _____	35
6.4.	Almacenamiento y generación de electricidad (peaking) _____	36
Capítulo 7	Los colores del hidrógeno, certificaicón y garantías de origen _____	37
Capítulo 8	El plan mundial _____	39
8.1.	Proyectos actuales y futuros _____	44
Capítulo 9	Conclusiones _____	45
Referencias bibliográficas	_____	49



Capítulo 1

Introducción a los retos ¿Por qué hidrógeno y por qué ahora?

- ⊗ Para aproximarnos al porqué del reciente interés y aparente surgimiento de un sub-sector energético relacionado con el gas hidrógeno en nuestra sociedad, debemos aproximarnos a los problemas actuales del sector energético y de la sociedad desde una perspectiva no habitual, o al menos más compleja de la que los medios de comunicación de masas muestran habitualmente. Es por ello que en las primeras líneas de este informe se va a realizar una revisión del sector energético mundial aportando la perspectiva y visión que nos conducirá a la necesidad del hidrógeno como un actor con ciertas funciones dentro del complejo e interconectado sector energético hacia el que caminamos como sociedad.

Todos los días recibimos ingentes cantidades de información que nos hablan sobre el cambio climático, el efecto invernadero y que la solución es una transición hacia una supuesta sociedad futura, donde no se emitan gases de efecto invernadero a la atmosfera.” La transición energética” llaman a este proceso de cambio de una civilización que emite CO₂ a una que no lo emite. Tal es la aparente convicción de los gobernantes en que se lleve a cabo esta transición, que recientemente 195 países firmaron el acuerdo de París, donde se comprometieron a frenar las emisiones de manera que se limite el calentamiento global no más de 2 °C respecto a la época preindustrial [1].

La mayor parte de la población asocia a ese proceso la sustitución de las fuentes de energía fósiles tradicionales (chimeneas emitiendo humo de fósiles) por paneles solares fotovoltaicos, generadores eólicos y turbinas hidroeléctricas. Lo cual implicaría únicamente un cambio de centrales eléctricas de energía primaria fósil por fuentes eléctricas no emisoras de CO₂ a la atmosfera, sin embargo, esa es solo una pequeña parte de la transición necesaria, la realidad es muchísimo más compleja que sustituir unas fuentes de energía eléctrica por otras.

Habitualmente se asocian las energías renovables a energías renovables eléctricas como fotovoltaica, eólica e hidroeléctrica, y sin embargo existen muchas otras fuentes de energía renovable como la biomasa, biocombustibles, residuos (Waste to power) no eléctricas que complican la ecuación. Además, se suele cometer el error de considerar la hidroeléctrica como energía renovable cuando solo lo es cuando esta es de reducido tamaño, ya que los grandes pantanos tienen una vida útil limitada al colmatarse. Y por otro lado también se suele cometer el error de excluir de las fuentes no emisoras de CO₂ a la nuclear, que no siendo renovable si es de bajas emisiones de CO₂.

Pero uno de los mayores malentendidos en esta transición es confundir energía primaria con energía eléctrica y de ahí nace la simplificación de que instalar fotovoltaica y eólica puede solucionar el problema aportando electricidad a la red sin emitir CO₂.

Para resolver este error de concepto hay que entender que la energía primaria de una sociedad es toda la energía que consume una sociedad, independientemente de su origen, y que la transición energética se postula como el proceso que acabará con las emisiones de CO₂ en todos los sectores, no solo en el eléctrico.

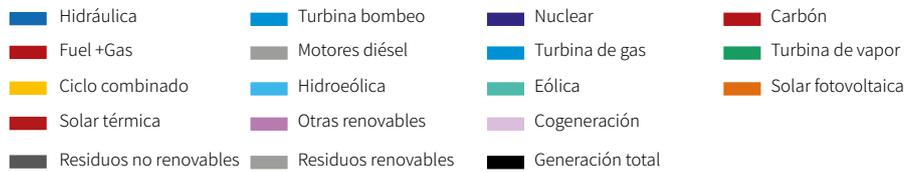
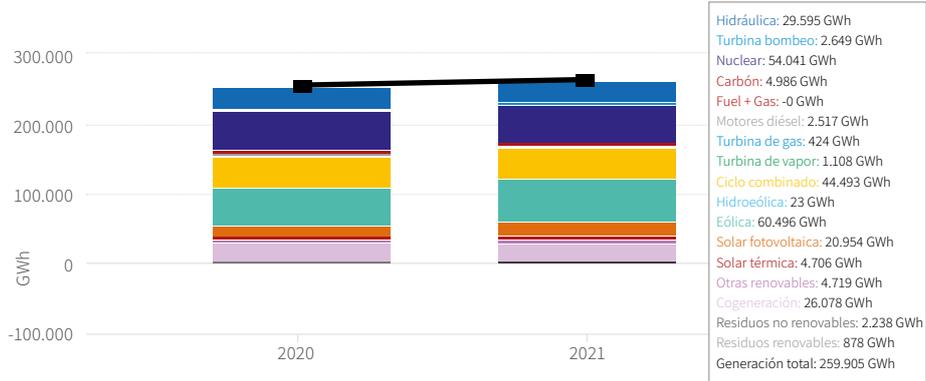
Si vamos a los datos, nos damos cuenta de que un país como España, consumió en el año 2020, 110.847 Ktep (Kilo Toneladas Equivalentes de Petróleo) o lo que es lo mismo 1290 TWh (Teravatios Hora) de energía primaria [2]. Y en ese mismo periodo se consumieron 251 TWh de energía eléctrica [3], lo cual implica que solo el 20 % de la energía que consume España es eléctrica. Si repetimos el proceso para otros países desarrollados el resultado es siempre similar y nos revela una cruda realidad: ¡El 80% de la energía que consumimos no es eléctrica! Y por tanto una transición energética simplificada a un mero cambio de fuentes de generación eléctrica fósiles por fotovoltaica y eólica, en el mejor de los casos lograría una red eléctrica 100% renovable, pero seguiríamos con un 80% de energía primaria no renovable y emisora de CO₂, es decir, logrando semejante azaña, aun así, no estaríamos ni a una cuarta parte del objetivo final.

Además, ni siquiera es posible una red eléctrica 100% renovable únicamente insertando nuevas fuentes renovables ya que estas fuentes son intermitentes; es decir que si no hace sol o no hace viento no producen, no son controlables y no siempre predecibles. Es por eso que para lograr dicha red eléctrica no emisora de CO₂ además de las fuentes de energía, hacen falta sistemas de gestión y almacenamiento de la energía que acoplen la oferta eléctrica con la demanda, los cuales aún están por implementar.

Gráfico 2

ESTRUCTURA DE LA GENERACIÓN POR TECNOLOGÍAS (GWh) SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

Fuente: Ref. [4] ~ Bibliografía.



Estados de los datos

□ Datos definitivos*: hasta el 31/05/21

■ Datos provisionales: hasta el 31/12/21

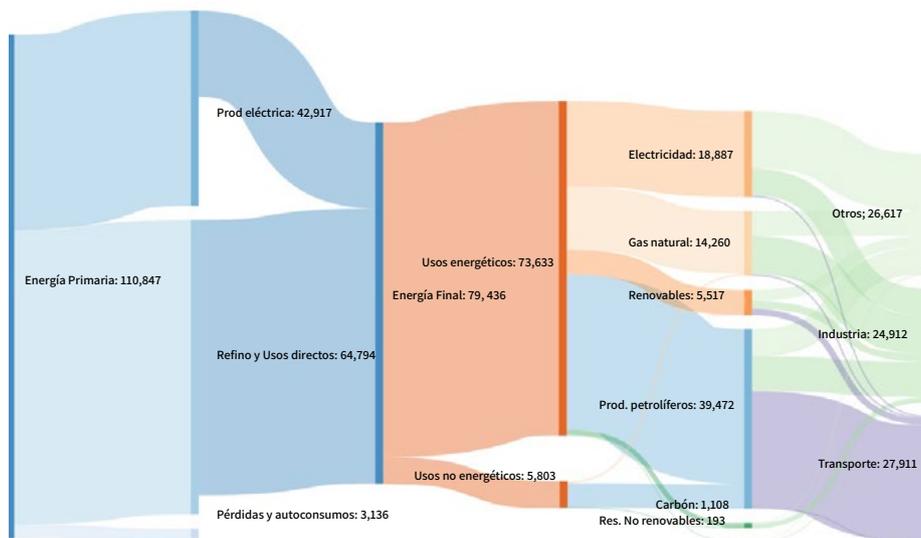
*Nota: las fechas sin subrayado presentan datos definitivos.

Y nos preguntamos entonces, ¿En que se consume ese 80% de energía primaria que no es eléctrica? Pues si atendemos a los datos de España [5], veremos que 2/3 de la energía primaria se consume en industria y transporte. Y de esos usos la totalidad del transporte y al menos 2/3 de la industria no son consumos eléctricos sino fósiles directos, principalmente petróleo, gas natural y algo de carbón.

Gráfico 3

ORÍGENES Y USOS FINALES DE LA ENERGÍA EN ESPAÑA 2020 EN KTEP (KILOTONELADAS EQUIVALENTES DE PETRÓLEO)

Fuente: Ref. [5] ~ Bibliografía.



Por último y no menos importante cabe recordar que además del cambio climático actualmente en Europa y en el mundo existe una carestía de combustibles fósiles que nos fuerza en la misma dirección, buscar formas alternativas de proveer nuestra sociedad o adaptarnos a la carestía. Todos los caminos llevan a Roma, la carestía de fósiles no deja de ser otro motivo más para la transición que se suma al cambio climático.

Un último dato que se extrae del Gráfico 3, es que además hay un porcentaje relevante de combustibles fósiles que se utilizan para usos no considerados energéticos, por lo que esta transición abarca sectores industriales y de transporte más allá de la energía, los combustibles fósiles como materia prima en sí.

Después de esta pequeña revisión a la transición energética, el lector habrá observado que el reto es muy superior al habitualmente imaginado y sobre todo mucho más complejo. Uno de los principales retos es lograr descarbonizar ese 80% de consumos primarios de energía fósil no eléctrica actualmente, partiendo de las energías renovables más prometedoras que son en su mayoría eléctricas (solar y eólica principalmente). Y es aquí donde vamos a hilar el discurso con otro concepto archiconocido, la electrificación de la economía.





¿Qué es la electrificación de la economía?

Pues precisamente es el proceso por el cual ese 80% de consumos primarios no eléctricos se convierten en consumidores de energía eléctrica para así optar a ser generados por fuentes de energía renovables no emisoras de CO₂. Como veis la electrificación de la economía no es solo cambiar coches de combustión por eléctricos, de nuevo en la comunicación global se simplifica en exceso el concepto dando apariencia de un reto y una complejidad menor. De hecho, implementar coches de hidrógeno verde, proveniente de electrólisis, también es una forma de electrificar la economía, ya que es una medida con la que se logra que energía eléctrica sustituya a consumo fósil primario no eléctrico. Por lo que electrificar la economía implica una ingente variedad de tecnologías y sectores que se quiere lograr que dejen de consumir fósiles para consumir electricidad. Y posteriormente garantizar que esa electricidad sea de origen renovable o al menos no emisora de CO₂.

La amplitud del concepto “electrificar la economía” es tal que abarca el 80% de toda la energía que consume la sociedad. Y abarca todo tipo de sectores y procesos, desde el transporte de todo tipo (30% de consumo primario) hasta generación de calor para industria o para viviendas, pasando por procesos químicos de reducción de mineral de acero o generación de fertilizantes. Y es exactamente en este punto en esta electrificación de la economía donde el hidrógeno y sus tecnologías están postulando para ser un actor relevante que aporte soluciones.

