

Interreg



Cofinanciado por
la Unión Europea
Cofinanciado pela
União Europeia

España – Portugal

Futuretech-H2

Actividad 1: “Identificación de Estado de situación y desarrollo de cadena de valor en la zona transfronteriza”

Entregable E.1.2.- Estudio sobre el desarrollo e implementación de nuevos modelos de actividad y negocio para el sector a nivel global y transfronterizo.

CONTENIDO

1.	RESUMEN EJECUTIVO	6
2.	INTRODUCCIÓN	8
3.	PERSPECTIVA EN LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO	10
3.1	MARCO EUROPEO	12
3.2	MARCO GEOGRÁFICO Y TEMPORAL DE DESARROLLO DE LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO	14
4.	DERIVADOS DEL HIDRÓGENO VERDE	16
4.1	METANOL RENOVABLE	16
4.1.1	Proceso de producción del metanol renovable	17
4.1.1	Costes de la cadena de valor del metanol renovable	18
4.2	AMONIACO RENOVABLE	19
4.2.1	Proceso de producción del amoníaco renovable	22
4.2.2	Costes de la cadena de valor del amoníaco renovable	23
5.	APLICACIONES Y COMPETIDORES DEL HIDRÓGENO EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA	25
5.1	APLICACIONES DEL HIDRÓGENO VERDE	25
5.1.1	Sector del metal	25
5.1.2	Sector industrial	26
5.1.3	Sector minero	27
5.1.4	Transporte por carretera	27
5.1.5	Transporte marítimo	28
5.1.6	Transporte por ferrocarril	29

5.1.7	Aviación	30
5.2	COMPETIDORES DEL HIDRÓGENO VERDE	33
5.2.1	Energía renovable. Electrificación	33
5.2.2	Biometano	34
5.2.3	Captura de CO2	35
6.	DAFO ANDALUCÍA Y ALENTEJO	37
6.1	DAFO	38
6.1.1	Oportunidades	38
6.1.2	Fortalezas	38
6.1.3	Debilidades	39
6.1.4	Amenazas	39
6.2	POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE	40
6.3	POTENCIAL INDUSTRIAL DE LA ZONA	42
6.3.1	Hidrógeno renovable	42
6.3.2	Sector aeronáutico	42
6.3.3	Sector automoción	43
6.3.4	Fabricantes de carrocerías	43
6.3.5	Calderería y construcciones metálicas	43
6.3.6	Equipos de refrigeración	43
6.3.7	Estaciones de servicio	44
6.3.8	Fabricación de catalizadores para automóvil	44
6.3.9	Prevención de riesgos laborales	45
6.3.10	Empresas de automatización y control	45
6.3.11	Grupos electrógenos	45
6.3.12	Montajes eléctricos	45
6.3.13	Suministro de tubería y racores	45
6.3.14	Centros de investigación y formación	46
6.4	PUERTOS Y POLOS INDUSTRIALES	46
6.4.1	Puerto y polo industrial de Sines	46

Entregable E.1.2

6.4.2	Puerto y polo industrial de Huelva	48
6.4.3	Puerto y polo industrial del Campo de Gibraltar	49
6.4.4	Puerto y polo industrial de Cádiz	50
7.	MODELOS DE ACTIVIDAD Y NEGOCIO	52
7.1	MODELOS DE ACTIVIDAD Y NEGOCIO DEL SECTOR INDUSTRIAL	52
7.1.1	Consultoría e ingeniería	52
7.1.2	Bienes de equipo	52
7.1.3	Construcción y montaje de plantas	53
7.1.4	Operación y mantenimiento de las plantas	53
7.1.5	Desarrollo de tecnología y formación	53
7.1.6	Construcción de vehículos	54
7.2	MODELOS DE ACTIVIDAD Y NEGOCIO DE PRODUCCIÓN Y EXPORTACIÓN DE HIDRÓGENO Y DERIVADOS	54
7.2.1	Producción de hidrógeno	54
7.2.2	Producción de derivados	55
7.2.3	Almacenamiento, distribución y exportación	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de proyectos anunciados de producción de hidrógeno de bajo carbono	11
Figura 2 Comparación del coste de producción del hidrógeno sin subvenciones	12
Figura 3 Previsión de oferta y demanda en distintas zonas de Europa 2030/2040.....	15
Figura 4 Corredor de hidrógeno previsto para 2040.....	15
Figura 5 Procesos de producción de metanol	18
Figura 6 Costes actuales y futuros de producción de bio y e-metanol	18
Figura 7 Comparación del coste de producción del metanol renovable y no renovable	19
Figura 8 Aplicaciones del amoníaco en el mercado mundial en 2050	20
Figura 9 Previsión de la producción de amoníaco renovable y no renovable en 2050	21
Figura 10 Esquema de la cadena de valor de amoníaco renovable.....	23
Figura 11 Comparación de costes de la producción de amoníaco por distintos métodos	24
Figura 12 Previsión de la aplicación de los vehículos de hidrógeno en la descarbonización del transporte.....	28
Figura 13 Mapa de recurso solar disponible en Europa.....	40
Figura 14 Mapa de Irradiancia Global media (1983-2005) SIS (CM-SAF) en la Península Ibérica, en kWh/m2 día.....	41
Figura 15 Mapa del recurso eólico en Europa.....	41
Figura 16 Esquema del proyecto MadoquaPower2X de producción de amoníaco renovable en el puerto de Sines.....	48

1. RESUMEN EJECUTIVO

Este documento forma parte de la Acción 1.1, Diagnóstico del sector del hidrógeno verde, y continúa con el estudio del sector del hidrógeno verde en la zona de Andalucía y Alentejo.

El sector del hidrógeno se encuentra actualmente en un momento sin precedentes, pero cabe esperar que será un sector que se desarrollará a gran escala en los próximos años.

En primer lugar, Europa tiene una inquebrantable intención de descarbonizarse en 2050, y para ello se debe comenzar ya el proceso de sustitución de las fuentes de energía fósiles por fuentes de energía renovables. Las dos principales razones que impulsan a Europa a seguir esta ruta son la intención de ser el primer continente climáticamente neutro del mundo; y la necesidad de ser cada vez más independiente de los actores energéticos internacionales, y de los mercados que deciden el precio de la energía según el momento político.

La ruta indicada comienza con la instalación masiva de producción de energía renovable, ya sea fotovoltaica, eólica terrestre y marina, biogás, biomasa, o cualquier otra. Pero ahí surge un problema nuevo: la capacidad de almacenamiento y de transporte. Se impulsará la electrificación de los consumos energéticos, pero habrá aplicaciones que no podrán ser fácilmente electrificadas. Ahí es donde el hidrógeno renovable tendrá un papel importante por dos razones: la capacidad de utilizarse como medio de almacenamiento y transporte hasta centro Europa, que es deficitaria de recurso renovable; y porque la producción de hidrógeno es la única vía posible de transformar energía eléctrica en energía química, que da la posibilidad de uso en otras aplicaciones.

Las últimas piezas necesarias del mapa de las energías renovables son los combustibles renovables amoníaco y metanol. El hidrógeno es el gas más ligero que existe, lo que complica su manejo y su almacenamiento, por lo que transformarlo en otras moléculas renovables como el amoníaco y el metanol tiene ventajas para algunas aplicaciones, a pesar de la planta de producción adicional y del consumo energético que reduce la eficiencia de la transformación de energía eléctrica en energía química. Aun así, en algunas aplicaciones será necesaria esta transformación a pesar de su aumento en el coste.

Una de las claves para desarrollar el sector del hidrógeno renovables es que exista demanda. Europa está impulsando esta demanda mediante directivas europeas, incorporando combustibles renovables paulatinamente a distintos sectores para reducir su huella de carbono. Este es el caso del sector aéreo en el que se debe incorporar el 1,2% de combustible renovable de aviación en 2030. En el sector industrial se deberá sustituir el 42% del hidrógeno gris por renovable, y el sector naval deberá reducir sus emisiones un 2% ya en 2025. Además, cada vez habrá más sectores obligados al pago por emisiones de CO₂.

El hidrógeno tiene el potencial de reducir drásticamente las emisiones de CO₂ en el sector de la aviación. Por un lado, se impulsará el desarrollo de nueva tecnología a bordo de las aeronaves

para que puedan ser propulsadas por hidrógeno, y mientras ese desarrollo alcance su madurez, utilizando combustible renovable de aviación en sus operaciones habituales.

Así mismo, la descarbonización del sector naval se podrá llevar a cabo mediante los nuevos combustibles renovables producidos a partir de hidrógeno como son el amoníaco y el metanol.

En el ámbito regional, Andalucía y Alentejo tienen muchas ventajas y oportunidades que pueden ser aprovechadas en este sector en las próximas décadas: tanto desde el punto de vista de la producción de hidrógeno renovable y sus derivados, ya que se dispone de un buen recurso renovable; como desde el punto de vista de desarrollo de la tecnología, ya que se dispone de buen tejido industrial, puertos y polos industriales. Y no sólo en la producción de hidrógeno renovable y derivados, sino en el desarrollo de equipos y vehículos que lo consumen, como son los sectores de la automoción, aeronáutico y naval.

Andalucía y Alentejo disponen de muy buen recurso renovable, de polos industriales, de puertos y de grandes empresas energéticas, por lo que se pueden convertir en una región productora de recursos energéticos renovables, tanto para consumo nacional como para exportación a las regiones centrales de Europa.

Por otro lado, ambas regiones disponen de un gran tejido industrial, que permitirá desarrollar las tecnologías y los equipos necesarios en el sector, así como de centros de investigación y formación.

En conclusión, Andalucía y Alentejo disponen de todo lo necesario para convertirse en líderes del sector del hidrógeno renovable en las próximas décadas.

2. INTRODUCCIÓN

La primera parte de la actividad se finalizó con el documento E1.1 Documento estudio de situación actual del sector del hidrógeno verde a nivel global y transfronterizo. Este primer documento examinó el sector del hidrógeno verde, enfocándose en su estado actual y las perspectivas futuras dentro del marco global y transfronterizo entre España y Portugal. Se analizaron los aspectos tecnológicos, económicos y regulatorios, subrayando el papel crucial de las tecnologías de producción y almacenamiento de hidrógeno en la transición energética hacia fuentes más sostenibles.

Inicialmente, se describieron varias tecnologías para la producción de hidrógeno, como el reformado de hidrocarburos y la electrólisis del agua. Se destaca la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables, tales como la energía solar y eólica, como una opción en aumento que podría disminuir la dependencia de los combustibles fósiles.

Posteriormente, se identificaron los principales actores promotores e inversores en el sector, tanto públicos como privados, que están fomentando el desarrollo del hidrógeno verde. Se citan varios proyectos significativos que están en proceso o en etapa de planificación, orientados a desarrollar infraestructuras energéticas que integran el hidrógeno verde como un componente esencial.

Finalmente, se revisó el marco legal y las políticas gubernamentales que respaldan el sector, incluyendo incentivos y subvenciones que promueven la inversión e innovación en tecnologías de hidrógeno.

El objetivo de este documento es continuar el desarrollo llevado a cabo en el primer documento aportando una perspectiva de la economía del hidrógeno renovable, con una visión más extensa del sector del hidrógeno renovable incluyendo los derivados como el amoníaco y el metanol, que se posicionan como los futuros combustibles renovables con más potencial, describiendo brevemente las previsiones de producción de ambos, así como sus procesos de producción y sus costes de producción comparando renovables y no renovables.

También se describen las aplicaciones del hidrógeno verde y sus derivados en la descarbonización de la economía, en distintos sectores de la economía, así como los posibles competidores del hidrógeno verde, que impedirán su uso en determinadas aplicaciones debido a que hay o habrá tecnologías disponibles más eficientes que la utilización del hidrógeno renovable.

Se incluye un análisis de debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades que se dispone en las regiones de Andalucía y Alentejo, que deben ser tenidas en cuenta para tener una proyección del futuro del sector en estas regiones. En este sentido se explora el potencial de producción de energía renovable en ambas regiones, el potencial industrial en los distintos sectores, así como los puertos y polos industriales ya disponibles,

Entregable E.1.2

Por último, se plantean distintos modelos de actividad o nuevos modelos de negocio en las regiones de Andalucía y Alentejo que aprovechen las oportunidades en el sector del hidrógeno renovable.

3. PERSPECTIVA EN LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO

La producción de hidrógeno a partir de electrolisis es la pieza clave para poder convertir energía eléctrica en energía química, y de ahí poder proceder a su conversión a todo tipo de moléculas energéticas o químicas posteriores.

Si se parte de biomasa, o residuos biogénicos, se puede promover la producción de hidrógeno, pero en este caso, en muchos casos puede ser más favorable seguir una ruta directa a los derivados habituales del hidrógeno, como es el biometano.

Según expone la Asociación Española del Hidrógeno¹ *“El potencial de España en el ámbito del hidrógeno verde o bajo en carbono se debe a tres ventajas clave. En primer lugar, su posición geográfica privilegiada le permite producir hidrógeno renovable en una gran cantidad, no solo para autoabastecerse y satisfacer sus necesidades, sino también para exportar hidrógeno renovable al norte de Europa. En segundo lugar, España cuenta con una importante base tecnológica y científica. Por último, la tercera ventaja es industrial, hay entidades que abarcan cada eslabón de la cadena de valor del hidrógeno.”*

En la Hoja de Ruta del Hidrógeno en España se preveía la instalación de al menos 4 GW de electrolizadores en 2030, aumentando esa cifra en el último censo de proyectos a 11 GW.

También la Agencia Internacional de la Energía prevé que la producción de hidrógeno renovable puede crecer de un modo muy importante hasta 2030². La producción anual de hidrógeno de bajo carbono podría alcanzar los 38 millones de toneladas en 2030, si se llevan a cabo todos los proyectos anunciados, aunque casi la mitad corresponden a proyectos que se encuentran en las primeras fases de desarrollo. El 70% corresponderían a proyectos de producción con electrolisis, y el resto a la producción con combustibles fósiles con captura de CO₂. La Figura 1 muestra el mapa de proyectos de todo el mundo, y como se puede observar, el epicentro de los proyectos es Europa y la Península Ibérica.

La demanda mundial de hidrógeno alcanzó un máximo histórico en 2022 de 95 millones de toneladas, con **un aumento de casi el 3%**, lo que produjo unas emisiones de CO₂ de 900 millones de toneladas. La demanda sigue vinculada a la industria, con menos de 0,1% dedicado a otras aplicaciones como el transporte.

Sin embargo, los costes de producción pueden dificultar su despliegue. Sólo el 4% de esta producción potencial ha tomado la decisión final de inversión (FID, *Final Investment Decision*) lo que supone una **producción potencial de menos de 2 millones de toneladas al año**.

¹ https://aeh2.org/wp-content/uploads/2023/07/AeH2_Informe-Censo-de-Proyectos-1.pdf

² <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>

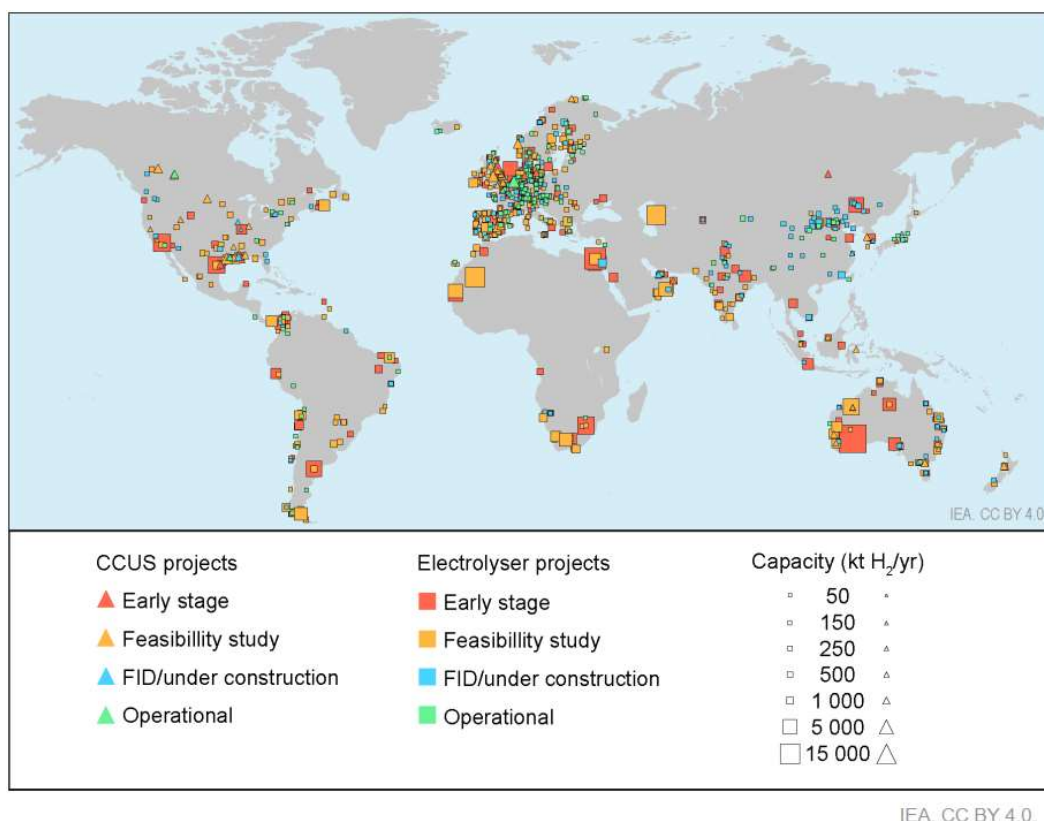


Figura 1 Mapa de proyectos anunciados de producción de hidrógeno de bajo carbono

ArcelorMittal, la mayor siderúrgica del mundo, obtuvo la concesión directa de 450 millones de euros para la ejecución del proyecto de la planta de reducción directa de hierro (DRI, *Direct Reduction Iron*) alimentada por hidrógeno verde en Gijón, Asturias. Posteriormente, ha renunciado a tener la planta lista en 2025. Ha aplazado la inversión.

En términos de actualidad sociopolítica, **la guerra de Ucrania** es un factor que ha afectado mucho a la economía de diversos sectores, entre ellos el del H₂. La guerra, que comenzó en 2022, hizo reforzar la ambición de Europa por autoabastecerse energéticamente lo máximo posible para no ser tan dependiente de los mercados globales de la energía. Ante este escenario, el contenido energético del hidrógeno es de 33,33 kWh/kg, por lo que son necesarios 30 kg de hidrógeno para conseguir un MWh de energía. El precio del gas natural en Europa alcanzó un valor máximo entre los 200 y 300€/MWh. **Dichos precios equivaldrían a un precio de hidrógeno entre 6,67 y 10,00€/kgH₂; que son precios a los que se puede producir actualmente el hidrógeno renovable.**

Sin embargo, en 2024 el precio del gas natural en Europa está entre 25 y 30€/MWh, lo que equivaldría a un precio de hidrógeno entre 0,83 y 1,00€/kgH₂; que es un precio inferior incluso al hidrógeno gris (producido a partir de gas natural).

Desde el punto de vista de la producción de hidrógeno, ver Figura 2, los costes del hidrógeno gris y azul serían de 1,60 y 1,85€/kgH₂ respectivamente, basados en un precio del gas natural de 29€/MWh en Europa; suponiendo una tasa de captura de CO₂ del 85%. Suponiendo que el hidrógeno verde se produce en un electrolizador alcalino de fabricación occidental (con un coste de inversión de 1.000€/kW) que opera con un 70% de eficiencia, y un coste de la electricidad de 90€/MWh, su coste sería de 5,50€/kgH₂. En este coste de producción no se han incluido los costes de almacenamiento, compresión y distribución, que pueden elevarlo significativamente³. Por lo tanto, para la producción de hidrógeno, el de origen renovable **podría ser competitivo respecto al gris o azul** a partir de un precio del gas natural de unos 100€/MWh.

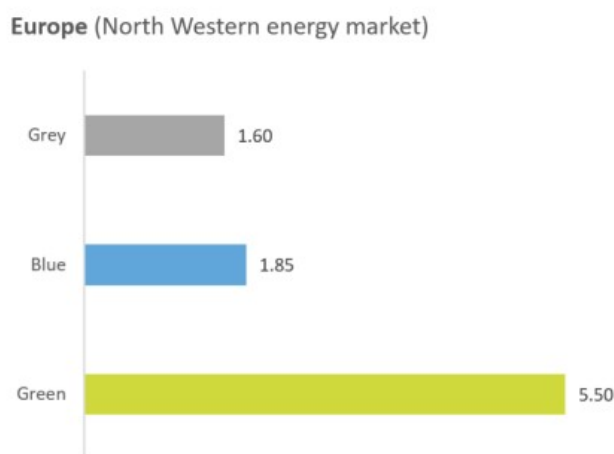


Figura 2 Comparación del coste de producción del hidrógeno sin subvenciones

Aunque actualmente hay una relativa calma en el mercado, hay un fuerte consenso de que los problemas energéticos de Europa no habrán terminado del todo ni siquiera a finales de 2024 o principios de 2025, ya que en lo fundamental nada ha cambiado, y Europa dependerá en gran medida del suministro de GNL durante años, si no décadas.

Si Europa quiere revertir esta situación, debería promover todas las iniciativas para autoabastecerse lo máximo posible de energía, para ser menos vulnerable.

3.1 MARCO EUROPEO

La Comisión Europea se ha comprometido a transformar la UE en una economía limpia, con el objetivo de cumplir con el Acuerdo de París⁴. Su objetivo es garantizar cero emisiones en 2050, convirtiendo a Europa en el primer continente climáticamente neutro del mundo⁵. Para alcanzar

³ <https://think.ing.com/articles/hold-back-to-reality-paving-the-way-for-future-growth-in-hydrogen/>

⁴ <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

⁵ https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/story-von-der-leyen-commission/european-green-deal_en

este objetivo es necesario un sistema energético limpio y eficiente, y no dependiente de los combustibles fósiles.

En 2021 la UE adoptó su primera Ley Europea del Clima⁶. En ella se fijan los objetivos europeos de neutralidad climática para 2050, con dos objetivos intermedios del 90% de reducción de emisiones para 2040, y un 55% para 2030.

De este modo, la Comisión Europea integra los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas⁷ en el marco de las políticas europeas y en sus actuales prioridades.

Para apoyar el despliegue de las energías renovables y mejorar la eficiencia energética, los programas NextGenerationEU y REPowerEU apoyarán las inversiones con fondos estimados de 275 000 M€ el primero, y 118 000 M€ el segundo.

Adicionalmente, ninguna región deberá quedarse atrás, por lo que se presentó el fondo de Transición Justa con una financiación de 19 700 M€ dirigida a diversificar las actividades económicas de estas regiones hacia industrias más limpias y recualificar a los trabajadores para nuevas fuentes de empleo.

Por último, el Régimen Comunitario de Comercio de Derechos de Emisión (RCDE) está desempeñando un papel clave en la generación de ingresos públicos que se reinvierten en la acción climática y el apoyo social. Desde su puesta en marcha en 2005, el RCDE ha generado más de 180 000 M€ en ingresos. En los próximos años se irán incorporando más sectores al RCCDE, lo que impulsará las fuentes de energía alternativas.