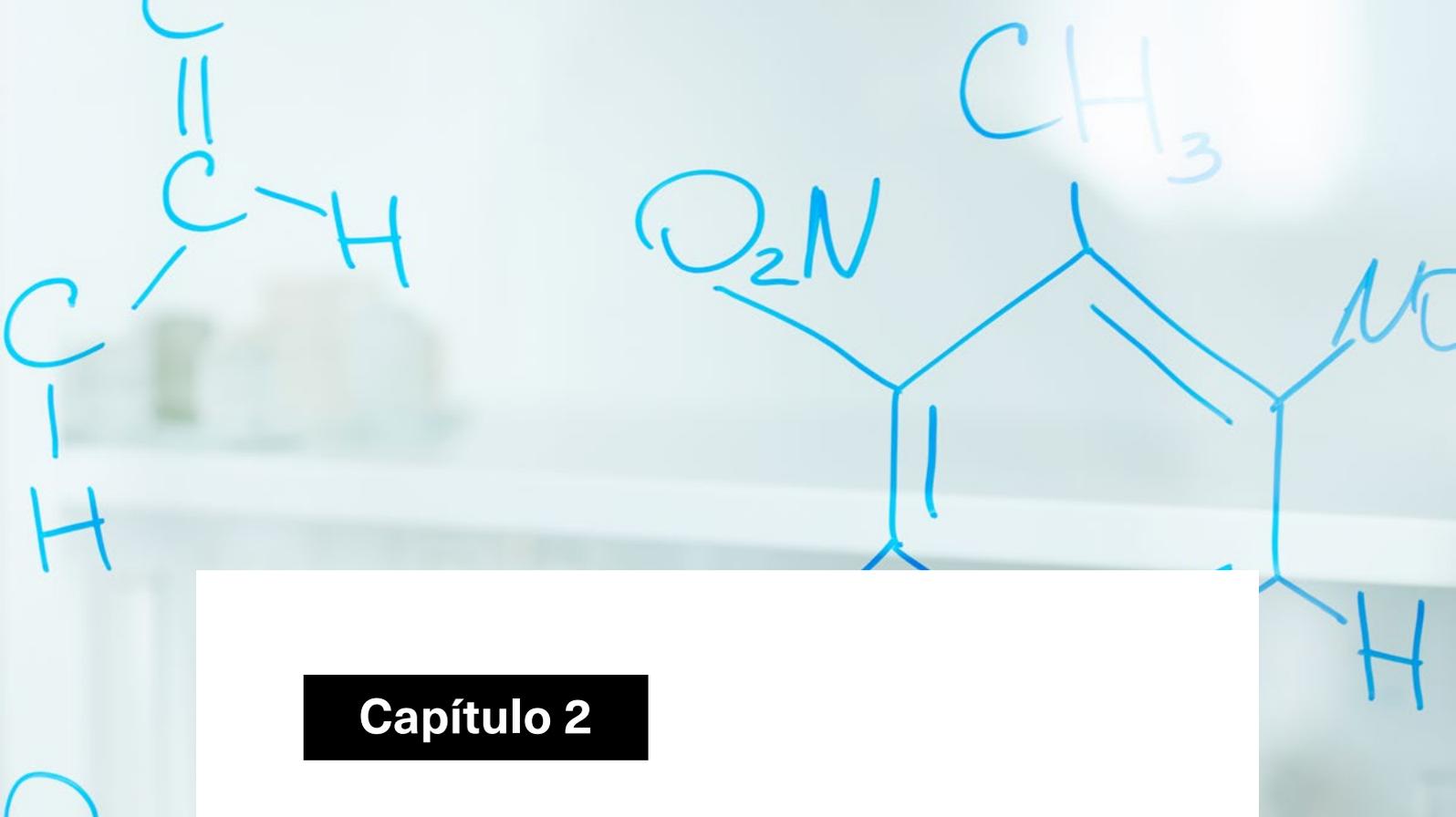
El hidrógeno es un gas que puede ser producido mediante electrólisis del agua, que es un proceso por el cual se descompone la molécula de agua (H₂O) en sus componentes básicos, Oxígeno (O₂) e Hidrógeno (H₂) mediante el aporte de energía eléctrica. Este proceso se lleva a cabo en un electrolizador, que es el equipo central y vertebrador de la economía del hidrógeno, ya que logra transformar energía eléctrica en un gas combustible, similar a los fósiles, que almacena energía para su uso. Dicho de otra forma, el hidrógeno promete un combustible gaseoso que se puede almacenar y transportar como los fósiles pero que se puede generar con energía eléctrica y por tanto con renovables eléctricas. Y por tanto se postula como un candidato para electrificar muchos sectores de la economía, que sean difíciles de electrificar por otras vías. Se dice que se usa el hidrógeno como vector energético cuando se utiliza como una forma de transporte almacenamiento y uso de la energía. No es posible utilizarlo como una fuente primaria de energía ya que el hidrógeno casi no se encuentra de forma natural en la corteza terrestre, ha de ser generado a propósito.

Hay que entender que el hidrógeno es un gas combustible, el único combustible que solo emite agua en su quemado, pero que puede ser utilizado para las mismas funcionalidades exactas que cualquier otro gas combustible (Gas natural, Butano...) y para muchas otras. Lo cual no quiere decir que sea la opción ideal para todas ellas, ya que, como veremos, en muchas ocasiones el uso directo de energía eléctrica en una aplicación puede ser más conveniente, o incluso el uso directo de energía primaria renovable. Un ejemplo donde el hidrógeno es aplicable pero difícilmente se impondrá es la calefacción de viviendas, que actualmente en Europa suelen ser con caldera a gas natural, que podría ser sustituido por hidrógeno electrolítico usando una caldera similar, pero en este proceso de electrificación, compite con la tecnología de bomba de calor (Aerotermia o geotermia) que es entre 3 y 5 veces más eficiente que cualquier caldera, y en el caso del hidrógeno ambos parten de un origen eléctrico por lo que las opciones de energía primaria son equivalentes. Un ejemplo de uso directo de energía primaria renovable sería el calentamiento solar de agua caliente sanitaria en viviendas mediante paneles solares térmicos, el cual tiene eficiencias del 80% respecto a irradiación solar, difícilmente igualables por ninguna otra tecnología, y difícilmente por el hidrógeno.

Por tanto, se debe entender que actualmente estamos en los inicios de una transición y se desconoce cuál va a ser el uso final de cada tecnología de electrificación. Y que actualmente el hidrógeno junto con otras tecnologías está postulando para electrificar muchos usos finales, pero solo el tiempo y la experiencia dirá en que usos el hidrógeno cumple la función de electrificar mejor que otras tecnologías electrificadoras disponibles. Como ya se ha expuesto para algunas aplicaciones ya existe solución testada de electrificación al margen del hidrógeno, pero para otras muchas no, y es en muchas de ellas donde el hidrógeno postula como posible solución. En el capítulo de este informe titulado **"La industria que viene ¿qué problemas postula solucionar?"** discutiremos en que usos se intuye que el hidrógeno podría ser la tecnología más adecuada para la electrificación y cuáles son las tecnologías en competencia. Y en base a ello analizaremos los sectores económicos que podrían crearse en torno al hidrógeno en el medio plazo.

Por último, en esta introducción, cabe remarcar que hay consumos actualmente fósiles no eléctricos que son especialmente sensibles al hidrógeno, y son justo aquellos en los que a día de hoy ya utilizan hidrógeno producido por combustibles fósiles en sus procesos. Son procesos que requieren de hidrógeno específicamente como componente químico para funcionar y que actualmente lo obtienen principalmente de la transformación de gas natural. Esos procesos, aunque habitualmente desconocidos, son altamente intensivos en gas natural y van a ser el primer gran aporte del hidrógeno verde a la transición. Este proceso se tratará de des-carbonizar los consumos actuales de hidrógeno convirtiéndolos de procesos emisores de CO₂ a procesos no emisores. De estos usos finales hablaremos en el capítulo **"La industria actual y su consumo"**. Y de como el grueso de los planes mundiales del hidrógeno abordan esta cuestión prioritariamente hablaremos en el capítulo **"El plan mundial"**.

Después de poner en contexto el porqué del hidrógeno como vector energético y su utilidad en la transición energética, ahora sí, comenzamos a hablar de hidrógeno.



Capítulo 2

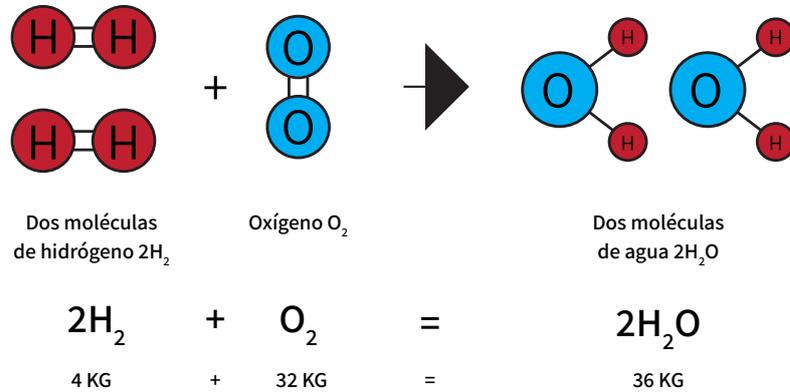
Características relevantes del gas hidrógeno

- ⊙ Dado que toda la economía del hidrógeno se basa en un único gas, tan simple que únicamente está compuesto de dos átomos de hidrógeno (H_2), merece la pena comenzar con las presentaciones y conocer algo sobre sus propiedades más relevantes que pongan en contexto sus condicionantes y riesgos.

Para empezar, expondremos la propiedad que nos ha llevado a este informe y es su capacidad de ser obtenido por rotura de una molécula de agua en sus componentes básicos mediante electricidad (electrólisis). De esta reacción conviene saber que es reversible, es decir que se puede realizar a la inversa y juntar oxígeno e hidrógeno para generar agua extrayendo la energía que contiene. En términos generales se puede asumir que la energía que libera en su combustión y por tanto la que contiene el gas son 33,33 kWh/kg (el diésel tiene 11,94 kWh/kg [6]) pero dada la ineficiencia de los procesos de electrólisis necesitaremos del orden de 50 kWh/kg de energía para generarlo a partir de agua (eficiencia electrólisis sobre PCI, 66%, PCI= Poder Calorífico Inferior= ``Energía que contiene el gas``). Por lo que, en términos generales, y con la tecnología actual, utilizaremos aproximadamente 50 kWh eléctricos y 12 litros de agua para generar 1kg de hidrógeno que contiene 33,33 kWh de energía, el cual a presión atmosférica ocuparía 11,23 m³, ò 350 litros a los habituales 30 bar de presión de producción de los electrolizadores. Y además obtendremos 8 kilogramos de oxígeno que podrán ser valorizados también.

Gráfico 4 →**REACCIÓN DE COMBUSTION DE HIDRÓGENO**

Fuente: Ref. [7] ~ Bibliografía.


Quemar 1 kg de H_2 genera 9 Kg de agua

El parámetro de densidad es otro de los más relevantes para su uso como vector ya que en su estado gas es extremadamente baja, es el gas más ligero del universo solo pesa 0.089 kg/m^3 a 25°C y 1 atm . Lo cual implica que, si bien su energía disponible por unidad de masa, es muy superior a la de otros combustibles, su baja densidad (Kg/m^3) hace que a presión y temperatura atmosféricas su energía almacenada por unidad de volumen sea muy baja (kWh/m^3). Dicho de otra forma, 1kg de H_2 tiene muchísima energía, pero lograr confinarlo implica energía y tecnología, si no queremos que ocupe enormes volúmenes. Por contraste para confinar un litro de gasolina sirve un simple recipiente de plástico y además su volumen final será muy inferior.

En términos prácticos, un depósito de un vehículo que confine un kilogramo de hidrógeno a 700 bar (medida de presión, kg/cm^2) ocuparía aproximadamente 20 litros de volumen, y almacenar la misma energía en forma de gasoil ocuparía unos 3 litros de volumen y en gas natural 6 litros, asumiendo igualdad de presión. Ese depósito de hidrógeno pesaría no menos de 15 kg mientras que los 3 litros de gasoil pesarían $2,55 \text{ kg}$ y podrían ser almacenados en un simple recipiente de plástico, en el caso del gas natural el peso del depósito sería similar.

Si quisiéramos licuarlo para disminuir su volumen su punto de licuefacción es extremadamente bajo, hay que someterlo a temperaturas inferiores a los -252°C (solo 20 grados Kelvin por encima del cero absoluto) y no es posible licuarlo por incremento de presión como ocurre en el butano u otros gases dentro de los depósitos. Aun licuado su energía por litro es de 2.4 kWh/litro , aproximadamente 4 veces inferior a la del diésel.

Todos estos factores hacen que el almacenamiento de hidrógeno deba ser en muchos casos a presiones altas, especialmente si la aplicación está limitada en volumen como es el caso de los vehículos, donde las presiones de almacenamiento alcanzan hasta 700 kg/cm² (bar) o en forma de líquido criogénico asumiendo un ingente gasto de energía en el proceso, dada la baja temperatura. Y aun así en todos los casos la energía que almacena por unidad de volumen es siempre inferior a la de los combustibles fósiles convencionales. En caso de no existir restricciones de espacio se puede almacenar a presiones muy inferiores en tanques de grandes dimensiones, ahorrando energía de compresión.

Gráfico 5 →

DATOS TÉCNICOS RELEVANTES DEL HIDRÓGENO

Fuente: Elaboración propia

DATOS TÉCNICOS RELEVANTES DEL HIDRÓGENO			
Propiedades Físicas	Densidad gas (20°, 1atm)	0.0899	kg/Nm ³
	Densidad líquido (-293°C)	0.0708	kg/L
	Punto de ebullición	20.28	kelvin
	Punto de fusión	14.02	Kelvin
Densidad energética	MJ	PCS (másico)	141.86 Mj/Kg
		PCI (Másico)	120 Mj/kg
		PCI Gas	10.8 MJ/Nm ³
		PCI Líquido	8.5 MJ/l
	KWh	PCS (másico)	39.4 kWh/Kg
		PCI (másico)	33.3 kWh/kg
		PCI Gas (20°, 1 atm)	3.0 kWh/Nm ³
		PCI Líquido (-293°C)	2.4 kWh/l
Combustión y explosión	Límites de explosión	4 - 75	% H ₂ en el aire
	Límites de detonación	18,3 - 59	% H ₂ en el aire
	Temp. combustión espontánea	585	° Celsius
Termodinámica y difusión	Cp	14.3	J/(kgK)
	Cv	10.1	J/(kgK)
	Coefficiente de difusión	0.6	cm ² /s
<p>Incoloro, inodoro e insípido No es tóxico, ni contaminante, ni corrosivo, ni cancerígeno, ni radiactivo No es explosivo, ni tiene auto ignición, ni se descompone Es más ligero que el aire y se diluye rápidamente hacia arriba Tiene una llama prácticamente invisible</p>			

A nivel energético se puede concluir que se trata de un combustible gaseoso de menor densidad de energía que los fósiles, lo cual aparentemente lo haría ser una peor opción en términos de eficiencia logística, espacio y peso. Pero como ya hemos expuesto, la transición energética trata de sustituir a los fósiles, por lo que las malas noticias son que el hidrógeno almacena menos energía en el mismo volumen que un combustible fósil, la buena es que almacena muchísimo más que cualquier otra opción de electrificación posible. Por ejemplo, las baterías de litio, los almacenamientos por excelencia de energías renovables, necesitan 5 kg para almacenar 1 kWh, donde el hidrógeno solo necesita 0.03 kg. Y ese mismo kWh si lo almacenamos en hidrógeno a 700 bar se requieren 0,5 litros de volumen interno y una batería ocuparía 2,2 litros de espacio [8].