Respecto al hidrógeno limpio, la estrategia *Fit for 55* de la UE y el régimen de comercio de derechos de emisión de carbono impulsarán su demanda en los próximos años. Los usuarios de hidrógeno gris deberán sustituir el 42% de su consumo de hidrógeno por hidrógeno verde. Así mismo, en el marco de la iniciativa ReFuelEU Aviation, el 1,2% de los combustibles suministrados a las aeronaves en los aeropuertos de la UE deberán estar basados en el hidrógeno para 2030. La iniciativa marítima FuelEU obligará a las navieras a reducir sus emisiones un 2% de aquí a 2025 y que paguen un precio por las emisiones de carbono en el marco del régimen comunitario de comercio de derechos de emisión para 2026, lo que aumentará la demanda de combustibles a base de hidrógeno, como el amoníaco o el metanol.

Las compañías navieras y de aviación operan en todo el mundo y pueden acceder a los mercados de hidrógeno más baratos. Air France, KLM y Delta Air Lines han firmado un acuerdo de suministro de combustible de aviación sostenible de siete años de duración con el productor estadounidense de combustible sintético DGFuels, mediante la operación de más de 800 MW de electrolizadores. Maersk ha firmado el mayor contrato de suministro de combustible

⁶ https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en

⁷ <https://sdgs.un.org/2030agenda>

renovable (metanol) hasta la fecha mediante un acuerdo vinculante de suministro con el promotor chino de energías renovables Goldwind³. Maersk presentó su mega proyecto de producción de metanol junto con CEPSA en el Puerto de Huelva.

El plan REPowerEU presenta un marco global de apoyo a la introducción del hidrógeno renovable y bajo en carbono para contribuir a la descarbonización de la Unión Europea de forma rentable y, de este modo, reducir su dependencia de los combustibles fósiles importados.

El hidrógeno representaba menos del 2% del consumo energético de Europa en 2022, utilizándose principalmente en los procesos de producción de productos químicos, como plásticos y fertilizantes. El 96% de este hidrógeno se producía a partir de gas natural, lo que generaba importantes cantidades de emisiones de CO₂, como se ha mencionado anteriormente. El objetivo de la Unión Europea es producir 10 millones de toneladas e importar 10 millones de toneladas de aquí a 2030⁸.

3.2 MARCO GEOGRÁFICO Y TEMPORAL DE DESARROLLO DE LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO

El desarrollo de todas las políticas europeas tiene como marcos temporales los años 2030 y 2050, como se ha comentado en la sección anterior, teniendo **objetivos específicos para 2030** de alcanzar una descarbonización de la sociedad en Europa del 55%, y de alcanzar la neutralidad de emisiones de carbono en 2050. También se incluye, como es el caso de la red de hidroductos de la Península Ibérica y de Europa un marco temporal de 2040. Es decir, el despliegue de todas las infraestructuras se llevará a cabo a lo largo de los próximos 25 años.

Como se puede ver en la Figura 3 el centro de Europa requerirá del hidrógeno de las zonas periféricas de Europa, que disponen de mejores recursos renovables. La Península será proveedora de hidrógeno, pero tendrá que competir con la producción en Italia y Norte de África, Mar del Norte, países nórdicos y bálticos y Este de Europa.

En la Figura 4 se muestra la red de hidroductos previstos en Europa en 2040 conectando la oferta y la demanda de hidrógeno⁹. Se puede observar **que tanto Portugal como España desempeñarán un papel importante en el mercado europeo de hidrógeno**. También se puede observar tres importantes polos de demanda en las zonas industriales y **portuarias de Sines, Huelva y Algeciras**.

⁸ https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en

⁹ https://ehb.eu/files/downloads/1653999355_EHB-Supply-corridors-presentation-Full-compressed-1.pdf

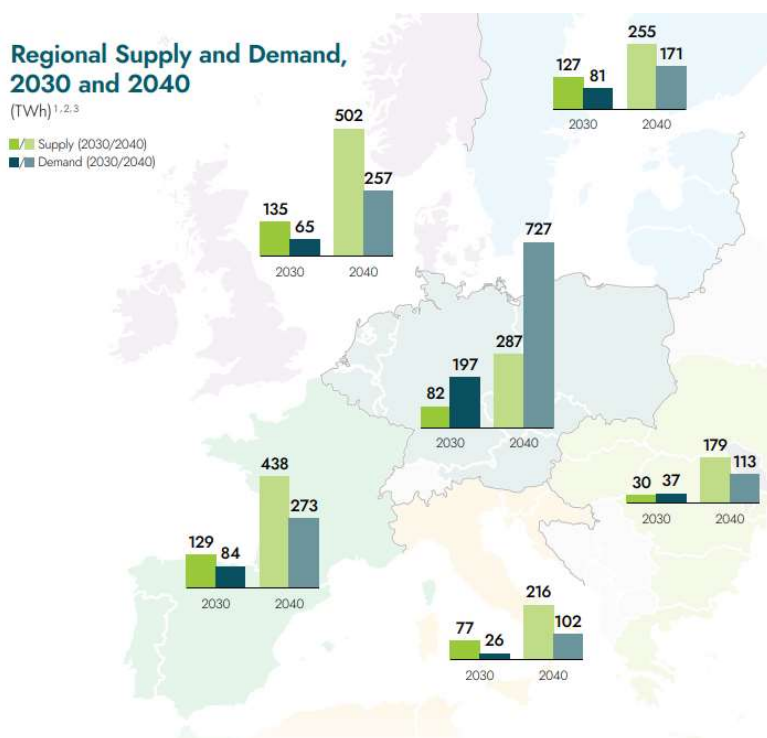


Figura 3 Previsión de oferta y demanda en distintas zonas de Europa 2030/2040

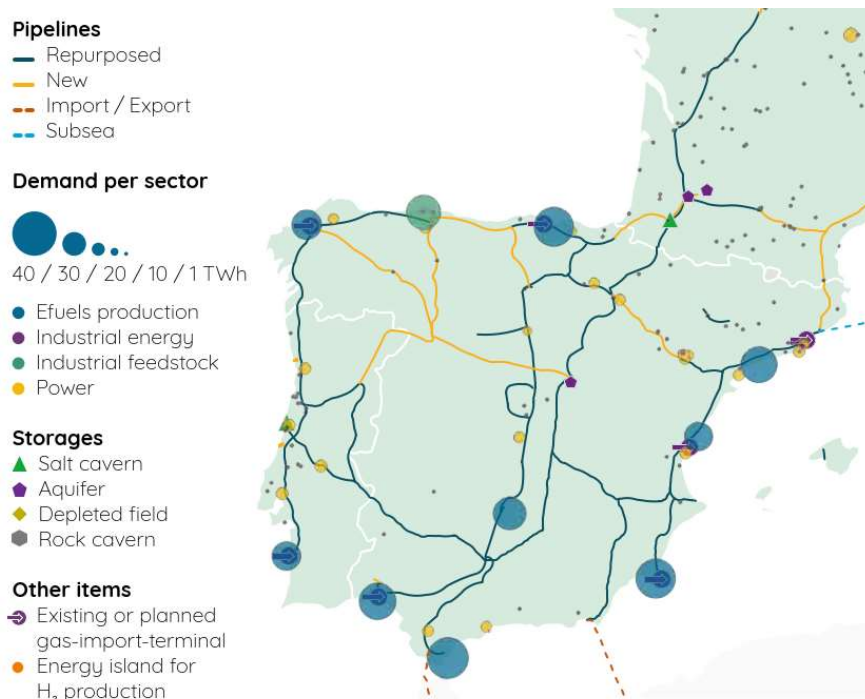


Figura 4 Corredor de hidrógeno previsto para 2040

4. DERIVADOS DEL HIDRÓGENO VERDE

Como otro uso sostenible muy importante a destacar del hidrógeno verde, es la fabricación de derivados, como el **metanol renovable** o el **amoniaco limpio**. Estos son los derivados del hidrógeno renovable que muestran una mayor proyección de futuro, que actualmente son también dos de las “*commodities*” químicas más importantes globales, por lo que ya existe un mercado desarrollado de ambos.

Actualmente los procesos de producción de ambos están basados en el consumo de combustibles fósiles, principalmente gas natural. En el caso del metanol, produciendo gas de síntesis mediante el reformado de gas natural, y en el caso del amoniaco, también mediante el reformado de gas natural, pero en este caso orientado a la producción de hidrógeno mediante una reacción de desplazamiento por agua posterior (WGSR – *Water Gas Shift Reaction*).

Como conclusión a lo que se describirá a continuación, tanto el metanol renovable como el amoniaco limpio son las mejor posicionados para convertirse en los combustibles renovables de referencia en muchas aplicaciones, principalmente en el sector marítimo, o como portadores energéticos, que pueden ser utilizados directamente o para volver a producir hidrógeno en destino. También su producción renovable puede sustituir a la producción como materia prima a partir de combustibles fósiles. Sin embargo y, como cabía esperar, el coste de producción es más elevado que los actuales de origen fósil.

4.1 METANOL RENOVBABLE

El metanol es una de las principales “*commodities*” químicas del mundo. Se producen aproximadamente unos 100 millones de toneladas al año. Su principal aplicación actual es la producción de formaldehído, ácido acético y metil ter-butil éter (MTBE), que es utilizado para aumentar el índice de octano en gasolinas. Actualmente, casi la totalidad de la producción es a partir de combustibles fósiles, principalmente gas natural.

Aparte de estas aplicaciones habituales del metanol, también puede utilizarse como combustible renovable. Esta segunda aplicación puede extenderse enormemente en los próximos años como protagonista de la transición energética.

El metanol es un compuesto químico que se puede utilizar para almacenar hidrógeno, ya que se puede utilizar como un combustible para abordar la descarbonización del sector marítimo o como una materia prima para la producción de hidrocarburos sintéticos (SAF, *Sustainable Aviation Fuel*) para descarbonizar la aviación.

La mayor parte del metanol se produce actualmente a partir de gas natural o carbón, con unas emisiones anuales estimadas de 0,3 GtCO₂, alrededor del 10% del total de emisiones de CO₂ del sector químico y petroquímico. Por tanto, abordar las emisiones de producción de metanol es una pieza clave de la descarbonización del sector químico y podría contribuir a la

descarbonización del sector del transporte, donde el metanol puede utilizarse como combustible.

La producción anual mundial de metanol casi se duplicó durante la última década para alcanzar unas 98 Mt en 2019. Una gran parte de ese crecimiento provino de China mediante la producción de metanol a partir de carbón. Se espera que la demanda de metanol siga aumentando hasta alcanzar más de 120 Mt en 2025 y 500 Mt en 2050¹⁰.

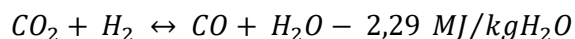
4.1.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL METANOL RENOVABLE

Hasta ahora el metanol se ha producido mediante la reacción de Fischer–Tropsch, en el que se presuriza gas de síntesis (CO+H₂, o una mezcla que también incluye CO₂) y se hace reaccionar en presencia de un catalizador, con la siguiente reacción exotérmica:

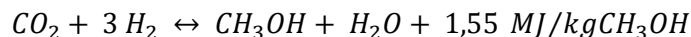


Los reactores y los catalizadores para esta síntesis están ampliamente estudiados. El gas de síntesis se produce habitualmente a partir de reformado con vapor de combustibles fósiles, habitualmente metano, y contiene una pequeña concentración de CO₂. El catalizador utilizado es convencional Cu/ZnO/Al₂O₃, y la reacción tiene lugar entre 50 y 100 bar, entre 200 y 300°C.

La síntesis de metanol a partir de CO₂ es menos exotérmica que a partir de CO, ya que implica una segunda reacción de formación de H₂O. Esta reacción de formación de H₂O se conoce como reacción inversa de agua (RWGSR, *Reverse Water Gas Shift Reaction*):



Esta reacción permite producir CO a partir de CO₂, pero consumiendo una molécula de hidrógeno y energía, y produciendo una molécula de agua. Esta molécula de CO producida reacciona con dos moléculas de H₂ siguiendo la reacción de Fischer–Tropsch mostrada más arriba. La reacción global es la siguiente:



Las condiciones de operación del reactor catalítico para la producción de e-metanol a partir de CO₂ difiere de las adecuadas para la producción de CO. La composición del catalizador también se debe mejorar para evitar los problemas producidos por la formación de agua.