Mirando las propiedades del gas desde otra perspectiva, atendiendo a sus características relacionadas con la seguridad es necesario aclarar, que, si bien es un gas con más tendencia a la inflamación que otros ya que su rango de explosividad es muy amplio y su energía de activación baja, también es un gas muy ligero y de molécula pequeña se difunde rápido en el aire y se eleva. Por lo que se podría decir que si sucede la combustión es más grave que en otros combustibles, pero dada su alta difusión y ligereza es más improbable que se acumule en grandes cantidades, sobre todo en espacios abiertos [9].

Por último, cabría remarcar su capacidad de fragilizar metales, dado que es un tema de debate abierto en base a la aplicabilidad de los gaseoductos actuales de gas natural para transportar hidrógeno en el futuro (El gaseoducto midcat europeo entre otros). La problemática viene dada porque la molécula de hidrógeno es tan pequeña que se introduce entre la estructura molecular de algunos metales, fragilizándolos y causando roturas prematuras, es por eso que está en cuestión el aprovechamiento de los gaseoductos actuales de gas natural, todo parece indicar que el hidrógeno se podrá mezclar con el gas natural pero sin superar el 20% de concentración [10] si se quiere usar la red actual de gas, para concentraciones superiores o hidrógeno puro habrá que instalar canalizaciones nuevas de acero austenítico.





Capítulo 3

La industria actual y su consumo

- ② Cuando se habla de hidrógeno habitualmente se piensa en sus usos sustitutos de otros combustibles o formas de energía en sectores como la movilidad, el eléctrico o la calefacción (de esos usos futuros hablaremos en el capítulo 6), pero se suele obviar que ya existe un gran consumo de hidrógeno en la actualidad.

En el mundo se consumieron en 2020 alrededor de 90 Mt (Millones de toneladas métricas) de hidrógeno [11] lo cual supone un equivalente a 258 Mtoe (Mega toneladas equivalentes de petróleo). El consumo global de energía primaria es de 13.853 Mtoe [12], lo cual quiere decir que solo en generación de hidrógeno se emplea un 2% de toda la energía primaria consumida por los humanos sobre la tierra. Es el equivalente a 342 reactores nucleares funcionando 24/7 solo para producir hidrógeno, o el consumo energético global de 2 veces España (110 Mtoe año [13]). La industria no petrolera mundial dedica el 6% de todo su consumo energético a la fabricación de hidrógeno [11].

Todo este hidrógeno se produce partiendo de combustibles fósiles y emitiendo CO₂ en el proceso, y por tanto es el principal candidato a ser sustituido por hidrógeno producido sin emitir CO₂, anulando así unas emisiones existentes, pero de cómo se produce hablaremos más adelante en el capítulo "**¿Cómo se produce el hidrógeno hoy en día?**". En este capítulo nos vamos a centrar en cuales son los usos finales que se le da a esa gran cantidad de hidrógeno, por ser el principal mercado actual existente y que va a vivir un cambio disruptivo en su forma de generación.

Gráfico 6 →

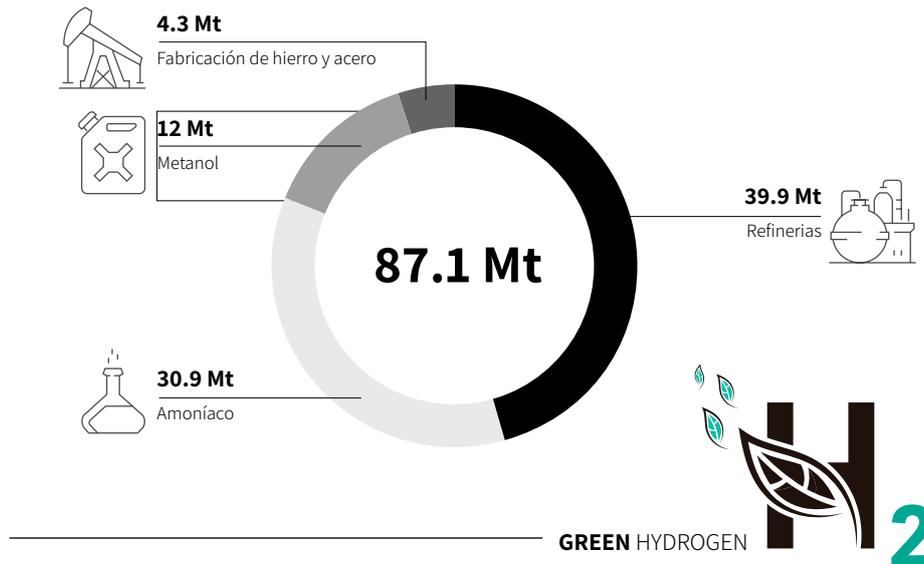
FUENTES PRIMARIAS Y USOS FINALES DEL HIDRÓGENO, SE INCLUYEN SUBPRODUCTOS CON HIDRÓGENO MEZCLADOS

Fuente: Ref. [14] ~ Bibliografía.



Gráfico 7 →

CONSUMO MUNDIAL DE HIDRÓGENO, [15]



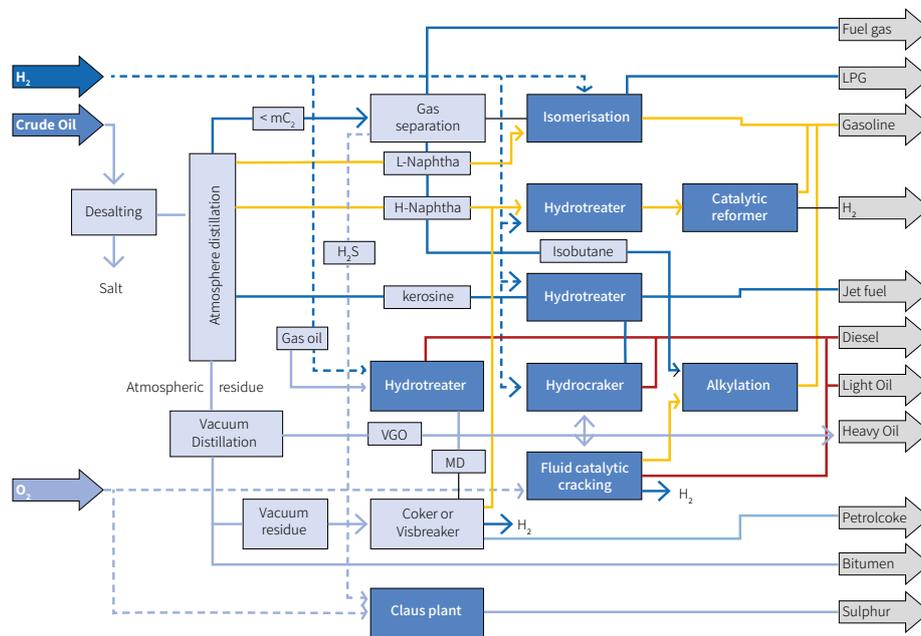
3.1. Refinerías

El uso más tradicional del hidrógeno es dentro de las propias refinerías de petróleo como gas de proceso para ser combinado con diferentes insumos hidrogenándolos (añadiendo hidrógeno a su molécula), logrando así modificar las propiedades o convertir en otros combustibles los productos petrolíferos finales. Este hidrógeno es habitualmente generado en la propia planta partiendo de gas natural o el propio crudo y recombinado con otros flujos in situ. Las refinerías de todo el mundo utilizan anualmente 40 Mt H₂, el 44% de todo el consumo mundial.

Gráfico 8 →

ESQUEMA GENÉRICO DE UNA REFINERÍA DONDE SE PUEDE OBSERVAR LOS FLUJOS E HIDRÓGENO EXISTENTES

Fuente: Ref. [16] ~ Bibliografía.



Estos usos son susceptibles de descarbonizarse en tanto y cuanto se emite CO₂ en el proceso específico de generar hidrógeno, aunque son controvertidos al potenciar la industria petrolífera, ya que el proceso completo nunca podrá ser descarbonizado por ser la fuente principal de combustibles fósiles en sí. Además, sus inversiones pueden estar en riesgo en función de la evolución hacia un mundo cero emisiones en el que los consumos de fósiles se podrían ver disminuidos. En cualquier caso, existen multitud de proyectos de petroleras sobre la descarbonización de sus flujos de hidrógeno, se muestran algunos ejemplos en el capítulo 8.1.

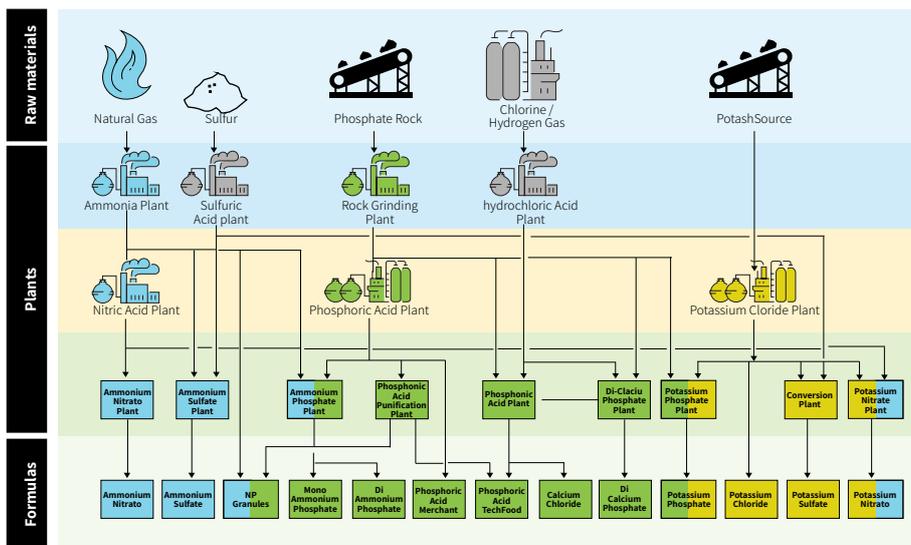
3.2. Amoniaco para fertilizantes

Los fertilizantes para agricultura se clasifican en tres grandes grupos: base potasio, fosforados y nitrogenados. Los fertilizantes nitrogenados son el grupo más numeroso e importante y para la generación de todos ellos se utiliza la molécula del amoniaco (NH_3).

Gráfico 9 →

ESTRUCTURA DE LOS FERTILIZANTES MUNDIALES, EN AZUL LOS NITROGENADOS

Fuente: Ref. [17] ~ Bibliografía.



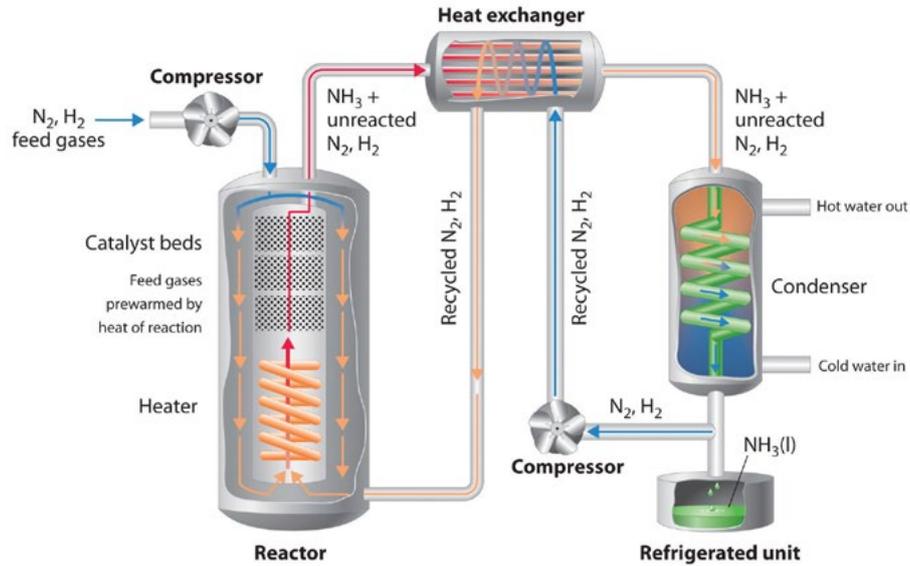
En la práctica totalidad de los casos ese amoniaco se genera sintetizando nitrógeno del aire e hidrógeno generado de combustibles fósiles, principalmente de gas natural. Al proceso de generación de amoniaco partiendo de hidrógeno se le conoce como proceso Haber-Bosch. Aproximadamente 34 Mt de hidrógeno son consumidas anualmente para generar amoniaco para fertilizantes, lo cual en 2021 represento un 37% de todo el consumo mundial de hidrógeno. Se podría decir que la sociedad actual se alimenta gracias a que el hidrógeno o el gas natural abona nuestros campos, este suele ser un hecho desconocido, pero es una de las principales razones por la que la agricultura es altamente emisora de CO_2 , por la emisión indirecta asociada a la generación de hidrógeno partiendo de gas natural para sus fertilizantes.



Gráfico 10 →

ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL PROCESO HABER BOSCH DE GENERACIÓN DE AMONIACO

Fuente: Ref. [18] ~ Bibliografía.