Pero estos no son los únicos procesos de producción de metanol. En la Figura 5 se muestra un esquema de los procesos de producción de metanol, desde el metanol verde o renovable, hasta el marrón a partir de combustibles fósiles, con los distintos grados de intensidad de carbono¹⁰.

¹⁰ <https://www.irena.org/publications/2021/Jan/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol>

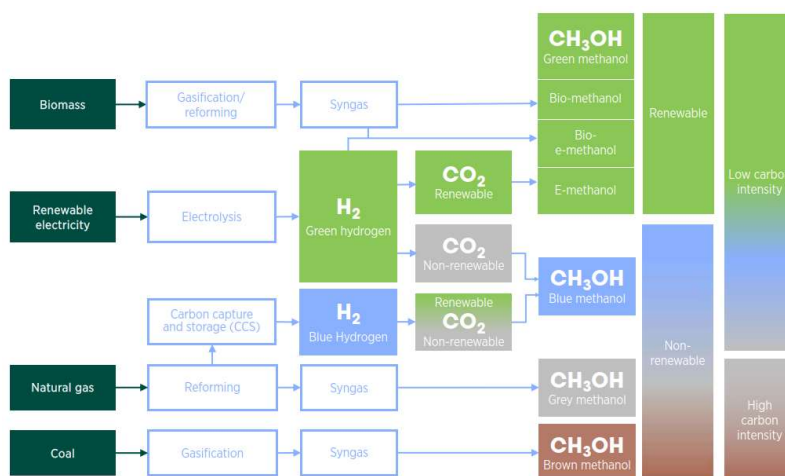


Figura 5 Procesos de producción de metanol

4.1.1 COSTES DE LA CADENA DE VALOR DEL METANOL RENOVABLE

Los costes de producción del metanol renovable son significativamente más altos que los de la producción actual de metanol a base de gas natural y carbón, cuyo coste de producción es de entre 100 y 250 USD/t). Con las bajadas del coste de las materias primas y con mejoras en la producción, el coste de producir metanol renovable a partir de la gasificación de biomasa o residuos sólidos urbanos, o bien a partir de CO_2 e hidrógeno renovable, podría aproximarse al coste y el precio actuales del metanol obtenido a partir de combustibles fósiles, como se muestra en las Figura 6 y Figura 7 ¹⁰.

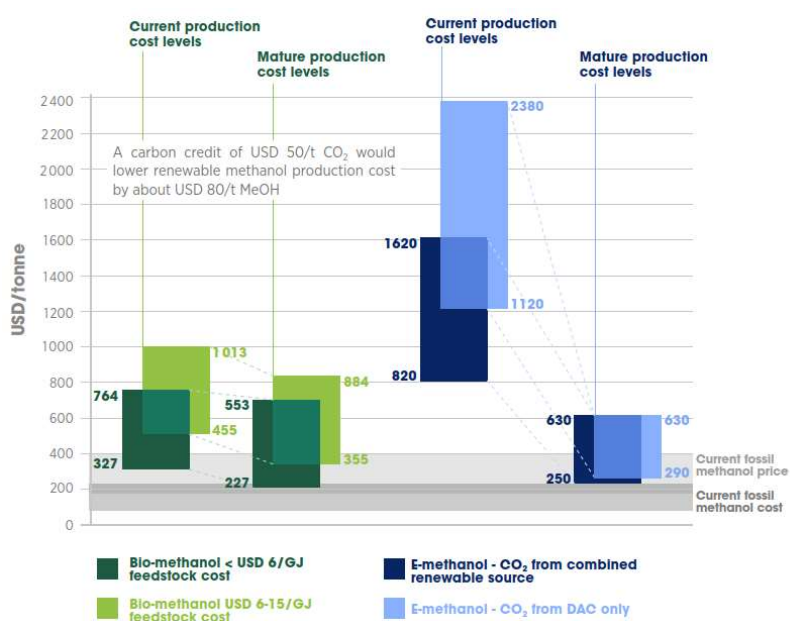


Figura 6 Costes actuales y futuros de producción de bio y e-metanol

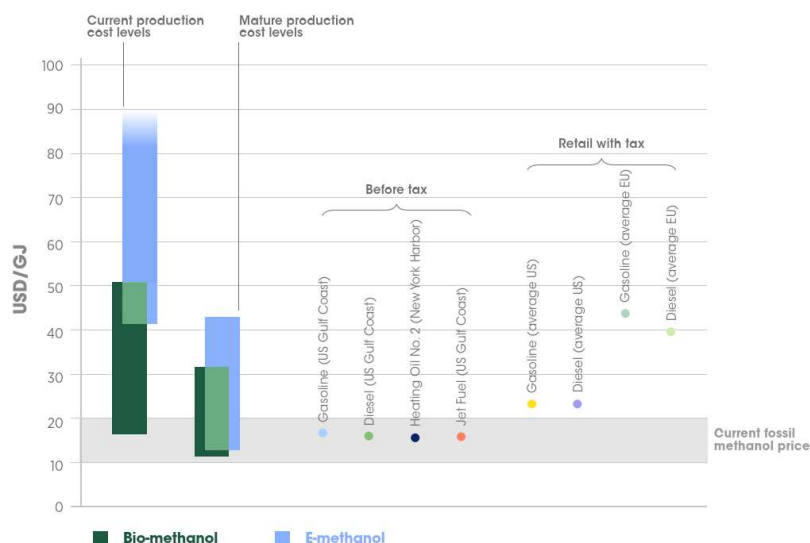


Figura 7 Comparación del coste de producción del metanol renovable y no renovable

4.2 AMONIAO RENOVABLE

El proceso de producción de amoníaco habitual en la industria química actualmente es mediante la reacción entre hidrógeno y nitrógeno, conocida como reacción de Haber-Bosch. En el proceso habitual el hidrógeno se produce a partir del reformado con vapor del gas natural, emitiendo unas dos toneladas de CO₂ por cada tonelada producida de amoníaco.

Aproximadamente el 70% de la producción de amoníaco se dedica a la producción de fertilizantes, y el resto a la fabricación de plásticos, explosivos y fibras sintéticas. Gracias a los fertilizantes fabricados a partir de amoníaco se ha podido aumentar la producción agrícola del mundo para poder alimentar a toda la población.

El amoníaco también se puede utilizar como combustible libre de carbono, por lo que se está mostrando como una opción para descarbonizar distintos sectores en los que se requiere un portador energético. Por ello, actualmente se está desarrollando esta aplicación como combustible gracias al crecimiento de su producción a partir de hidrógeno renovable por su potencial aplicación como portador energético.

Una de las aplicaciones principales como portador energético es su aplicación en la descarbonización del sector marítimo, utilizándolo como combustible en los buques. También puede ser utilizado como portador energético para poder volver a producir hidrógeno mediante su craqueo en destino. La razón del potencial del amoníaco es que puede ser almacenado, transportado y distribuido más fácilmente que el propio hidrógeno.

La previsión del mercado mundial del amoníaco en 2050¹¹ se muestra en la Figura 8. Se puede observar que las principales aplicaciones son agricultura e industria, combustible marítimo, portador de hidrógeno y generación de energía eléctrica.

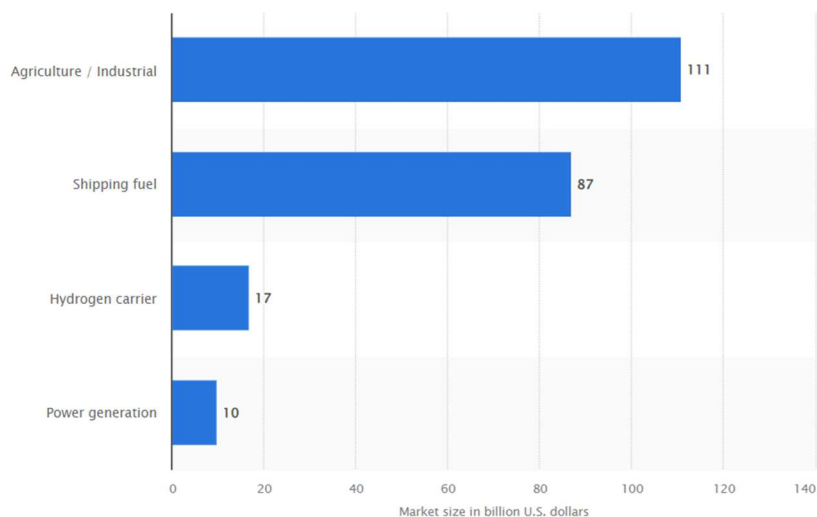


Figura 8 Aplicaciones del amoníaco en el mercado mundial en 2050

Además, el aumento de capacidad de producción prevista hasta 2050 estará basada en las plantas de producción de amoníaco renovable, alcanzando los dos tercios de la producción total en 2050¹², como se muestra en la Figura 9.

Para que el amoníaco sea considerado renovable se debe producir a partir de energías renovables con las que se obtiene hidrógeno mediante electrolisis del agua y nitrógeno separado del aire (también utilizando energía eléctrica de origen renovable). Este proceso no necesita gas natural para su producción, por lo que la disponibilidad de fertilizantes en Europa no dependerá de terceros países si se produce a partir de fuentes de energía renovables. El coste de producción del amoníaco renovable es superior al del amoníaco producido a partir de gas natural, pero se espera que se vaya aproximando en los próximos años.

La razón por la que el amoníaco renovable tiene una buena perspectiva es debido a que dispone de algunas características que le hacen más adecuado que el propio hidrógeno renovable del que se parte para su producción. Evidentemente, producir amoníaco requiere de una planta adicional a la de producción de hidrógeno renovable, que conlleva también un consumo de energía.

¹¹ <https://www.statista.com/statistics/1345795/forecast-global-ammonia-market-size-by-application/>

¹² <https://www.topsoe.com/processes/green-ammonia>

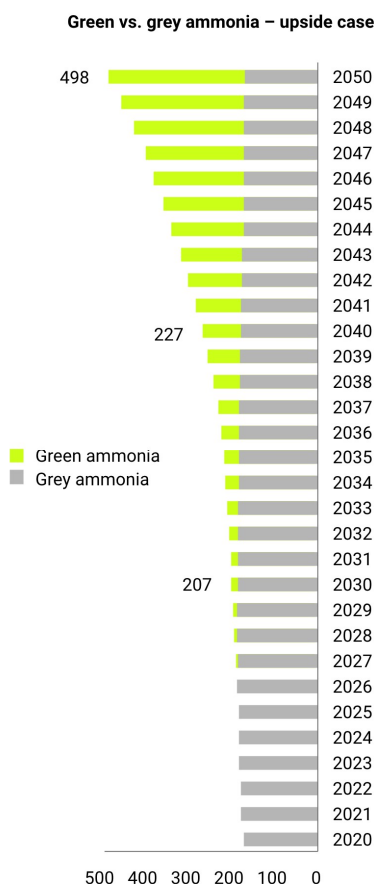


Figura 9 Previsión de la producción de amoníaco renovable y no renovable en 2050

Tanto el amoníaco como el hidrógeno renovable son alternativas sostenibles a los combustibles fósiles, pero el amoníaco dispone de algunas ventajas respecto al hidrógeno que pueden compensar la inversión y el consumo de energía en su producción:

- El amoníaco es más fácil de transportar y almacenar, y dispone de una densidad energética superior al hidrógeno, por lo que le hace adecuado para su uso, por ejemplo, en transporte marítimo. El amoníaco es líquido a $-33,4^{\circ}\text{C}$ a presión atmosférica, mientras que el hidrógeno es líquido a $-252,9^{\circ}\text{C}$ a presión atmosférica.
- Para ambos existen tecnologías en desarrollo que permitan su utilización en la generación de energía en muy pocos años, el amoníaco con su utilización directa en motores de combustión, y el hidrógeno en pilas de combustible. Ambas tecnologías están ya disponibles comercialmente.

En las aplicaciones en que estas ventajas sean necesarias se preferirá la utilización de amoníaco renovable. En las aplicaciones en que se puede utilizar directamente hidrógeno renovable, éste será el que se consuma, y de este modo, evitar el proceso de producción de amoníaco.

Para la utilización del amoniaco en motores de combustión interna se debe tener en cuenta que su combustión es más lenta y que es más difícil de prender, por lo que es habitual tener recurrir a pequeñas dosis de gasóleo o hidrógeno para su funcionamiento. Los motores de amoniaco, como casi cualquier motor de combustión interna, también producen óxidos de nitrógeno, que también es un potente gas de efecto invernadero. Los principales fabricantes de grandes motores de combustión, por ejemplo, para el sector marítimo, están desarrollando motores de combustión de amoniaco.

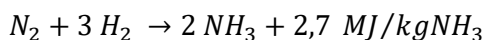
Una muestra de la aplicación del amoniaco como combustible es el desarrollo que actualmente se está llevando a cabo de motores para barcos que utilicen como combustible el amoniaco, como es el caso de MAN, que prevé tener disponible un motor de dos tiempos de amoniaco para 2024¹³. Pero para conseguir tener a punto esta tecnología es necesario superar dos retos: la alta energía de ignición requerida para la combustión del amoniaco en un motor de combustión interna; y los problemas de seguridad del manejo del amoniaco a bordo.

4.2.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL AMONIACO RENOVABLE

A diferencia con la producción de amoniaco gris, en la que se emite CO₂ en el proceso de reformado del metano para la obtención de hidrógeno, en la producción de amoniaco renovable no se emite CO₂ ya que ese hidrógeno proviene de la electrolisis de agua alimentada de energía eléctrica renovable, habitualmente fotovoltaica y/o eólica.

Adicionalmente, en el proceso es necesario disponer de nitrógeno como segundo reactivo, que se suele obtener por separación del mismo del aire. Cuando las plantas de producción son de escala industrial, esta separación del nitrógeno del aire se lleva a cabo mediante separación criogénica.

Posteriormente, ambos reactivos se envían al reactor catalítico en el que tiene lugar la reacción de Haber-Bosch de producción de amoniaco:



Las condiciones de operación de esta reacción son a una temperatura entre 300 y 550°C y una presión entre 150 y 250 bar. La conversión es de sólo entre el 15 y el 30%. La reacción de formación es exotérmica, cediendo una energía de 2,7 MJ/kgNH₃. Posteriormente a esta etapa de reacción se dispone de los equipos necesarios para la separación del amoniaco ya formado de los reactivos para poderlos conducir de nuevo al reactor de síntesis. Esta separación se basa en que el amoniaco se puede condensar más fácilmente que los reactivos. Un esquema de la cadena de valor del amoniaco verde se muestra en la Figura 10¹⁴. La producción de amoniaco

¹³ <https://www.man-es.com/discover/two-stroke-ammonia-engine>

¹⁴ <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120845>

renovable se encuentra en sus primeras fases y se necesitarán importantes inversiones e infraestructuras para ampliarla.

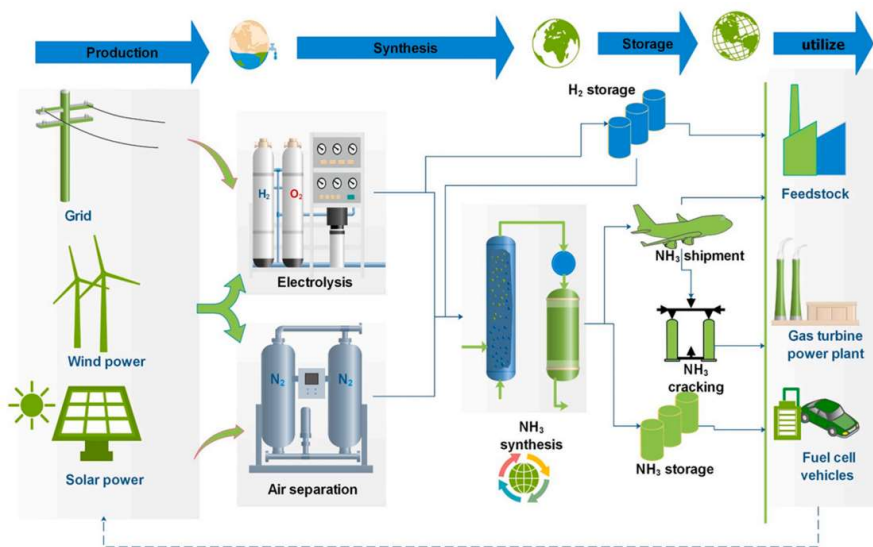


Figura 10 Esquema de la cadena de valor de amoníaco renovable

4.2.2 COSTES DE LA CADENA DE VALOR DEL AMONIACO RENOVABLE

Mientras el precio del gas natural y de las emisiones de CO₂ se mantengan a precios bajos, la producción de amoníaco a partir del reformado con vapor del gas natural se mantendrá como la opción más económica.

La incorporación de tecnologías de captura de CO₂ en el proceso de reformado de metano con vapor para producir amoníaco azul hace aumentar el consumo de gas natural, por la energía requerida en el proceso de captura de CO₂. Esta captura permite reducir un 90% de las emisiones en este proceso, pero no las emisiones en la extracción del gas natural, por lo que se sigue emitiendo entre un 60 y un 85%¹⁵.

En el caso de la producción de amoníaco verde, es necesaria la producción de hidrógeno mediante electrolisis, y la separación del nitrógeno del aire de la atmósfera. Ambos procesos consumen energía eléctrica. El coste de la energía eléctrica representa el 85% del coste de producción del amoníaco verde. La Figura 11 muestra el coste de producción del amoníaco según el proceso (datos obtenidos de la IEA, *International Energy Agency*¹⁶). Se puede observar que el coste de producción del amoníaco verde ya es competitivo con el amoníaco azul con

¹⁵ <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/green-ammonia/green-ammonia-policy-briefing.pdf>

¹⁶ https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf

Entregable E.1.2

captura de CO₂. Los costes de producción pueden tener un amplio rango según las regiones donde se produce, por las diferencias en el coste del gas natural, y los recursos renovables disponibles. Además, debido a que la tecnología de producción de amoníaco verde depende enormemente del coste de producción de energía renovable, pudiendo aumentar hasta 6 veces el coste de producción. Los costes más bajos de producción del amoníaco verde se obtienen en zonas en las que se dispone de buen recurso solar con alta irradiancia media y con recurso eólico terrestre, como es el caso de la Península Ibérica. También en zonas de buen recurso eólico marino, como es el Reino Unido. El coste de producción del amoníaco se puede estimar en 190€/tNH₃ para el de origen fósil sin captura, de 220€/tNH₃ para el amoníaco azul y de 265€/tNH₃ para el amoníaco verde.

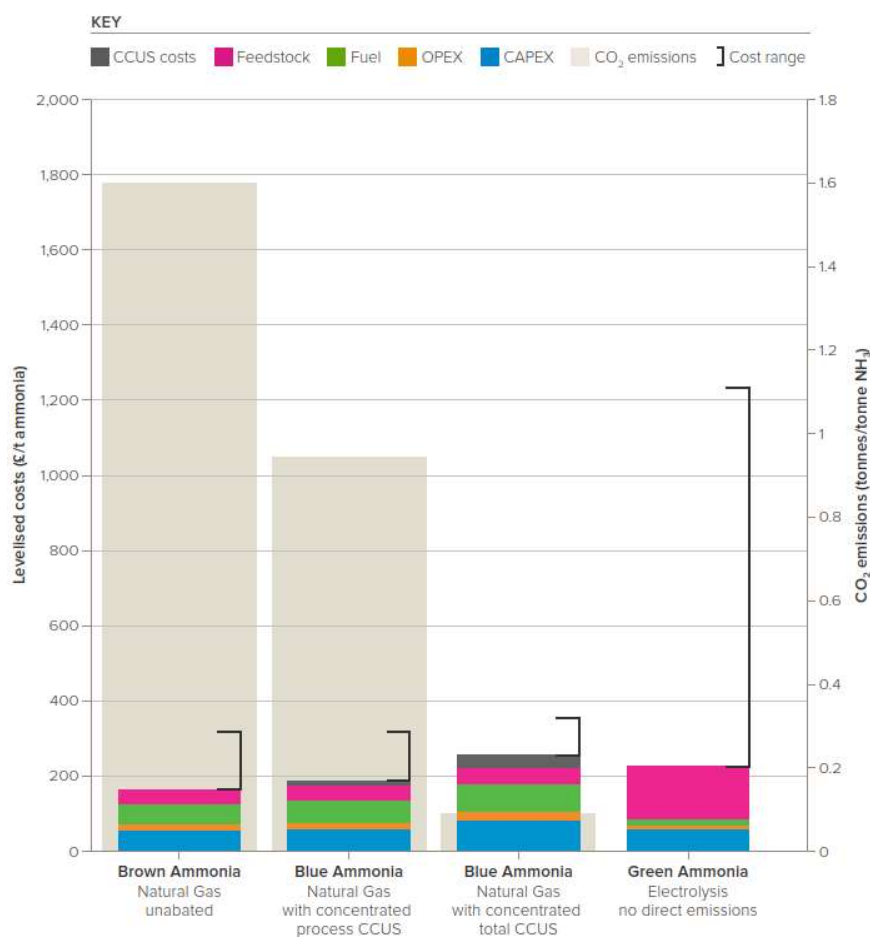


Figura 11 Comparación de costes de la producción de amoníaco por distintos métodos

El almacenamiento y el transporte del amoníaco se puede llevar a cabo de dos modos: a presión atmosférica por debajo de su temperatura de licuación de -33,4°C; o a temperatura ambiente (hasta 30°C) a una presión superior a 11,7 bar abs. Estas condiciones son muy parecidas a las necesarias en el transporte de los gases de petróleo licuado (LPG).

5. APLICACIONES Y COMPETIDORES DEL HIDRÓGENO EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

En el marco de la transición energética global, el hidrógeno verde emerge como un vector energético clave, prometiendo revolucionar cómo generamos, almacenamos y utilizamos energía. Mientras los gobiernos y las industrias se esfuerzan por alcanzar objetivos ambiciosos de descarbonización, el hidrógeno verde se posiciona estratégicamente para desempeñar un papel multifacético en sectores diversos como la manufactura, el transporte y la generación de energía. Este capítulo muestra diversas aplicaciones relevantes del hidrógeno verde a corto y medio plazo, al mismo tiempo que analiza cómo el hidrógeno se compara y compite con otras fuentes de energía renovable, identificando las áreas donde su aplicación podría ser más impactante y eficaz.

5.1 APLICACIONES DEL HIDRÓGENO VERDE

Las aplicaciones del hidrógeno verde se pueden agrupar del siguiente modo:

- Aplicaciones en las que sustituye al hidrógeno azul, gris o marrón en los procesos industriales en los que se utiliza como materia prima.
- Aplicaciones en las que sustituye otro combustible fósil.
- Aplicaciones para la producción de combustibles renovables.

Adicionalmente, en cada uno de los sectores de la economía, las aplicaciones pueden ser las siguientes:

5.1.1 SECTOR DEL METAL

El hidrógeno verde tiene varias aplicaciones potenciales en el sector del metal, gracias a su versatilidad y su capacidad para actuar como una fuente de energía limpia y como un agente reductor en procesos metalúrgicos. Estas son sus dos principales aplicaciones en el sector del metal:

- Su capacidad de generar altas temperaturas.
- Su utilización como reductor en lugar de combustibles fósiles, para producir H₂O en lugar de CO₂.