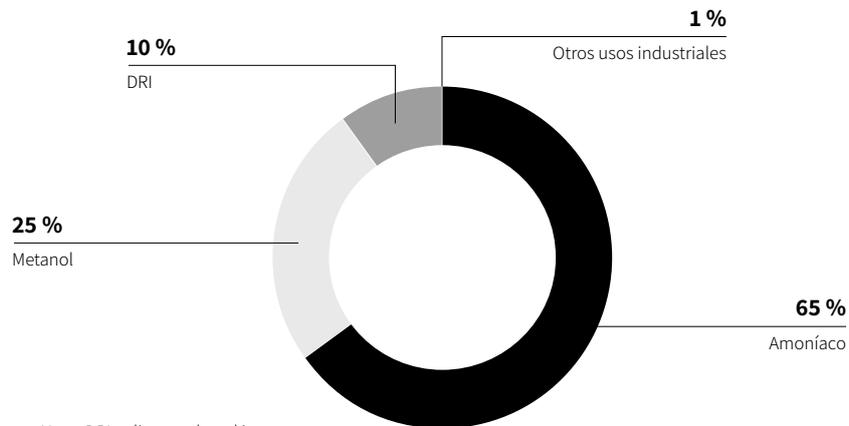


Esta industria es el principal foco de la gran masa de proyectos de hidrógeno existentes en el mundo, ya que es una necesidad que va a seguir existiendo (Alimentaria) que además es claro el camino hacia su descarbonización. Y este es dejar de utilizar gas natural para generar dicho hidrógeno y cambiar ese insumo por hidrógeno electrolítico generado por energías renovables. Como veremos en el capítulo 8.1 existen multitud de grandes proyectos de hidrógeno libre de emisiones en esta industria.

Gráfico 11 →

DEMANDA INDUSTRIAL MUNDIAL DE HIDRÓGENO 2020, EXCLUYENDO REFINERÍAS

Fuente: Ref. [11] ~ Bibliografía.

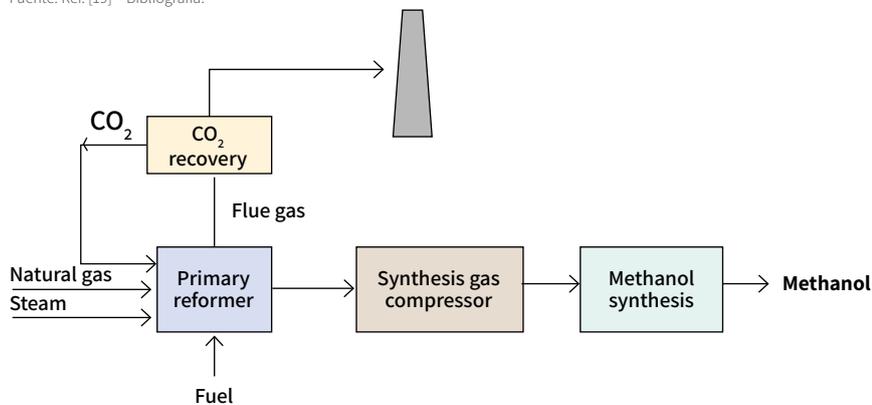


3.3. Metanol

El metanol es otro gran desconocido a nivel popular ya que al igual que el amoníaco es una molécula parte interna de muchos procesos, en este caso de la industria química. Es el bloque básico con el que se sintetizan muchos plásticos, pinturas, resinas, adhesivos... Su fórmula es CH_3OH y se sintetiza haciendo reaccionar hidrógeno con CO_2 . Actualmente tanto el CO_2 como el hidrógeno se obtienen conjuntamente del gas natural y se emite una gran parte del CO_2 sobrante en el proceso. Aproximadamente 11 Mt de hidrógeno son utilizadas anualmente en el mundo para fabricar metanol, lo cual en 2021 supuso aproximadamente un 12% de todo el consumo mundial de hidrógeno.

Gráfico 12 → PROCESO DE FABRICACIÓN DEL METANOL

Fuente: Ref. [19] ~ Bibliografía.



Existen varias formas de descarbonizar el proceso, pero una de las principales es la generación de hidrógeno electrolítico proveniente de renovables y síntesis con CO_2 proveniente de captura de una industria emisora. El inconveniente principal para este tipo de proyectos es la necesidad de una fuente de CO_2 fiable en un mundo que cada vez postula emitir menos CO_2 .

Otra vía de descarbonización es la generación de metano renovable mediante gasificación de residuos o biomasa y operar el proceso de forma similar a como se opera con gas natural.

Gráfico 13 → PROCESO DE GENERACIÓN DE METANOL RENOVABLE

Fuente: Ref. [20] ~ Bibliografía.

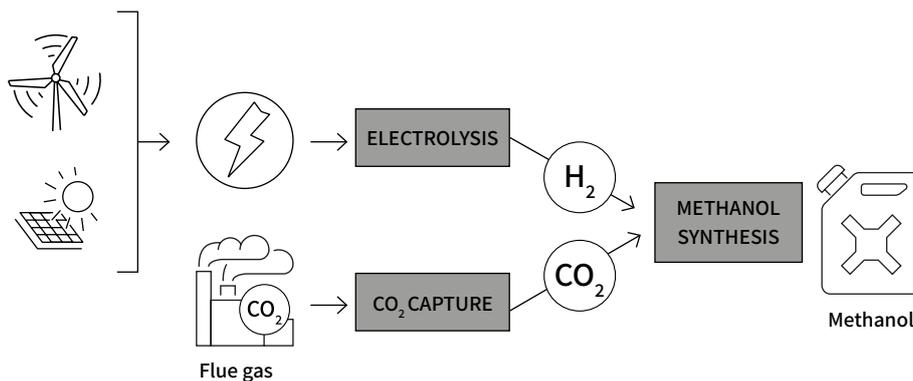
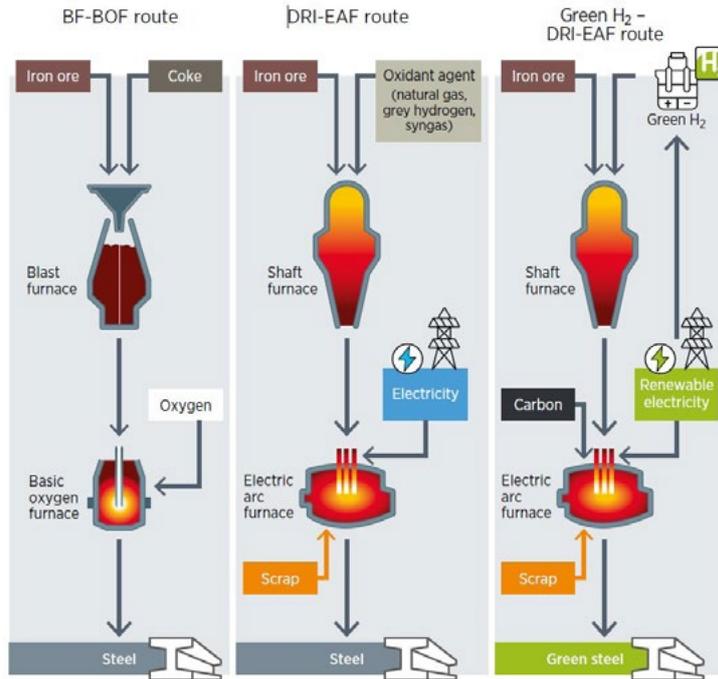


Gráfico 15 →

EVOLUCIÓN ESPERADA DE LOS PROCESOS DE REDUCCIÓN DE MINERAL DE ACERO

Fuente: Ref. [15] ~ Bibliografía.



En la actualidad existen multitud de proyectos de todas las empresas siderúrgicas del mundo sobre descarbonización de procesos de reducción directa de hierro mediante el uso de hidrógeno electrolítico proveniente de energías renovables, los veremos en el capítulo 8.1.





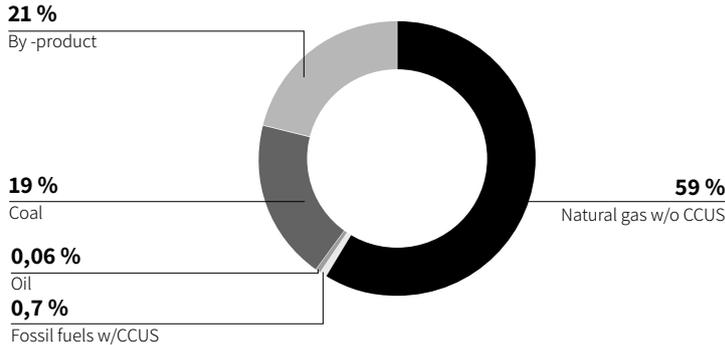
Capítulo 4

¿Como se produce el hidrógeno hoy en día?

⊙ La mayor parte del hidrógeno consumido actualmente en el mundo se genera partiendo de gas natural en un proceso que se llama reformado. El proceso consiste en hacer reaccionar vapor de agua con gas natural, de dicho proceso se obtiene hidrógeno mezclado con CO₂. El CO₂ es emitido a la atmosfera y el hidrógeno capturado y purificado para su uso. En este proceso de reformado, para generar 1 kg de hidrógeno se utilizan 3 kg de gas natural y se emiten 9 kg de CO₂. Esto implica que el 2,5% de las emisiones globales asociadas a industria fueron responsabilidad de la generación de hidrógeno, se emitieron 900 Mt de CO₂ por ese motivo en 2020 [11].

Gráfico 16 → ORÍGENES MUNDIALES DEL HIDRÓGENO EN EL AÑO 2020

Fuente: Ref. [11] ~ Bibliografía.



La otra fuente principal de generación de hidrógeno, responsable del 20% de la generación mundial es la gasificación de carbón fósil. Aunque el carbón no contiene hidrógeno en su molécula que se pueda extraer, como en el caso del gas natural, en este caso se utiliza el carbón como agente reductor que extrae el hidrógeno del agua, aportando de esta forma la energía necesaria para romper la molécula de agua de forma similar a como lo hace la electricidad en la electrólisis, pero en este caso emitiendo ingentes cantidades de CO₂.

El resto del hidrógeno producido se produce como un subproducto principalmente en refinerías como resultado de la destilación y craqueo del crudo. Como ya se ha explicado este hidrógeno es internamente utilizado en las refinerías para hidrogenar sus propios productos.

El último proceso relevante de producción de Hidrógeno es el llamado cloro álcali. Este proceso es utilizado para la generación de gas cloro mediante la electrólisis de agua con cloruro sódico (sal común). En este proceso se libera el gas cloro (el elemento buscado), pero también hidrógeno como subproducto que, o es venteadado, o almacenado y vendido o utilizado para otros usos.

La tasa de producción de hidrógeno proveniente de electrólisis por energías renovables u otras fuentes no emisoras de CO₂ a día de hoy es inferior al 0,03% de la producción mundial [11]. Pero la tendencia es a no solo convertir toda la producción actual en renovable sino aumentar la producción para cubrir el creciente mercado dados sus nuevos usos nacientes (capítulo 6). Por lo que el mercado actual de los electrolizadores y el hidrógeno renovable es una industria en explosión con tasas de crecimientos de 2 dígitos anuales (%).





Capítulo 5

**¿Como se produce
hidrógeno sin emitir CO₂?**

- ⊗ Como se mostró en el capítulo 4, la práctica totalidad del hidrógeno consumido actualmente en el mundo se genera consumiendo combustibles fósiles y emitiendo CO₂ en el proceso. No obstante, si el hidrógeno es una tecnología de actualidad es porque puede producirse sin emisiones de CO₂, tanto para sustituir la actual producción como para ser utilizado en nuevos usos, que se mostraran en el capítulo 6.

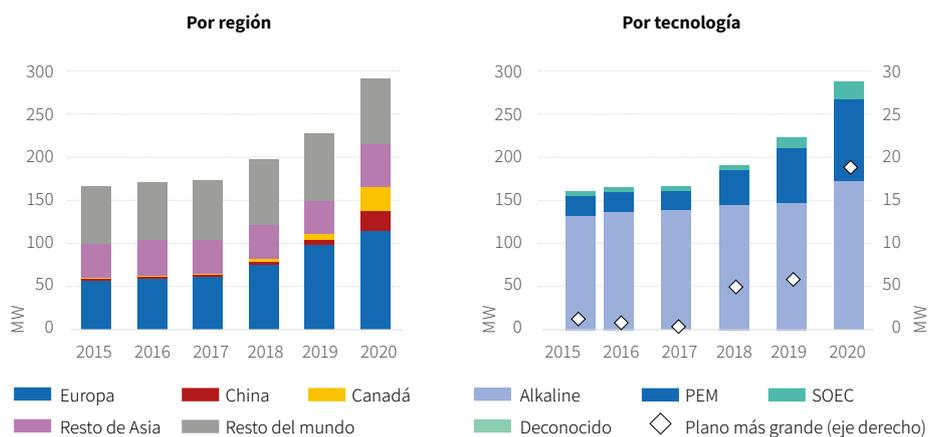
El principal método para producción de hidrógeno sin emisiones de CO₂ es la electrólisis, la cual consiste en la rotura de la molécula de agua en sus componentes básicos, hidrógeno y oxígeno. Dicha rotura es impulsada por aporte de energía eléctrica como se explicó en el capítulo 2. Las emisiones de CO₂ solo son bajas en el caso de que la electricidad utilizada en la electrólisis haya sido generada por fuentes no emisoras de CO₂. Aunque a día de hoy solo el 0,03% de la producción de hidrógeno mundial proviene de electrólisis, todos los organismos internacionales planean que esta sea la tecnología más instalada en el futuro [11].

Existen diferentes tecnologías de electrólisis en función del material del electrolito en el que se realiza la reacción. Actualmente las tecnologías más desarrolladas y las cuales están siendo instaladas en potencias superiores al Megavatio son: Alcalina y PEM (Polimer Electrolite Membrane). La diferencia constructiva entre ambas se basa en que los alcalinos realizan la reacción en un ambiente alcalino (lo contrario de ácido) y los PEM en un ambiente neutro/ácido, además los materiales de los que se construyen sus membranas y diafragmas son diferentes.

Gráfico 17 →

INSTALACIÓN MUNDIAL DE ELECTROLIZADORES POR TECNOLOGÍA Y GEOGRAFÍA

Fuente: Ref. [11] ~ Bibliografía.