Algunas aplicaciones importantes son las siguientes:

- **Producción de acero verde:** El hidrógeno verde se puede utilizar como agente reductor en la producción de acero, reemplazando parcial o totalmente las fuentes de producción no renovables. Esto permite la producción de "acero verde", que tiene una

menor huella de carbono y contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en la industria del acero¹⁷.

- **Soldadura y corte:** El hidrógeno se utiliza comúnmente en la soldadura y el corte de metales. El hidrógeno verde puede ser una alternativa más sostenible al hidrógeno generado a partir de combustibles fósiles para estas aplicaciones, ya que su producción no emite CO₂¹⁸.
- **Fabricación de metales no ferrosos:** En la producción de metales no ferrosos como aluminio, cobre y titanio, el hidrógeno verde puede utilizarse como una fuente de energía limpia y como agente reductor en procesos metalúrgicos.
- **Tratamiento térmico:** El hidrógeno verde puede emplearse en el tratamiento térmico de metales para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, como la resistencia, la dureza y la durabilidad¹⁹.
- **Generación de energía:** El hidrógeno verde también puede utilizarse como combustible en procesos de generación de energía para alimentar maquinaria y equipos utilizados en la industria del metal, proporcionando una alternativa limpia y renovable a los combustibles fósiles.

En resumen, el hidrógeno verde ofrece una serie de aplicaciones prometedoras en el sector del metal, desde la producción de acero verde hasta el tratamiento térmico y la generación de energía, lo que contribuye a la reducción de las emisiones de carbono y promoviendo una industria más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

5.1.2 SECTOR INDUSTRIAL

En el sector industrial el hidrógeno tiene también distintas aplicaciones, principalmente en la industria química, en la que es materia prima para algunos procesos:

- **Industria petroquímica:** en la que se suelen llevar a cabo procesos de hidrogenación. Es el proceso por el que se añade hidrógeno a moléculas orgánicas insaturadas. Este proceso se lleva a cabo mediante reacción química de la molécula diatómica del hidrógeno en presencia de un catalizador en condiciones de presión y temperatura elevadas.
- **Industria alimentaria:** para la hidrogenación de grasas. De un modo similar a la aplicación anterior, este proceso se utiliza para hidrogenar los aceites vegetales para transformarlos en grasas sólidas, mediante una reacción catalítica a presión y temperatura elevada.
- **Producción de combustibles renovables:** el hidrógeno renovable es en sí un combustible renovable, pero presenta algunas dificultades en su manejo, transporte y

¹⁷ <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/acero-verde>

¹⁸ <https://academy.dpsys.com.mx/el-hidrogeno-verde/>

¹⁹ <https://www.carbueros.com/gases/hydrogen-for-metals-and-materials-processing>

almacenamiento. Por esta razón, se está desarrollando toda una industria para transformarlo en combustibles renovables con mejores características para su manejo. Estos combustibles renovables son el amoniaco, el metanol y el SAF (*Sustainable Aviation Fuel*). Los dos primeros son soluciones para el transporte marítimo, y el tercero para aviación.

5.1.3 SECTOR MINERO

El sector minero es intensivo en el consumo de energía, tanto en la extracción, consumiendo principalmente gasóleo para la operación de la maquinaria; como en el procesado del mineral, principalmente eléctrica y en ocasiones de combustibles fósiles para el secado o procesos metalúrgicos.

La dificultad de la descarbonización de este sector es que opera en un mercado global, en el que el parámetro principal es el coste de producción, por lo que no se puede asumir un sobrecoste por hacer el proceso bajo en carbono.

La aplicación del hidrógeno en este sector será principalmente como combustible de la maquinaria dedicada a la extracción, y al transporte hasta el puerto más cercano. En el procesado ya se utiliza energía eléctrica. Para procesos de secado se podrán utilizar soluciones como las que se indican en la sección 5.2.1.

5.1.4 TRANSPORTE POR CARRETERA

El transporte consume aproximadamente un **39% de la energía final de España**, y la mayor parte de esta energía procede del petróleo, lo que implica que el transporte es responsable de una parte relevante de las emisiones de los gases efecto invernadero: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O); que contribuyen al cambio climático. El transporte supuso en 2019 el 29,6% del total de estas emisiones de gases de efecto invernadero en España²⁰.

La **descarbonización del transporte** implica la sustitución del consumo de combustibles fósiles por otras fuentes de energía, entre las que se encuentra el hidrógeno renovable, aunque no es la única opción, ya que dependerá de cada una de las aplicaciones. En la Figura 12 se muestra las aplicaciones en que se prevé se utilizará el hidrógeno renovable como combustible, y las aplicaciones en que se preferirá otro tipo de combustible renovable o la electrificación directa²¹.

El potencial que representa el sector del transporte para el sector de producción de hidrógeno renovable es enorme, ya que, como se ha comentado anteriormente, es responsable del 39% del consumo final de energía.

²⁰ https://otle.transportes.gob.es/monografico/descarbonizacion_transporte_julio_2023/indice

²¹ <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/06/Hydrogen-Council-Vision-Document.pdf>

Respecto al coste del combustible para el transporte por carretera, el precio actual del hidrógeno renovable es equivalente al del gasóleo, ya que, se pueden recorrer los mismos kilómetros con un kilogramo de hidrógeno que con cinco litros de gasóleo. El precio del camión con pila de combustible si es superior a un convencional diésel.

Por último, se debe tener en cuenta que en los primeros años del desarrollo del sector del hidrógeno verde la logística del mismo todavía será complicada debido a la ausencia de infraestructuras de transporte, por lo que el hidrógeno renovable será transportado en gran medida por carretera.

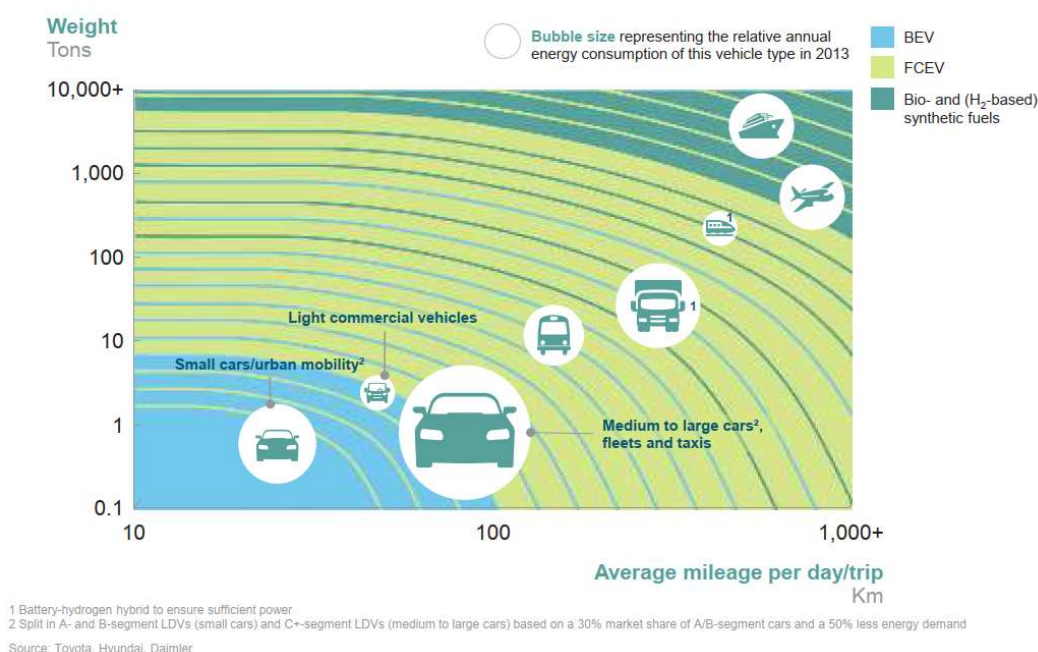


Figura 12 Previsión de la aplicación de los vehículos de hidrógeno en la descarbonización del transporte

5.1.5 TRANSPORTE MARÍTIMO

La IMO (*International Maritime Organization*) dispone de una estrategia para reducir la emisión de los gases de efecto invernadero del transporte marítimo internacional de al menos el 20% y con el objetivo del 30% en 2030; así como de al menos el 70% y con el objetivo del 80% en 2050,

en comparación con 2008²². Esto implica ir sustituyendo progresivamente los combustibles de origen fósil por combustibles de origen renovable.

El caso del transporte marítimo es distinto al del transporte por carretera por la necesidad en gran parte del sector de grandes autonomías entre puertos, lo que obliga a disponer de una densidad energética suficiente, y que el volumen y carga ocupados en el barco por el combustible no reste demasiada carga útil.

En el caso del transporte marítimo casi se descartan por completo los buques a baterías, y el hidrógeno comprimido sólo podría tener aplicación en los buques de tráfico doméstico. Por tanto, los combustibles que tienen potencial para convertirse en referencia en el futuro son combustibles como el amoníaco y el metanol.

Los combustibles de origen renovable se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- **Combustibles azules**, producidos a partir de combustibles fósiles, pero con captura de CO₂ en su proceso de producción.
- **Biocombustibles**, producidos a partir de materias primas biológicas y que son similares a los de origen fósil, por lo que su sustitución a bordo requiere de poca o ninguna modificación de los buques. Ejemplos de estos combustibles son el biometano o el biodiesel, producidos a partir de residuos biogénicos.
- **Electro-combustibles**, que son producidos a partir de energía eléctrica renovable; con nitrógeno en el caso del amoníaco; o con carbono fósil o biogénico en el caso del metanol.

El sector marítimo también tendrá una gran importancia en el transporte de los portadores energéticos como amoníaco y metanol. Ya existen algunos proyectos de este tipo, por ejemplo, el proyecto de CEPSA que prevé exportar hidrógeno verde mediante estos portadores energéticos que se producirán en su Parque Energético San Roque, cercano a la Bahía de Algeciras hasta Róterdam²³. Para este tipo de transporte serán necesarios buques diseñados específicamente, por lo que para el sector de astilleros tendrá una especial relevancia.

5.1.6 TRANSPORTE POR FERROCARRIL

Respecto al transporte por ferrocarril, teniendo en cuenta el alto porcentaje de la red que ya se encuentra electrificada, no tiene aplicación el hidrógeno renovable. Sin embargo, hay una parte de la red que sólo está electrificada parcialmente, y en esos casos la tecnología de pila de combustible puede tener una oportunidad, compartirían los equipos de propulsión eléctrica, y

²² <https://www.imca-int.com/imos-ghg-strategy/#:~:text=The%202023%20IMO%20GHG%20Strategy,by%202030%2C%20compared%20to%202008.>

²³ <https://www.cepsa.com/es/prensa/primer-corredor-de-hidrogeno-verde>

sólo cambiaría el origen de la electricidad: de la catenaria, en los tramos electrificados de la red, y de la pila de combustible en los tramos no electrificados. En cualquiera de los casos, sólo sustituiría a las locomotoras diésel actuales.

El sector del ferrocarril también es un sector que puede transportar los nuevos portadores energéticos hasta los puertos más cercanos. Una infraestructura de transporte de hidrógeno comprimido sí está en planes y proyectos de hidrodutos, pero no de amoníaco, metanol, o incluso, CO₂. Probablemente existirán redes locales para conectar plantas de producción con puertos cercanos, pero las plantas más alejadas ya están incluyendo en sus proyectos andenes de carga de estos combustibles renovables. Por tanto, es previsible que se deban construir vagones de carga adaptados a las condiciones de transporte de los distintos productos.

5.1.7 AVIACIÓN

El sector aeroespacial se encuentra muy desarrollado sobre el territorio nacional, representando el 1,5% total del PIB, y otorgando más de 47 600 puestos de trabajo. Estas altas cifras, son debidas a una fuerte política de inversión en I+D, que han conseguido un crecimiento en el sector del 82,2% desde 2011.