La tecnología alcalina es la tecnología que históricamente ha dominado el mercado de la electrólisis dada su robustez, fiabilidad y bajo precio, no obstante, actualmente la tecnología PEM está consiguiendo su espacio en el mercado dada su simplicidad, su alta pureza de hidrógeno y menor tamaño. Habitualmente se marca como diferencia entre PEM y Alcalina que la tecnología PEM puede generar a mayores presiones, pero la realidad es que existen equipos de ambas tecnologías que producen en el rango de los 30-40 bar de presión. Sí que es una ventaja de la tecnología PEM su tiempo de respuesta y encendido. Dicho de otra forma, un electrolizador PEM se puede poner a operar de parado al 10% de carga en menos de 5 minutos y un alcalino probablemente requiere de cerca de una hora. Y del mismo modo un PEM puede cambiar su carga de trabajo del 10% al 100% en menos de 30 segundos y un alcalino probablemente requiere unos pocos minutos. Esta diferencia de velocidades de respuesta y encendido debe ser valorada en cada proyecto, la experiencia del autor del informe dice que no es un factor definitorio en los proyectos ya que habitualmente se puede prever el rango de funcionamiento del equipo con fiabilidades y tiempos de antelación superiores a los de respuesta del equipo más lento.

Gráfico 18 →

COMPARATIVA TECNOLOGÍAS DE ELECTRÓLISIS

Fuente: Ref. [22] ~ Bibliografía.

	Electrolizador alcalino			Electrolizador PEM			Electrolizador SOEC		
	Hoy	2030	Largo Plazo	Hoy	2030	Largo Plazo	Hoy	2030	Largo Plazo
Eficiencia eléctrica (% PCI)	63-70	65-71	70-80	56-60	63-68	67-74	74-81	77-84	77-90
Presión de operación (bar)	1-30			30-80			1		
Temperatura de operación (°C)	60-80			50-80			650 - 1 000		
Vida media del stack (horas de funcionamiento)	60 000	90 000	100 000	30 000	30 000	100 000	10 000	40 000	75 000
	90 000	100 000	150 000	90 000	90 000	150 000	30 000	60 000	100 000
Rango de carga (% relativo a carga nominal)	10-110			0-160			20-100		
Superficie ocupada (m ² /KW _e)	0.095			0.048					
CAPEX (\$/KW _e)	500	400	200	1 100	650	200	2 800	800	500
	1400	850	700	700	1 500	900	5 600	2 800	1 000

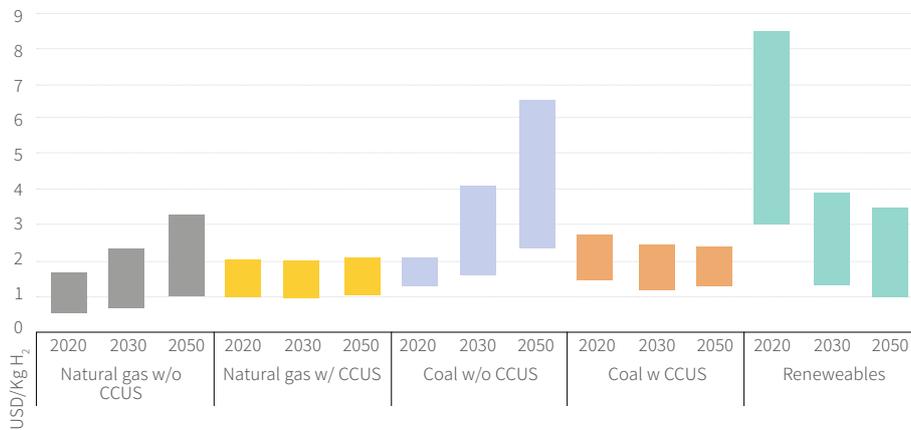
Una forma alternativa de producir hidrógeno sin emitir CO₂ es utilizar gas metano que ha sido producido por gasificación de residuos o biomasa y por tanto sin emitir CO₂ neto, y partiendo de ese gas generar hidrógeno por reformado de manera similar que con el gas natural. En este caso se producen emisiones de CO₂ en el reformado, pero se consideran compensadas con las absorbidas por las plantas en la generación de la biomasa o ahorradas de la emisión asociadas a la putrefacción del residuo.

Actualmente los costes de generar hidrógeno por electrólisis son altos, pero se espera que apliquen economías de escala al aumentar rápidamente la instalación de electrolizadores y estos bajen hasta hacer el hidrógeno no emisor de CO₂ competitivo con el proveniente de fósiles. No obstante, cabe remarcar que en Europa actualmente el precio del gas natural es tan elevado que el hidrógeno renovable ya es más barato que el no renovable en muchas ocasiones. Del mismo modo cabe remarcar que el precio del hidrógeno verde es altamente dependiente del factor externo, precio de energía renovable disponible, por lo que su mayor o menor desarrollo dependerá de este factor.

Gráfico 19 →

COSTE DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO ACTUAL Y ESTIMADA POR TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN

Fuente: Ref. [11] – Bibliografía.



IEA. All rights reserved

Notes: CCUS = carbon capture, utilisation and storage. Ranges of production cost estimates reflect regional variations in costs and renewable resource conditions.

Sources: based on data from McKinsey & Company and the Hydrogen Council; IRENA (2020); IEA GHG (2014); IEA GHG (2017); E4tech (2015); Kawasaki Heavy Industries; Element Energy (2018)





Capítulo 6

**La industria que viene
¿Qué problemas postula
solucionar?**

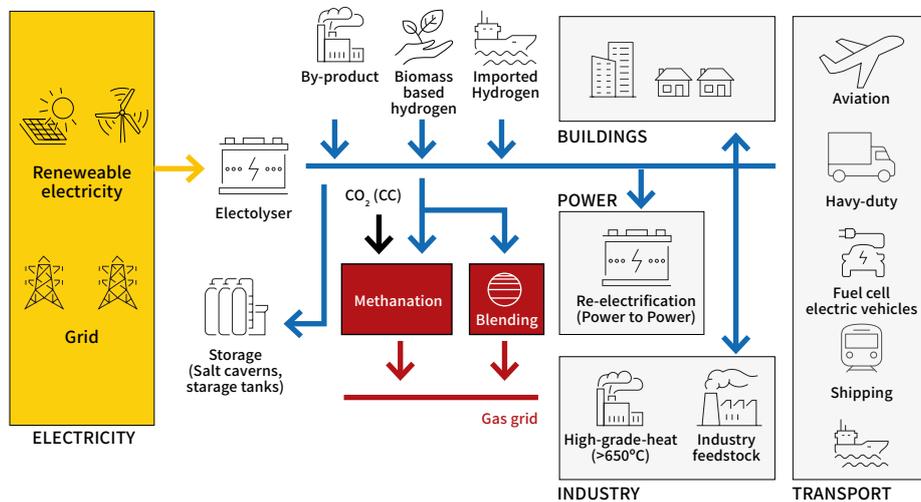
- ⊙ Como se expuso en la introducción (capítulo 1) el 80% del consumo energético mundial no es eléctrico, y a día de hoy, la práctica totalidad de esos consumos dependen directamente de combustibles fósiles. En el capítulo 3 hemos discutido sobre los consumos actuales de hidrógeno proveniente de fósiles y que por tanto son los primeros candidatos a ser transformados en consumidores de hidrógeno no emisor de CO₂. No obstante, el hidrógeno al ser un combustible gaseoso libre de CO₂ es también candidato a sustituir a los fósiles en otros usos aun no electrificados.

Cuando nos enfrentamos al reto de electrificar una necesidad energética humana, que actualmente se cubre directamente con combustibles fósiles, entran en competencia diferentes tecnologías sustitutivas. Y es entonces cuando hay que estudiar las particularidades de cada uso y dilucidar cuales podrían ser las mejores tecnologías sustitutivas candidatas para el mismo. Posteriormente se pasa a integrar esas tecnologías en experiencias piloto para confirmar con la experiencia que tecnología es la más aplicable en cada caso. En este capítulo vamos a mostrar cuáles son las ventajas del hidrógeno respecto a otras tecnologías electrificadoras y mostrar en que aplicaciones se consideran una ventaja esas características y por tanto uno de los principales candidatos. Posteriormente en el capítulo 8.1 veremos las experiencias piloto de instalación que se están haciendo en dichas utilidades.

Gráfico 20 →

ESQUEMA DE POSIBLES USOS FUTUROS DEL HIDRÓGENO EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

Fuente: Ref. [23] ~ Bibliografía.



6.1. Movilidad y transporte

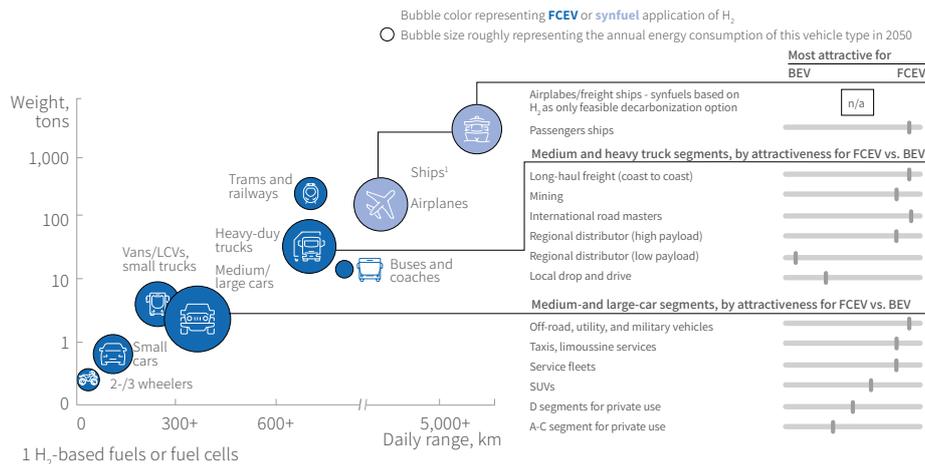
La movilidad de mercancías y personas es un sector ligado casi al 100% (exceptuando trenes) a la quema directa de combustibles fósiles en motores térmicos o turbinas. En los vehículos de menores pesos y autonomías, las baterías de litio se están imponiendo como la solución más eficiente de electrificación. No obstante, conforme el peso del vehículo aumenta y la distancia a recorrer con una sola carga también, es necesario incluir más energía embarcada a bordo y más potencia de tracción. Es ahí donde las baterías se vuelven menos viables dado su baja densidad energética (alto peso) y lentas velocidades de carga. Y es justo en esas aplicaciones donde el hidrógeno con una densidad energética muy superior (menor peso embarcado) y unos tiempos de recarga similares al diésel, se convierte en una opción más viable.

Donde está la frontera en el tamaño y autonomía máxima de vehículo que se podrá cubrir con baterías está aún por definir con la experiencia, pero probablemente no más de un camión de 40 toneladas y 600 km de autonomía. Es por eso que los camiones de transporte de mercancía a larga distancia se plantean como una de las posibles aplicaciones del hidrógeno. Dicho camión se plantea sea de hecho de tipología híbrida, en los cuales la tracción a las ruedas sea eléctrica y dicha electricidad sea generada a bordo por una pila de combustible que genere electricidad consumiendo hidrógeno. Se plantea esta tipología por ser más eficiente que la combustión de hidrógeno y debido a ese bajo consumo de hidrógeno se logran autonomías más largas y un mejor uso de la energía.

Gráfico 21 →

TECNOLOGÍA PREFERIDA DE TRANSPORTE EN FUNCIÓN DEL RANGO Y PESO

Fuente: Ref. [24] ~ Bibliografía.



Cuando el tamaño del vehículo es aún mayor y pensamos en trenes, barcos o aviones, las baterías quedan descartadas por dimensiones y peso, y el hidrógeno se presenta como una de las mejores opciones. En estos casos se plantea también el uso de biocombustibles, ya que tienen la ventaja de ser un combustible líquido similar al actual libre de emisiones netas. No obstante, los biocombustibles tienen poca capacidad de suministrar un gran consumo global sin entrar en competencia con el mercado de alimentos, por lo que muchos países los descartan como una solución masiva. Además, sus rendimientos

en uso del sol y el suelo son tan bajos que difícilmente se podrían adoptar masivamente [25].

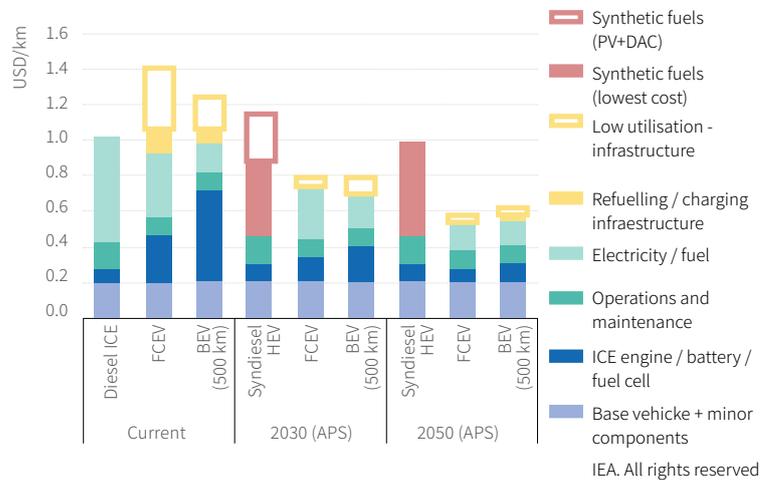
Por otro lado, el hidrógeno se puede integrar en otras moléculas líquidas y gaseosas de más fácil manejo. Por ejemplo, mezclando una fuente de CO₂ e hidrógeno se puede fabricar combustible similar al diésel, este tipo de combustibles se denominan e-fuels, por su origen eléctrico. El hidrógeno también se puede almacenar dentro de la molécula del amoníaco, un gas más fácil de gestionar, y de hecho este se plantea como uno de los principales combustibles para los futuros grandes barcos.

A mayor cantidad de transformaciones que se realicen en el vector hidrógeno menor es la eficiencia global del proceso, es por eso que los e-fuel o el amoníaco son menos eficientes que el uso directo de hidrógeno y por tanto es preferible utilizar hidrógeno directamente si la aplicación lo permite. Del mismo modo es más eficiente utilizar el hidrógeno para generar electricidad en una pila de combustible que quemarlo en un motor térmico, por lo que también las aplicaciones tenderán a utilizar pilas de combustible cuando sea posible. En aplicaciones donde el peso es primordial como los aviones no será posible utilizar pilas de combustible y se plantea que los aviones funcionen con hidrógeno líquido quemado en las turbinas de combustión, por ser la configuración de menor peso.

Gráfico 22 →

COSTE DE OPERACIÓN DE UN CAMIÓN DE ALTO TONELAJE DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS

Fuente: Ref. [11] ~ Bibliografía.



Notes: APS = Announced Pledges Scenario. ICE = internal combustion engine. FCEV = fuel cell electric vehicle. BEV = battery electric vehicle. HEV = hybrid electric vehicle. PV = photovoltaic (solar electricity for synthetic fuel production). DAC = direct air capture. Techno-economic assumptions available in the Annex.

Source: Based on input from McKinsey & Company and the Hydrogen Council.

EL sector del transporte es inmenso y existen multitud de soluciones diferentes, en los próximos años y bajo la experiencia de proyectos piloto se definirá qué aplicaciones utilizarán hidrógeno, cuáles baterías eléctricas y cuáles biocombustibles u otras tecnologías.

6.2. Calor de alta temperatura

Uno de los principales consumos industriales y residenciales es la generación de calor para diferentes usos. Actualmente la mayor parte de ese calor se genera quemando combustibles fósiles en las propias instalaciones de la industria. Cuando se plantea descarbonizar dichos usos se ha de atender que un factor diferencial es la temperatura necesaria en cada uno de los procesos y en base a esa temperatura dilucidar que tecnologías sustitutorias tiene capacidad de generarla.

Si bien para temperaturas inferiores a 150°C las bombas de calor no tienen rival por eficiencia y por tanto todo parece indicar que en las viviendas y oficinas el hueco para el hidrógeno será reducido. Conforme la temperatura necesaria en el proceso se va elevando cada vez es más complejo encontrar tecnologías sustitutorias a los fósiles. El hidrógeno sin embargo se puede combustionar igual que los fósiles, y además su temperatura de llama es incluso superior por lo que tiene capacidad de sustituir a los fósiles a cualquier temperatura e incluso de generarlas más altas. Es por eso que podría existir hueco comercial para las combustiones de hidrógeno como fuente de calor industrial a altas temperaturas. Actualmente se están realizando proyectos de todo tipo de generación de calor con hidrógeno para testear sus ventajas e inconvenientes. La electrificación directa mediante resistencias es el principal competidor del hidrógeno en esta área.

Gráfico 23 →

TEMPERATURA NECESARIA PARA DIFERENTES INDUSTRIAS Y TECNOLOGÍA APLICABLE SUSTITUTIVA A LAS FÓSILES

Fuente: Ref. [15] ~ Bibliografía.

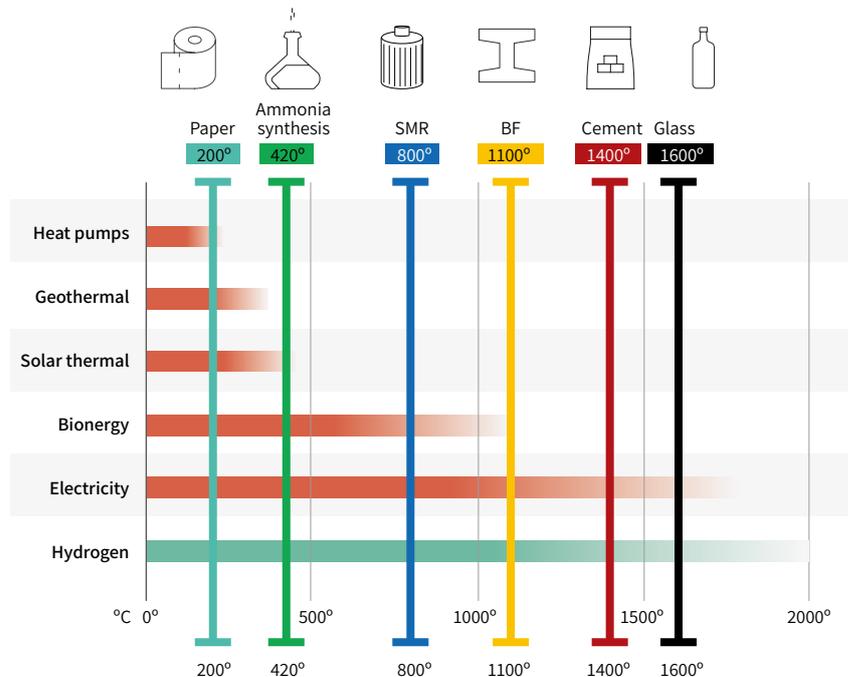
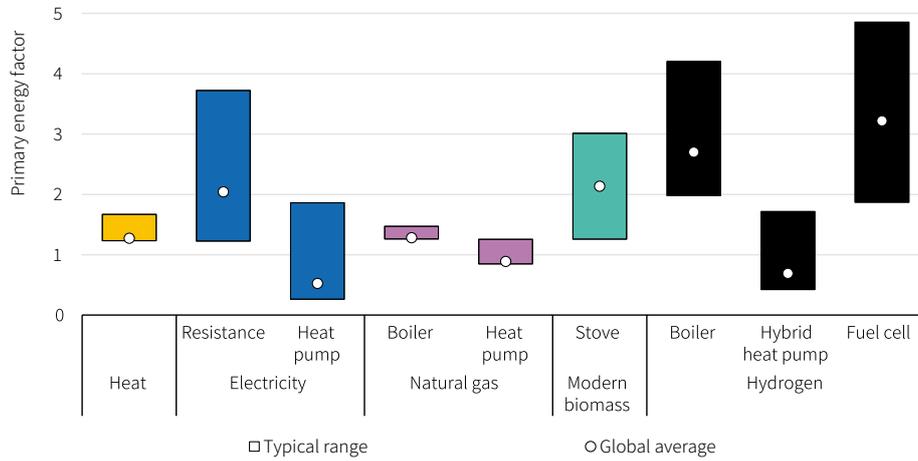


Gráfico 24 →

Fuente: Ref. [11] ~ Bibliografía.

TECNOLOGÍAS COMPETENCIA PARA LA PRODUCCIÓN DE CALOR EN VIVIENDAS. El "primary energy factor" es el factor que define cuantas unidades de energía primaria utiliza la tecnología para suministrar una unidad de calor, a menor más eficiente.



6.3. Transporte de energía (mezcla con gas natural, blending)

Una de las posibles funciones del hidrógeno podría ser la de transportar grandes cantidades de energía a largas distancias. Ya que actualmente dicha energía se transporta principalmente en forma de combustibles fósiles vía barco, tubería o vía red eléctrica. El hidrógeno al tener una alta densidad energética podría ser una solución eficaz de transporte de energía en algunos casos concretos. Aparentemente no serviría como aplicación genérica de transporte de energía dada la baja eficiencia y su limitación en sus usos finales ya que no es tan versátil como la electricidad o el diésel.

Sí que se está planteando el poder utilizar, al menos en parte, la actual red de gas natural para transportar hidrógeno. El fenómeno del "blending" supone la inyección de un porcentaje de hidrógeno mezclado con el actual suministro de gas natural (la traducción de la palabra inglesa "blending" es mezcla). Este fenómeno se basa en que el mercado del gas natural es líquido y de alto volumen, por lo que si se logra producir hidrógeno a un precio competitivo con el gas natural este se podría inyectar en dicha red y así descarbonizar todos los usos conectados a esa red. Al mismo tiempo, y como efecto colateral, se aceleraría toda la economía del hidrógeno al aplicar economías de escala a la fabricación de electrolizadores de las que podrían aprovecharse otras aplicaciones.

Sin embargo, existen fuertes limitaciones a la inserción de hidrógeno a la red de gas natural dado que el hidrógeno es mucho más "corrosivo" para los materiales de las tuberías y válvulas por lo que parece que no se podrá insertar fácilmente más de un 20% sin modificar las tuberías o las aplicaciones finales [26]. Además, en opinión del autor insertar hidrógeno en la red de gas natural para cualquier uso es utilizarlo en última instancia para aplicaciones como las calderas en viviendas u otras donde no es la opción más eficiente posible de electrificación y por tanto un gasto incensario de energía primaria. Aun así, el sector energético es multifactorial por lo que la eficiencia podría no ser el factor definitorio.



6.4. Almacenamiento y generación de electricidad

La generación eléctrica de emergencia se cubre en algunas ocasiones con generadores diésel eléctrico, que o bien están funcionando en continuo allí donde no hay red eléctrica, o bien se encienden ocasionalmente en lugares con red eléctrica cuando esta falla (Back up). Estas funciones requieren en muchos casos de altas intensidades de energía y por tanto el hidrógeno es un buen candidato para todas aquellas donde las baterías no sean la opción más eficiente. Ya que, en las ubicaciones aisladas de red eléctrica, si el consumo es continuo, es habitualmente más eficiente almacenar energía fotovoltaica en baterías de litio y quizás utilizar hidrógeno para almacenamiento a largo plazo.

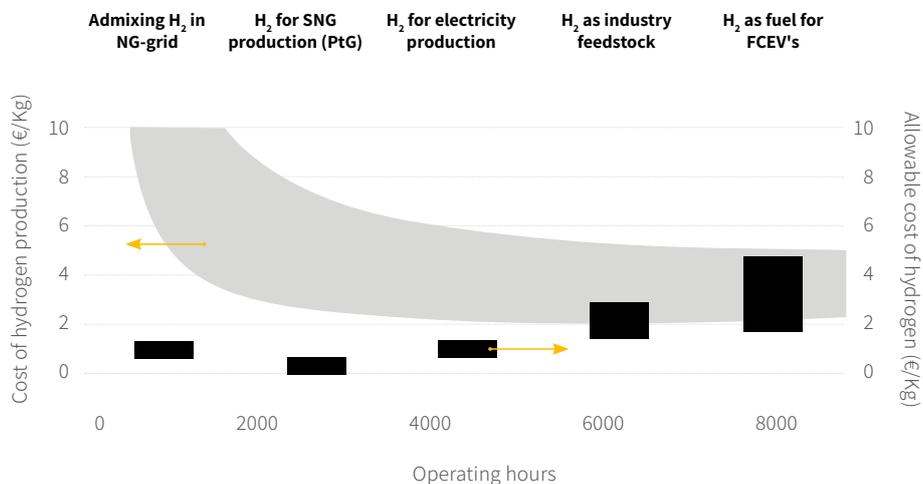
Pensando en suministro de emergencia, actualmente existen productos de muchas marcas de pilas de combustible que se están instalando como back up en base a hidrógeno en muchas antenas de telecomunicaciones. De esta forma se están sustituyendo generadores diésel por generadores eléctricos de hidrógeno no emisores de CO₂.

Una funcionalidad que ha quedado prácticamente descartada para el hidrógeno es la de actuar como almacén masivo de energía para regular la red eléctrica. Actuando como una gran batería que genera hidrógeno electrolizando agua cuando hay exceso de energías renovables y reinyectando electricidad en la red mediante una pila de combustible cuando falta energía en la red (Peaking). En este proceso, las pilas de combustible actuales transforman hidrógeno en energía eléctrica con eficiencias inferiores al 50%, lo cual si tenemos en cuenta que un electrolizador tiene un 70% de eficiencia y la compresión para almacenamiento un 90-95% hace que la energía que devolvería a la red un sistema así sería inferior al 30% de la energía que consumió. Esta bajísima eficiencia, como sistema de almacenamiento eléctrico, hace que haya sido descartado frente a centrales hidroeléctricas de bombeo o grandes baterías, mucho más eficientes.

Gráfico 25 →

COSTE DEL HIDRÓGENO EN FUNCIÓN DE HORAS DE USO DEL ELECTROLIZADOR VS NECESIDAD DE PRECIO PARA CADA APLICACIÓN

Fuente: Ref. [27] ~ Bibliografía.



Capítulo 7

Los colores del hidrógeno, certificación y garantías de origen

- ⊙ Dado que existen muchas formas de fabricar hidrógeno, y ante la perspectiva de un alto crecimiento de los consumos y usos de hidrógeno en nuestra sociedad se ha planteado clasificar el hidrógeno según su origen para poder así evaluar la sostenibilidad del mismo.

Hay que recordar que el hidrógeno habitualmente se produce partiendo de fuentes de energía fósiles y por tanto una misma aplicación que consume hidrógeno, será considerada sostenible o no dependiendo del origen del hidrógeno que consume y las emisiones asociadas a la generación del mismo. Es por esto que es de primordial importancia establecer un sistema de garantías de origen, que certifiquen oficialmente las emisiones asociadas a la generación del hidrógeno, así como su procedencia.

A nivel conceptual se ha definido un código de colores mediante el cual se clasifican los orígenes del hidrógeno. El hidrógeno que proviene de fuentes renovables bien sea por electrólisis o por gasificación de materia orgánica es considerado con la etiqueta Verde. Y es este el que motiva la actual expectativa y crecimiento del sector, ya que todo lo planteado en este informe es respectivo al hidrógeno de esta clasificación. Existen actualmente intensos debates sobre donde está el límite de lo que es considerado o no hidrógeno verde en función de la proximidad geográfica y temporal de la fuente de generación de energía renovable y el electrolizador que produce el hidrógeno. En el Gráfico 26 se puede ver la asignación de colores para los diferentes orígenes. Cabe remarcar que la mayor parte del hidrógeno consumido actualmente es clasificado como gris o negro en función de si su origen es gas natural o carbón.