Además de ello, el sector aeroespacial se considera estratégico debido a que está ligado al desarrollo socioeconómico de los países, y que su valor añadido va más allá de la facturación generada o el empleo neto producido. En particular el sector se considera clave para la seguridad y defensa nacionales, impulsa el comercio y la cooperación internacional, realiza notables actividades de I+D+i y cuenta con una gran capacidad de generar empleo de alta cualificación. Asimismo, la sostenibilidad representa un hito trascendental en esta industria. Según el Sustainability Accounting, Management and Policy Journal, en los últimos 50 años, la demanda mundial de viajes aéreos ha aumentado en un 9 % anual y se prevé un crecimiento (a una tasa reducida del 3 al 7%) para los próximos 20 años, es decir, es un sector en aumento y que se está recuperando tras la pasada pandemia provocada por la COVID-19. Para poder seguir avanzando y afrontar los retos que están por venir, es necesario mantener al país en vanguardia y alineado con la estrategia medioambiental de la Unión Europea. Por ello, se hace imperativo continuar invirtiendo en investigación hacia un **avión más ecológico, verde y sostenible**.

El **uso de hidrógeno verde** en la aviación está emergiendo como una de las **soluciones más prometedoras para reducir las emisiones** de gases de efecto invernadero en este sector. La aviación representa aproximadamente el **2% de las emisiones globales de CO₂** y está bajo presión creciente para descarbonizar.

El hidrógeno ofrece varias vías para esta transformación, incluyendo su uso como combustible directo para turbinas y como fuente de energía para pilas de combustible:

- **Combustión de Hidrógeno en Motores de Turbina:** la combustión directa de hidrógeno en turbinas es técnicamente viable y puede producir cero emisiones de CO₂ en el punto de uso. Esta tecnología podría ser implementada en las flotas existentes

con modificaciones significativas, permitiendo una transición más rápida hacia un transporte aéreo menos contaminante.

- **Tecnología:** El hidrógeno puede ser quemado en motores de turbina similares a los que se usan hoy en día con queroseno, pero con modificaciones para manejar las altas temperaturas y la velocidad de la llama del hidrógeno.
- **Ventajas:** Produce cero emisiones de carbono en el punto de uso y puede reducir significativamente la dependencia de combustibles fósiles.
- **Desafíos:** Requiere cambios en el diseño del motor y el almacenamiento a bordo debido a la baja densidad del hidrógeno, lo que plantea desafíos en términos de volumen y sistemas de contención de seguridad.

→ **Pilas de Combustible de Hidrógeno:** alternativamente, las pilas de combustible de hidrógeno pueden ser utilizadas para generar electricidad a bordo, alimentando motores eléctricos que impulsan las aeronaves. Esta opción ofrece una eficiencia energética superior y una operación más silenciosa, lo que es especialmente atractivo para aeronaves de corto alcance y vuelos regionales.

- **Tecnología:** Las pilas de combustible convierten el hidrógeno en electricidad a través de un proceso químico que combina hidrógeno y oxígeno, produciendo agua como único subproducto.
- **Ventajas:** Ofrece una operación más silenciosa y eficiente, ideal para aeronaves más pequeñas o drones.
- **Desafíos:** Aunque son eficientes, las pilas de combustible actualmente tienen limitaciones en términos de densidad de energía comparada con los combustibles líquidos convencionales, limitando su uso en vuelos largos.

→ **Desarrollos Recientes:** Airbus ha sido un pionero en este campo con el desarrollo de tres conceptos de aeronaves propulsadas por hidrógeno, conocidas como ZEROe, que podrían entrar en servicio para el año 2035. Estos conceptos incluyen un turbofan, un turboprop y un diseño "*blended-wing body*", todos alimentados por hidrógeno, mostrando el potencial del hidrógeno para transformar el diseño de aeronaves y operaciones de vuelo.

- **Proyectos de Airbus:** Estos aviones están diseñados para entrar en servicio alrededor de 2035, y se espera que cubran una gama de hasta 3 500 km, lo que los hace aptos para la mayoría de los vuelos continentales.
- **Iniciativas de Investigación:** Centros como el CATEC están involucrados en la investigación y desarrollo de componentes críticos como tanques de almacenamiento ligeros, sistemas de distribución de hidrógeno y medidas de seguridad relacionadas con el uso de hidrógeno a altas presiones y bajas temperaturas.

→ **Desafíos y Progreso:** A pesar de los avances, la transición a la aviación impulsada por hidrógeno enfrenta desafíos significativos, como la necesidad de desarrollar infraestructura de suministro y almacenamiento de hidrógeno en aeropuertos, la adaptación de la seguridad aeroportuaria para manejar hidrógeno y la viabilidad económica de operar vuelos con hidrógeno. Sin embargo, estudios recientes indican que, con políticas adecuadas y avances tecnológicos, el hidrógeno podría alimentar hasta el 40% del tráfico aéreo global para 2050, evitando la emisión de hasta 3 gigatoneladas de CO₂ al año.

- **Abastecimiento en Aeropuertos:** El desarrollo de infraestructura de hidrógeno en aeropuertos es crucial. Esto incluye la producción onsite, almacenamiento seguro, y facilidades de repostaje que cumplan con las regulaciones de seguridad aeroportuaria.
- **Inversiones y Cooperación Internacional:** La implementación a gran escala de hidrógeno en la aviación requerirá inversiones significativas, así como cooperación entre gobiernos, fabricantes de aeronaves, y proveedores de energía.

Para afrontar estos desafíos, la Iniciativa Conjunta "*Clean Aviation*" y "*Clean Hydrogen*", enfocada principalmente en tecnologías de aeronaves, opera bajo el impulso de la Comisión Europea, que reconoce el papel del hidrógeno como un vector esencial para la promoción del programa de Aviación Limpia, y son fundamentales en el respaldo al desarrollo de demostradores de aeronaves impulsadas por hidrógeno, previendo su entrada en servicio para 2035. Dr. Jean-François Brouckaert, líder tecnológico de la oficina de "*Clean Aviation*", destaca que el transporte aéreo impulsado por hidrógeno representa una prometedora solución para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y minimizar el impacto climático de la aviación. Dicha iniciativa busca proactivamente alternativas para fomentar una aviación más sostenible en el contexto internacional. Las industrias aeronáuticas y del hidrógeno trabajan conjuntamente para avanzar hacia este objetivo, viendo los aviones impulsados por hidrógeno como una solución viable para alcanzar la neutralidad climática de Europa para 2050, conforme al Pacto Verde Europeo.

Sin embargo, el uso del hidrógeno como combustible enfrenta desafíos significativos debido a sus propiedades fluidas y su impacto en los sistemas aeronáuticos, actualmente optimizados para combustibles convencionales. Estos retos demandan un considerable esfuerzo investigativo para hacer viable esta tecnología en el mercado. El hidrógeno se diferencia de los syngases en que es un combustible de cero carbonos, mientras que los syngases solo alcanzan un estado de cero carbono 'neto'. Ambos métodos requieren que las fuentes de energía utilizadas en su producción sean renovables, tales como la energía solar o eólica y la electrólisis para el hidrógeno. Para los syngases, se presume además que el carbono se captura directamente del aire o mediante procesos industriales. La producción de hidrógeno verde, por su parte, necesitará de una gran cantidad de energía eléctrica y de agua.

Asimismo, mientras "*Clean Aviation*" se centra en las tecnologías de aeronaves, cuestiones como la producción eficiente y ecológica, el almacenamiento industrial, la licuefacción y la distribución son gestionadas por la Iniciativa Conjunta de Hidrógeno Limpio, asegurando un enfoque integral y colaborativo en la transición hacia una aviación limpia y sostenible.

En conclusión, el hidrógeno verde tiene el potencial de reducir drásticamente las emisiones de la aviación, contribuyendo a los objetivos globales de reducción de gases de efecto invernadero y mejora de la sostenibilidad en el transporte aéreo.

5.2 COMPETIDORES DEL HIDRÓGENO VERDE

El hidrógeno renovable tiene reservado un papel importante en la transición energética hacia menores emisiones de gases de efecto invernadero, pero no se utilizará en todas las aplicaciones posibles ya que tendrá algunos competidores con mejores costes o eficiencias. En dichas aplicaciones, el hidrógeno renovable no tendrá una presencia importante.

5.2.1 ENERGÍA RENOVABLE. ELECTRIFICACIÓN

El hidrógeno renovable se produce a partir de energía eléctrica renovable, mediante electrolisis. Este proceso permite transformar energía eléctrica en energía química. Este es el esquema energético cuando la energía primaria es eléctrica (como es el caso de la energía renovable) y es necesaria la energía química en otros procesos. Este proceso está sujeto a una determinada eficiencia energética de aproximadamente el 70%, es decir, la energía contenida en el hidrógeno es menor que la energía eléctrica de la que se partía.

Sin embargo, en el esquema energético convencional, la energía eléctrica se produce a partir de la energía química contenida en los combustibles fósiles; y de igual modo, con una determinada eficiencia (en general, entre el 35 y el 55%), por lo que la energía eléctrica disponible será menor que la energía de partida. Por esta razón, se prefería utilizar energía a partir de combustibles fósiles directamente, y sólo se consumía electricidad en los procesos en los que no se podía sustituir directamente por los combustibles fósiles, por ejemplo, nunca en procesos de calor.

En el momento actual, en el que se debe reducir el consumo de combustibles fósiles, y aumentar el consumo de energías renovables, se tenderá a electrificar todos los procesos posibles. La electrificación se introducirá en procesos en los que antes se consumía gas natural u otros combustibles fósiles. El hidrógeno sólo sustituirá al gas natural o a otros combustibles fósiles en los procesos en los que no se pueda sustituir directamente por la energía eléctrica, ya sea por la necesidad de hidrógeno como materia prima, por la necesidad de alcanzar una temperatura elevada en el proceso, o por la necesidad de disponer de la energía almacenada y con capacidad de ser transportada.

Actualmente ya se están aplicando tecnologías que hasta ahora eran anecdóticas, por ejemplo:

→ **Bombas de calor:** se están aplicando cada día en más aplicaciones como, por ejemplo, la calefacción residencial, e incluso para la producción de vapor en la industria, si se

dispone de una fuente de calor residual. En este caso, se puede producir entre 3 y 6 veces más de energía térmica que la energía eléctrica que se consume.

- **Almacenamiento térmico:** ya se están desarrollando sistemas de almacenamiento térmico con consumo directo de electricidad. De este modo, se puede almacenar la energía renovable no gestionable para producir vapor de proceso de un modo totalmente gestionable. Además, pueden ofrecer servicios de estabilidad de red eléctrica con su consumo totalmente variable de energía eléctrica de la red.
- **Movilidad:** en los casos en los que sea posible, la electrificación será preferible a la utilización del hidrógeno. La eficiencia de un vehículo eléctrico es del 90-95%, mientras que la eficiencia de un vehículo de hidrógeno será el resultado de la eficiencia en la producción del hidrógeno (aproximadamente un 70%) y la eficiencia en la pila de combustible en el vehículo (aproximadamente un 50%). Es decir, la eficiencia global es de un 35% en un vehículo de hidrógeno. En las aplicaciones en las que, por rapidez de repostaje, o por autonomía, sea inviable la solución eléctrica se tomará la solución mediante hidrógeno, pero sólo en esas aplicaciones.

5.2.2 BIOMETANO

Como se ha comentado en la sección anterior, el hidrógeno sólo sustituirá al gas natural de origen fósil en algunos casos. En otros casos, será el biometano de origen biogénico el que lo sustituirá. El biometano dispone de la ventaja sobre el hidrógeno que tanto la red de distribución, como los equipos que lo consumen y los clientes son los mismos que los actuales de gas natural de origen fósil, por lo que la sustitución es inmediata y sin ningún tipo de adecuación de la red o los equipos.

Según la Hoja de Ruta del Biogás de España, publicada en 2022 por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico²⁴ se incluía un objetivo muy poco ambicioso de alcanzar una producción de biogás en 2030 de tan solo 10,4 TWh. Sin embargo, el IDAE, ya en 2011 estimaba un potencial accesible de residuos que podrían aprovecharse para la producción de biogás de hasta 27 TWh/año²⁵.