Gráfico 26 →

CLASIFICACIÓN DE COLORES DEL HIDRÓGENO SEGÚN SU ORIGEN

Fuente: Ref. [28] ~ Bibliografía.

Terminology		Technology	Feedstock / Electricity source	GHG footprint*
PRODUCTION VIA ELECTRICITY	Green Hydrogen	Electrolysis	Wind Solar Hydro Geothermal Tidal	Minimal
	Purple/Pink Hydrogen		Nuclear	
	Yellow Hydrogen		Mixed-origin grid energy	Medium
PRODUCTION VIA FOSSIL FUELS	Blue Hydrogen	Natural gas reforming + CCUS Gasification + CCUS	Natural gas coal	Low
	Turquoise Hydrogen	Pyrolysis	Natural gas	Solid carbon (by-product)
	Grey Hydrogen	Natural gas reforming		Medium
	Brown Hydrogen	Gasification	Brown coal (lignite)	High
	Black Hydrogen		Black coal	

*GHG footprint given as a general guide but it is accepted that each category can be higher in some cases.



Capítulo 8

El plan mundial

- ⊙ Dado el compromiso mundial con el cambio climático [1] y que como hemos visto el hidrógeno es uno de los actores necesarios para descarbonizar algunos sectores de la economía, el compromiso institucional con el hidrógeno es también alto.

Debido a que los sectores candidatos a ser descarbonizados por el hidrógeno son más complejos que los ya electrificados, la iniciativa institucional ha tardado más en llegar que el impulso de instalación de energías renovables, el cual ya lleva décadas de andadura. Pero desde 2020 todos los agentes internacionales y nacionales se han planteado que era el momento de comenzar a implementarlo dados los plazos propuestos para llegar al 2050 NetZero escenario del pacto mundial [29] (Net Zero es el camino planeado por la ONU para llevar al mundo a cero emisiones netas en el año 2050). Esto es debido a que, para poder llegar a un planeta con emisiones netas nulas, el plan de la ONU implica una alta implantación de hidrógeno y dado que tan solo nos separan 28 años de dicha fecha, el impulso que ha de darse al hidrógeno, como vector para seguir dicho plan, es masivo; si se quieren lograr los objetivos planteados.

Gráfico 27 →

Fuente: Ref. [11] ~ Bibliografía.

EL PLAN PARA EL HIDRÓGENO EN EL ESCENARIO DE LA ONU DE EMISIONES NETAS CERO EN 2050, TFC= ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA

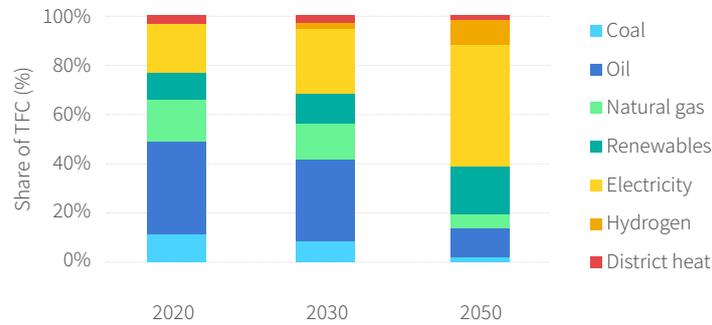
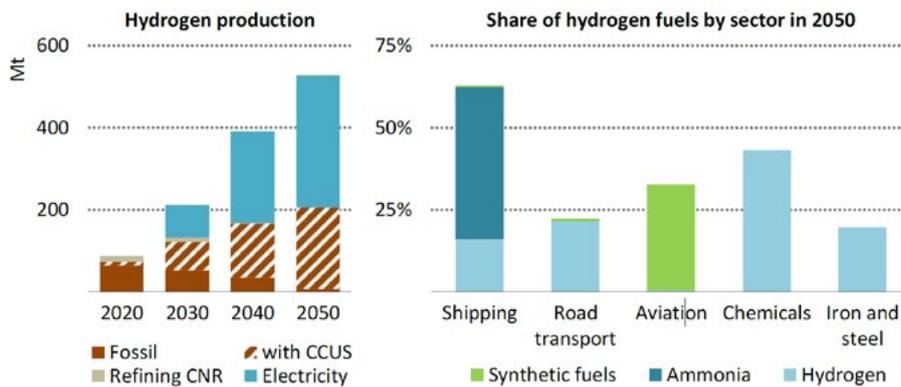


Gráfico 28 →

Fuente: Ref. [30] ~ Bibliografía.

PLAN NET ZERO ESCENARIO 2050, CCUS = CAPTURA DE CO₂



Muchos países del mundo ya están plasmando en planes estratégicos sus intenciones para el hidrógeno. Entre estos destacan países como Chile con un objetivo de instalar 25 GW de electrólisis antes de 2030 y la Unión Europea que en su conjunto planea instalar 40 GW para la misma fecha. Hay que entender que el reto es mayúsculo ya que actualmente no existe ni un 1% de esa potencia instalada.

Gráfico 29

OBJETIVOS DEL PLAN ESPAÑOL DEL H₂ PARA 2030

Fuente: Ref. [22] ~ Bibliografía.

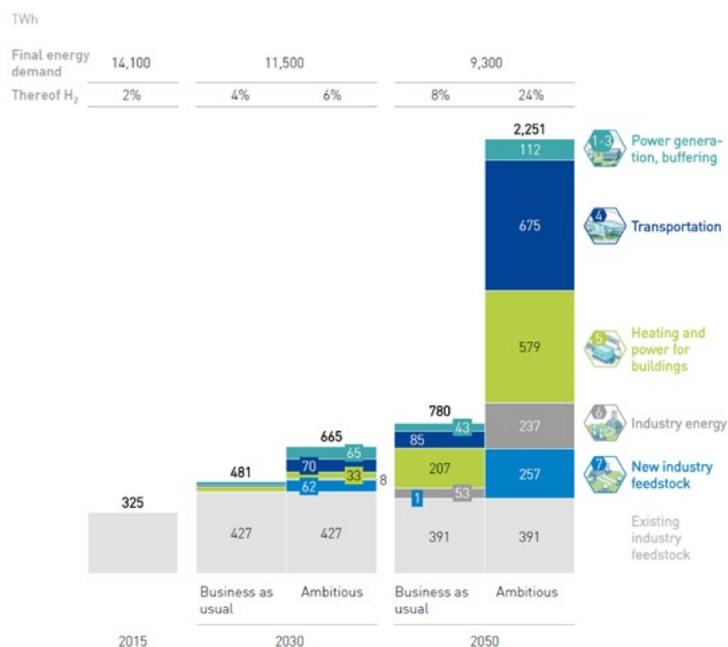
			
4 GW de potencia instalada de electrolizadores	25 % del consumo de hidrógeno en la industria	100-150 hidrogenas de acceso público	150-200 autobuses FCEV
			
5.000-7.500 vehículos ligeros y pesados para transporte de mercancías FCEV	2 líneas comerciales trenes propulsados con H ₂	8900 M€ en inversiones para proyectos de producción de hidrógeno renovable	4,6 Mton de CO ₂ eq reducidas

Las previsiones de uso del hidrógeno hasta 2030, son principalmente la sustitución del actual hidrógeno gris, consumido por industrias, por hidrógeno verde. Y en este mismo plazo comenzar con la implantación del hidrógeno en movilidad, calor industrial y nuevas industrias, para que en 2030 se estén comenzando a sentar las bases para convertirse en el principal consumo en 2050. Se planea que el hidrógeno verde suponga entre un 8% y un 24% de todo el consumo primario de energía, actualmente es un 2 %. Por lo que el crecimiento del sector ha de ser exponencial y las inversiones de escala planetaria, para lograr seguir el plan de la IEA [29]. Esta planificación se puede ver claramente reflejada para el caso de la Unión Europea en el Gráfico 30.

Gráfico 30

PREVISIONES DE CONSUMOS DE HIDRÓGENO EN EUROPA

Fuente: Ref. [24] ~ Bibliografía.



La opinión del autor sobre la tendencia mundial es que actualmente el impulso es muy fuerte y los primeros escalones obvios, cambiar consumos de hidrógeno gris por verde, una necesidad industrial clara, por lo que probablemente habrá gran avance en los próximos años. Respecto a los usos futuros la expectativa que reflejan estos informes es tan alta que lo más probable es que no se cumpla, ya que muchas de las aplicaciones que se asignan al hidrógeno serán cubiertas por otras tecnologías o directamente cambiará la demanda social de la misma. No obstante, el sector del hidrógeno a buen seguro va a seguir una senda de crecimiento la próxima década ya que está poco desarrollado actualmente. Lo que está por concretar es si el crecimiento en volumen será un 50% o un 1000% como planean los organismos internacionales.

Gráfico 31 → **ESCENARIO AMBICIOSO UNIÓN EUROPEA**

Fuente: Ref. [24] ~ Bibliografía.



- 1. Incl. feedstock
- 2. Compared to the reference Technology Scenario
- 3. Excl. indirect effects



8.1. Proyectos actuales y futuros

Actualmente existe mucha actividad en el lanzamiento de proyectos relacionados con el hidrógeno. Las grandes inversiones están dirigiéndose a generar hidrógeno electrolítico para usos industriales actuales (capítulo 12). Y en paralelo se están lanzando proyectos piloto o de menor inversión en posibles usos futuros para su testeo, como pueden ser proyectos de movilidad con camiones, coches, diferentes generaciones de calor en industrias o pilas de combustible para usos eléctricos.

Aunque la realidad actual, es que existen muy pocos proyectos operativos, pero muchos en proyecto a la espera de financiación. Por lo que, en los próximos años, se irán concretando y se podrá analizar en detalle cuales de la gran cantidad de proyectos anunciados se han llevado a término finalmente. Seguramente cerca de 2030 se dispondrá de experiencia suficiente en los proyectos piloto para dilucidar en que aplicaciones el hidrógeno es la mejor solución.

En la página web de la agencia internacional de la energía se puede consultar un listado mundial de proyectos: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database>



Para poder poner en perspectiva podemos observar el Gráfico 32 (Muestra de proyectos del sector Oil & Gas actualmente en operación o en desarrollo [11]) donde nos muestra todos los proyectos más relevantes a nivel mundial que están operativos hoy o en desarrollo en el sector Oil & Gas. En ella se puede observar que por el momento son solo unos pocos los operativos y generalmente los de más bajas potencias e inversiones.

Gráfico 32 →

MUESTRA DE PROYECTOS DEL SECTOR OÍL AND GAS ACTUALMENTE EN OPERACIÓN O EN DESARROLLO

Fuente: Ref. [11] – Bibliografía.

Project	Location	Status	Start-up date	Technology	Size
Horizon Oil Sands	Canada		2009	Oil + CCUS	438 kt CO ₂ /yr
Port Arthur	US		2013	Natural gas + CCUS	900 kt CO ₂ /yr - 118 kt H ₂ /yr
Port Jerome	France		2015	Natural gas + CCUS	100 kt CO ₂ /yr - 39 kt H ₂ /yr
Quest	Canada	Operational	2015	Natural gas + CCUS	1 000 kt CO ₂ /yr - 300 kt H ₂ /yr
H&R Ölwerke Hamburg - Neuhofer	Germany		2018	Electrolysis (PEM)	5 MW
North West Sturgeon refinery	Canada		2020	Bitumen gasification + CCUS	1 200 kt CO ₂ /yr
Pernis refinery (gasification)	Netherlands	CCU project - Operational CCUS project - Feasibility studies	2005 2024	Heavy residue gasification with CCU (CCUS from 2024)	400 kt CO ₂ /yr - 1 000 kt H ₂ /yr 1 000 kt CO ₂ /yr - 1 000 kt H ₂ /yr
Refthyne (2 phases)	Germany	Phase 1 - Operational Phase 2 - Feasibility studies	2021 2025	Electrolysis (PEM)	10 MW 100 MW
HySynergy (3 phases)	Denmark	Phase 1 - Under construction Phases 2/3 - Feasibility studies	2022 2025 -30	Electrolysis (PEM)	20 MW 300 MW / 1 000 MW
Multiphly	Netherlands	Under construction	2022	Electrolysis (SOEC)	2.6 MW
Prince George refinery	Canada		2023	Electrolysis (Unknown)	n.a.
OMV Schwechat Refinery	Austria	FID	2023	Electrolysis (PEM)	10 MW
Westkuste 100 (2 phases)	Germany	Phase 1 - FID Phase 2 - Feasibility studies	2023 -28	Electrolysis (Alkaline)	30 MW / 300 MW
H24All	Spain		2025	Electrolysis (Alkaline)	100 MW
Gela biorefinery	Italy		2023	Electrolysis (PEM)	20 MW
Taranto Sustainable refinery	Italy		2023	Electrolysis (PEM)	10 MW
Castellon refinery	Spain		2023	Electrolysis (Unknown)	20 MW
Pernis refinery (electrolysis)	Netherlands		2023	Electrolysis (Unknown)	200 MW
Saras Sardinia refinery	Italy	Feasibility studies	2024	Electrolysis (Unknown)	20 MW
Stanlow refinery	United Kingdom		2025	Natural gas + CCUS	90 kt H ₂ /yr
H2.50	Netherlands		2025	Electrolysis (Unknown)	250 MW
Preem CCS	Sweden		2025	Natural gas + CCUS	500 kt CO ₂ /yr
Grupa Lotos refinery	Poland		2025	Electrolysis (Unknown)	100 MW
Zeeland refinery	Netherlands		2026	Electrolysis (Unknown)	150 MW
Lingen refinery (2 phases)	Germany	Phase 1 - Feasibility studies Phase 2 - Early stages	2024 n.a.	Electrolysis (Unknown)	50 MW 500 MW
Deltaurus 1 (2 phases)	Netherlands		2024 n.a.	Electrolysis (Unknown)	150 MW 1 000 MW

*These plants produce merchant hydrogen to supply refineries.

Notes: Size expressed in captured CO₂ for projects using CCUS and in electrolysis installed capacity for projects using electrolysis.



Capítulo 9

Conclusiones

- ② La sociedad global se enfrenta al reto de dejar de depender de los combustibles fósiles y emitir CO₂, el cambio climático se plantea como uno de los grandes retos de la humanidad. Pero las principales energías renovables generan energía eléctrica, y solo el 20% del consumo energético mundial es eléctrico. Por lo que para descarbonizar el otro 80% se requiere de tecnologías que electrifiquen la economía, transmitiendo energía eléctrica renovable para ser utilizada en usos que tradicionalmente utilizan combustibles fósiles directamente.

El hidrógeno, dada su alta densidad energética, y su condición de gas combustible, se postula como un candidato teóricamente idóneo para muchas de las aplicaciones a electrificar. Su capacidad de ser generado partiendo de agua y energía eléctrica le permite realizar la función de transmisor de energía renovable del sector eléctrico a otros muchos sectores que requieren un combustible químico más versátil que la electricidad.

Los electrolizadores son el equipo vertebrador central de la economía del hidrógeno, por ser el equipo que posibilita la conversión de energía eléctrica en gas renovable hidrógeno. Y actualmente se encuentran en plena implantación mundial y desarrollo industrial.

El 2% de toda la energía primaria consumida en 2020 fue en forma de hidrógeno, por industrias que requieren específicamente de hidrógeno como molécula química en sus procesos, no como combustible. Ese hidrógeno fue utilizado principalmente para la fabricación de amoníaco, compuestos derivados del petróleo, metanol y siderurgia. Los cuales son insumos básicos de nuestra sociedad que sostienen industrias de vital importancia como la de los fertilizantes, los plásticos o el acero, entre otras.

Prácticamente todo el hidrógeno consumido en 2020 fue generado partiendo de combustibles fósiles y emitiendo CO₂. Por lo que uno de los primeros retos y más obvios del hidrógeno renovable, va a ser convertir esos consumos de hidrógeno gris (de gas natural) en hidrógeno verde (de fuentes renovables), y así lo reflejan los planes mundiales y nacionales. Todo parece indicar que hasta 2030 esta va a ser la actividad central del naciente sector del hidrógeno renovable/verde. Se planean inversiones de carácter global en grandes centros de electrólisis próximos a dichas industrias y asociados a parques eólicos y fotovoltaicos de gran tamaño

Debido a estos grandes proyectos la actualmente pequeña industria del hidrógeno verde se espera que crezca en órdenes de magnitud en todos sus parámetros. Lo cual se verá reflejado en que sus actuales altos costes de instalación se irán viendo reducidos dadas las economías de escala, de producción de electrolizadores, principalmente. Esta gran inversión se espera que actúe como elemento tractor de la industria, bajando los costes de los electrolizadores y haciendo así la tecnología más viable para otras aplicaciones.

No obstante, el precio del hidrógeno verde es altamente dependiente del coste de la energía eléctrica renovable disponible. Por lo cual es complejo dilucidar cuál va a ser su coste los próximos años dada la alta volatilidad actual de los mercados energéticos. Lo que si se espera es que cada vez sea más competitivo, ya que los costes de inversión van a bajar con casi total seguridad por economías de escala de los electrolizadores. La profundidad del desarrollo de la industria dependerá de los costes disponibles de energía renovable. No obstante, en términos económicos dependerá también de los precios de los combustibles fósiles, ya que el hidrógeno es un sustituto de ellos en muchas aplicaciones y por tanto su competencia en términos de mercado.

La situación actual de altos costes energéticos globales, aunque problemática para la sociedad, cataliza una aceleración de la implantación del hidrógeno verde ya que lo hace más competitivo. Los combustibles fósiles están en máximos históricos (sobre todo en Europa) pero la energía eléctrica renovable se mantiene a costes contenidos. Este hecho facilita poder generar hidrógeno a costes inferiores a los de los fósiles en algunas aplicaciones y sustituirlos con rentabilidad. Si bien es cierto que si los precios de la energía fósil tienden a moderarse se perderá esta ventaja competitiva.

La actual tendencia hacia el hidrógeno verde no solo se basa en sustituir los consumos actuales, sino que plantea utilizar el hidrógeno como forma de transporte y uso de energía (vector), como combustible, para muchas aplicaciones hoy todavía no electrificadas.

En el camino de electrificar el 80% de energía primaria, que todavía no se ha electrificado, se va a dar una competencia entre tecnologías sustitutivas de la tecnología fósil vigente en cada aplicación. El hidrógeno se considera una tecnología buena candidata por sus características para algunas de esas aplicaciones, no para todas.

El transporte pesado es una de esas aplicaciones. Es por ello que se están lanzando en todo el mundo proyectos piloto de prueba de flotas de camiones de hidrógeno a pila de combustible de alto tonelaje y autonomía. Con el objetivo de probar la tecnología y ver dónde está la frontera entre las aplicaciones en las que vehículos puramente eléctricos tiene mejor desempeño, y las que deberán ser cubiertas con vehículos a hidrógeno porque los eléctricos no tienen suficiente desempeño para ellas.

Para vehículos de mayor tamaño que los camiones, el hidrógeno es un candidato aun con mayor ventaja respecto a las baterías eléctricas (su principal competencia sustitutiva), aunque en muchos casos, como en el sector naval, se plantea utilizarlo en forma de amoniaco, que no es sino hidrógeno verde embebido dentro de otra molécula para su facilidad en transporte y uso.

También postula para sustituir a ciertos procesos generadores de calor en industrias, donde tendrá mayor ventaja a mayor sea la temperatura necesaria del proceso, ya que las tecnologías sustitutivas tienen más problemas para suministrar esas temperaturas, sin embargo, el hidrógeno tiene incluso más temperatura de llama que los fósiles.

Por último, el hidrógeno también se plantea como posible candidato al transporte de energía bien sea en forma de hidrógeno puro o mezclado con gas natural. Aunque en opinión del autor estos usos se verán muy limitados ya que el mix de tecnologías en el futuro va a ser muy superior al actual y por tanto no tendrá sentido una mallada red de un único gas, como sucede ahora con el gas natural.

Todas estas acciones de inserción de hidrógeno que en nuestra sociedad se plantean, pueden llegar a representar incluso el 24% de toda la energía primaria consumida en el mundo, en los escenarios más optimistas para 2050. Es por ello que, dado el compromiso de los estados e instituciones supranacionales, el hidrógeno está recibiendo un gran impulso desde el año 2020. Ya que si no se diera este impulso ahora no sería posible alcanzar los objetivos planteados en los planes de las Naciones Unidas para el Net Zero escenario 2050.

La senda para alcanzar un planeta con cero emisiones netas de CO₂ en 2050 ha sido trazada por las Naciones Unidas y corroborada por la mayor parte de los países del mundo. Esta senda incluye un despliegue masivo de tecnologías de hidrógeno en los próximos 30 años. No es seguro si la senda se seguirá, o si será siquiera viable realizarla en plazos o planteamientos, lo que es seguro es que el sector del hidrógeno está en esa senda y está recibiendo un fuerte impulso institucional e inversor para tratar de seguirla. Es difícil conocer como de grande o diverso será el sector del hidrógeno dentro de 15 o 20 años, lo que sí es seguro afirmar es que existirá un sector del hidrógeno más grande que el actual y que en los próximos años, al menos se va a intentar desarrollar con ahínco por parte de todas las instituciones. Es por eso que ahora es el momento, es la oportunidad, de las tecnologías del hidrógeno de demostrar de que son capaces y de que no, y en 5 o 10 años quedarán definidas en base a esta experiencia de proyectos piloto cuáles serán las aportaciones útiles de este gas a nuestra sociedad futura.



Referencias bibliográficas

[1] ONU, «United Nations Climate Change,» [En línea]. Available: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>.

[2] MITECO, «España cumple los objetivos europeos de renovables y eficiencia energética en 2020,» [En línea]. Available: https://www.miteco.gob.es/es/prensa/211227_ndpespanacumplelosobjetivoseuropeosderenovablesyeficienciaenergeticaen2020_tcm30-534574.pdf.

[3] Red Eléctrica Española, «REE, Red Eléctrica Española,» [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/datos/generacion/estructura-generacion>.

[4] Red Eléctrica Española, «REE,» [En línea]. Available: https://www.ree.es/es/datos/generacion/estructura-generacion?start_date=2020-01-01T00:00&end_date=2021-12-31T23:59&time_trunc=year&systemElectric=nacional.

[5] MITECO, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «MITECO, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico,» [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/espa%C3%B1a-cumple-los-objetivos-europeos-de-renovables-y-eficiencia-energ%C3%A9tica-en-2020/tcm:30-534576>.

[6] IDAE, «poderes-calorificos-inferiores_pci_v_1-00_2020, PCI's IDAE,» [En línea]. Available: https://www.idae.es/sites/default/files/estudios_informes_y_estadisticas/poderes-calorificos-inferiores_pci_v_1-00_2020.xlsx.

[7] Universidad de Guanajuato, «blogs.ugto.mx,» [En línea]. Available: <https://blogs.ugto.mx/enfermeriaenlinea/unidad-didactica-3-la-quimica-del-cuerpo-humano/>.

[8] A. PÉREZ, «<https://www.hibridosyelectricos.com>,» [En línea]. Available: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/densidad-energetica-baterias-iones-litio-es-8-veces-mejor-que-hace-decada/20220428175722057300.html>.

[9] Hysafe, «Biennial Report on Hydrogen Safety,» [En línea]. Available: <http://www.hysafe.org/BRHS>.

[10] Hydeploy, «<https://hydeploy.co.uk>,» [En línea]. Available: <https://hydeploy.co.uk/faqs/hydrogen-level-set-maximum-20/>.

[11] IEA, «Global Hydrogen Review,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>.

[12] [enerdata.net](https://yearbook.enerdata.net), «World Energy and Climate Statistics,» [En línea]. Available: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>.

[13] L. moncloa, «La moncloa,» [En línea]. Available: <https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/transicion-ecologica/Paginas/2021/271221-objetivos-cumplidos-2020.aspx#:~:text=El%20consumo%20de%20energ%C3%ADa%20primaria,un%20total%20de%2079.436%20ktep..>

[14] B. Mckenzie, «SHAPING TOMORROW'S GLOBAL HYDROGEN MARKET,» [En línea]. Available: https://www.bakermckenzie.com/-/media/files/insight/publications/2020/01/hydrogen_report.pdf.

[15] ARIENA, «GREEN HYDROGEN FOR INDUSTRY,» ISBN: 978-92-9260-422-6, 2022.

[16] g. Linde, «Linde Gas,» [En línea]. Available: https://www.linde-gas.com/en/processes/petrochemical-processing-and-refining/hydrogen_applications_refineries/index.html.

[17] WIKA, «Blog de WIKA,» [En línea]. Available: <https://www.bloginstrumentacion.com/aplicaciones/principales-tipos-de-fertilizantes-y-sus-procesos-quimicos/>.

[18] Belmonte, Th., «Hydrogen or ammonia: why not both?,» [En línea]. Available: <https://worldmaterialsforum.com/files/Presentations2021/Thierry-belmonte-scientific-speech.pdf>.

[19] Equilibrium, Dynamic, «Dynamic Equilibrium,» [En línea]. Available: <https://everythingdynamicequilibrium.weebly.com/methanol-production.html>.

[20] KIT, «KIT – The Research University in the Helmholtz Association,» [En línea]. Available: https://www.imvt.kit.edu/english/57_1931.php.

[21] MIDREX, «MIDREX,» [En línea]. Available: <https://www.midrex.com/tech-article/midrex-h2-ultimate-low-co2-ironmaking-and-its-place-in-the-new-hydrogen-economy/>.

[22] G. d. españa, «Hoja de ruta del Hidrogeno,» [En línea]. Available: https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/hoja_de_ruta_del_hidrogeno.pdf.

[23] ARIENA, «HYDROGEN FROM RENEWABLE POWER,» ISBN 978-92-9260-077-8, 2018.

[24] F. C. A. H. J. UNDERTAKING, «HYDROGEN ROAD MAP EUROPE,» [En línea]. Available: <https://www.fch.europa.eu/news/hydrogen-roadmap-europe-sustainable-pathway-european-energy-transition>.

[25] GEEDS, [En línea]. Available: https://geeds.es/wp-content/uploads/2012/02/modelo_marco_es5_alblog.pdf.

[26] FRAUNHOFER INSTITUTE, «THE LIMITATIONS OF HYDROGEN BLENDING IN THE EUROPEAN GAS GRID,» [En línea]. Available: https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/en/documents/Studies-Reports/FINAL_FraunhoferIEE_ShortStudy_H2_Blending_EU_ECF_Jan22.pdf.

[27] K. B. R. H. Kanellopoulos, «The potential role of H₂ production in a sustainable future power system,» 2019.

[28] World Energy Council, «NATIONAL HYDROGEN STRATEGIES,» [En línea]. Available: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf.

[29] IEA, «Net Zero by 2050,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.

[30] IEA, «Net Zero by 2050,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.

[31] W. Cheng, «How Green Are the National Hydrogen Strategies?,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/358515834_How_Green_Are_the_National_Hydrogen_Strategies.



OBS Business School

School of **Business Administration & Leadership**

School of **Innovation & Technology Management**



De:



Planeta Formación y Universidades