Pero en 2023 en el “Estudio de la capacidad de producción de biometano en España”, elaborado por la Asociación Española del Gas, SEDIGAS, en colaboración con PwC y la consultora especializada BIOVIC²⁶, se indica que *“el biometano se perfila como una de las grandes claves, no solo para la transformación del mix energético a corto plazo, sino también para avanzar hacia*

²⁴ https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/es-es/Novedades/Documents/00HR_Biogas_V6.pdf

²⁵

https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_11227_per_2011-2020_def_93c624ab.pdf

²⁶ <https://estudio-biometano.sedigas.es/wp-content/uploads/2023/03/sedigas-informe-potencial-biometano-2023.pdf>

la descarbonización de la economía”. En este estudio se estima que España cuenta con un potencial de producción de biometano de 163 TWh/año, lo que corresponde al 45% de la demanda nacional de gas natural.

El biometano tendrá un papel importante en la transición energética, ya que en los próximos años podría sustituir al gas natural de origen fósil hasta que las tecnologías basadas en hidrógeno renovable puedan implantarse adecuadamente con costes competitivos. Un ejemplo de esta transición es la producción de amoníaco para la fabricación de fertilizantes: una primera fase de la descarbonización estaría basada en el consumo de biometano, y en paralelo se hará la transición al hidrógeno renovable.

Se debe tener en cuenta que el biometano también se puede utilizar para descarbonizar la movilidad terrestre y como combustible del sector marítimo; en sustitución del gas natural de origen fósil.

Por último, la producción de biometano a partir de residuos de la agricultura y la ganadería también puede ser una oportunidad para la producción de hidrógeno verde, ya que en la purificación de biogás a biometano se separa el CO₂, que puede ser combinado con hidrógeno verde para producir más biometano, o metanol.

5.2.3 CAPTURA DE CO₂

Como ya se ha mencionado, el hidrógeno renovable es una de las vías de descarbonización, pero no la única. La captura de CO₂ es una tecnología que se desarrolló en los años 2000 para poder proporcionar una vía de descarbonización de las grandes instalaciones de combustión para generación de energía eléctrica, principalmente de carbón. Pero no llegaron a desplegarse y generalizarse en las centrales térmicas.

Sin embargo, en los últimos años se ha mostrado como una tecnología a incluir en algunos procesos en los que es difícil la descarbonización sin otro tipo de tecnología (por ejemplo, en el sector del cemento, en el que aproximadamente 2/3 de las emisiones de CO₂ son debidas al propio proceso de calcinación, y no al combustible utilizado).

La captura de CO₂ puede ser competencia del hidrógeno renovable, como ya se comentó en la sección 4, ya que se puede utilizar para producir metanol y amoníaco, por ejemplo, sin emitir CO₂ a la atmósfera; pudiendo producir estos dos compuestos bajos en carbono. Sin embargo, como se describió anteriormente, el coste de producción de estos productos químicos con captura de CO₂ se aproxima bastante al coste de su producción a partir de hidrógeno renovable, haciendo mucho más complejas las instalaciones, por lo que la captura de CO₂ sólo tendrá una importancia significativa de modo temporal en el proceso de descarbonización de estas industrias.

Por otro lado, es una tecnología que puede ser aliada del hidrógeno renovable, ya que el metanol producido a partir de CO₂ capturado de otras industrias, o de la combustión de

Entregable E.1.2

biomasa, es una materia prima para su producción. Por lo que, cuanto mayor sea la disponibilidad de CO₂ capturado, mayor será el potencial de producción de metanol a partir de hidrógeno renovable.

6. DAFO | ANDALUCÍA Y ALENTEJO

La Península Ibérica tiene todo lo necesario para convertirse en el centro de producción de hidrógeno de Europa²⁷, y como se expuso en la sección 3.1, Europa necesita hidrógeno.

Recientemente se ha publicado la resolución de la primera subasta del Banco Europeo del Hidrógeno²⁸, en la que se han seleccionado siete proyectos de producción de hidrógeno de toda Europa con un importe total de 720 M€, de los cuáles cinco proyectos son en la Península Ibérica: tres en España y dos en Portugal.

Este hecho indica claramente que **España y Portugal tienen ante sí la oportunidad única de comenzar la producción de hidrógeno renovable a gran escala**, ya que disponen de las siguientes ventajas que les dan un inmejorable punto de partida:

- Ya se dispone de una importante producción de energía eléctrica renovable; además de un enorme potencial de aumentarla en los próximos años gracias a la disponibilidad de terreno. La Península Ibérica dispone de recursos para la producción de energía solar y eólica, biomasa e incluso hidráulica.
- Una red eléctrica excepcionalmente flexible y bien conectada en toda la península. Esto significa que los electrones renovables pueden transportarse desde donde se produzcan hasta donde se consuman.
- Una distribución geográfica amplia de la generación renovable, lo que permite un suministro fiable y constante de electricidad para poder producir hidrógeno mediante electrolisis.
- Un gran potencial para producir biometano a partir de residuos agrícolas (como los huesos de aceituna), residuos ganaderos, biomasa procedente de la limpieza de bosques y otros residuos orgánicos.
- Demanda interna de hidrógeno, la cual ya es suficiente para justificar la construcción de las instalaciones de producción necesarias. Una vez construidas, los costes de expansión para exportar hidrógeno verde serán asumibles.
- Una infraestructura portuaria bien desarrollada, que pueden utilizarse para transportar hidrógeno y, sobre todo, sus derivados allá donde se necesite, y para repostar los buques impulsados por combustibles renovables.
- Una extensa red de gasoductos de gas natural hacia Europa. A medio y largo plazo dan la posibilidad de poderse construir rápidamente hidroductos utilizando las rutas de los gasoductos existentes.

²⁷ <https://www.weforum.org/agenda/2023/01/spain-portugal-green-hydrogen-powerhouse-davos23/>

²⁸ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_2333

- Pertenencia a la Unión Europea. El hidrógeno verde de la Península Ibérica puede disfrutar del libre acceso a sus mercados y beneficiarse automáticamente de cualquier incentivo que la Unión Europea ofrezca para garantizar la seguridad energética.

6.1 DAFO

Es importante conocer las oportunidades y fortalezas de la zona de Andalucía y Alentejo, así como las debilidades y amenazas que habrá que afrontar para poder desarrollar un sector renovable potente.

6.1.1 OPORTUNIDADES

- **Recursos renovables abundantes:** Andalucía y Alentejo cuentan con altos niveles de radiación solar y buenos regímenes de viento, lo cual es ideal para la generación de energía renovable necesaria para producir hidrógeno verde mediante electrólisis del agua.
- **Ubicación estratégica:** su proximidad a importantes mercados y centros industriales en Europa y el norte de África puede facilitar la exportación de hidrógeno verde y derivados.
- **Desarrollo tecnológico e innovación:** Andalucía tiene varios centros de investigación y universidades prestigiosas que podrían colaborar en el desarrollo de tecnologías relacionadas con el hidrógeno verde.
- **Apoyo de la Unión Europea:** dado que la UE está fomentando el desarrollo de tecnologías verdes, hay oportunidades para acceder a fondos y programas de apoyo que pueden reducir el riesgo financiero de los proyectos de hidrógeno verde, sobre todo en Andalucía como región de España favorecida para las condiciones de obtención de subvenciones en las convocatorias públicas (como Islas Canarias o Ceuta y Melilla).
- **Red de energía existente:** Andalucía cuenta con infraestructura energética que podría adaptarse para la distribución y almacenamiento de hidrógeno.

6.1.2 FORTALEZAS

- **Compromiso político:** los gobiernos regionales y nacionales están comprometidos con la transición energética y han mostrado interés en el desarrollo del hidrógeno como un vector energético clave.
- **Iniciativas ya en marcha:** existen proyectos en desarrollo para la producción de hidrógeno verde, como los valles de hidrógeno verde en el puerto de Algeciras, de Huelva y de Sines; y otras iniciativas lideradas por empresas energéticas y tecnológicas.
- **Potencial de integración industrial:** Andalucía posee un sector industrial significativo que podría beneficiarse del hidrógeno verde, no solo en energía, sino en procesos industriales que requieren reducciones de carbono, como la fabricación de cemento y acero.

- **Interés y apoyo local:** hay un creciente interés local y regional en soluciones de energía limpia, lo que puede facilitar la aceptación pública y el apoyo a proyectos de hidrógeno verde.

6.1.3 DEBILIDADES

- **Recursos hídricos limitados:** la escasez de agua es una preocupación significativa, especialmente dado que la producción de hidrógeno verde requiere de agua para la electrólisis. Andalucía y Alentejo son zonas propensas a sequías, lo que puede limitar la disponibilidad de agua necesaria para estos procesos. Sin embargo, el consumo de agua de una planta de electrolisis no es superior al de otro tipo de actividades industriales, como un ciclo combinado o central térmica.
- **Infraestructura de energía limitada:** a pesar de contar con infraestructura para energías renovables, pueden necesitarse inversiones significativas para adaptar la red eléctrica existente a las demandas del hidrógeno verde, especialmente en términos de capacidad de almacenamiento y distribución a gran escala.
- **Dependencia de subvenciones y apoyo político:** ambas regiones pueden depender en gran medida de las subvenciones y el apoyo financiero de los gobiernos nacional y de la Unión Europea, lo que puede ser inestable a largo plazo.

6.1.4 AMENAZAS

- **Cambios en la política energética:** los cambios en las prioridades políticas, tanto a nivel nacional como europeo, podrían afectar la continuidad y el financiamiento de proyectos de hidrógeno verde.
- **Competencia internacional:** el desarrollo rápido de tecnologías de hidrógeno verde en otras partes del mundo puede poner en desventaja a regiones como Andalucía y Alentejo, donde la implementación puede ser más lenta debido a desafíos infraestructurales y burocráticos.
- **Impactos del cambio climático:** además de la sequía, otros impactos del cambio climático, como olas de calor y fenómenos meteorológicos extremos, pueden afectar negativamente la producción de energía renovable y, por ende, la producción de hidrógeno verde.
- **Costes de inversión iniciales:** el alto coste inicial para el establecimiento de la infraestructura necesaria para la producción y distribución de hidrógeno verde puede ser un obstáculo importante para el desarrollo de estos modelos de negocio.
- **Aceptación social y conciencia pública:** aunque hay un interés creciente en soluciones de energía limpia, la comprensión y aceptación pública de tecnologías emergentes como el hidrógeno verde aún pueden ser limitadas, lo que podría ralentizar la adopción y expansión de estos proyectos.
- **Impacto de la infraestructura portuaria limitada en el Alentejo:** la falta de puertos adecuados puede complicar la logística necesaria para el transporte de tecnología, maquinaria y materias primas esenciales para la producción de hidrógeno verde, así

como para la distribución del producto final. En el Alentejo, únicamente el puerto de Sines dispone de infraestructura para los nuevos vectores energéticos. En Andalucía sí se dispone de tres puertos de gran capacidad: Huelva, Cádiz y Algeciras.

6.2 POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE

La Península Ibérica es la zona con mayor potencial de producción de energía renovable solar de Europa, tanto por recurso solar como por superficie del territorio. En la Figura 13 se muestra la información del sistema de información geográfica fotovoltaica de la Unión Europea²⁹. En la Figura 14 se muestra el mapa de la irradiancia solar en la Península Ibérica³⁰, con valores entre 4,7 y 5,5 kWh/m² día para la zona de Andalucía y Alentejo.

Respecto al potencial de producción de energía renovable eólica, no es la zona de mayor potencial de Europa, ya que la zona de mayor recurso eólico es la costa atlántica de Europa, Mar del Norte y los países escandinavos. La Península Ibérica dispone de un recurso eólico razonable. Andalucía dispone de un recurso intermedio, mientras que el Alentejo sí dispone de un menor recurso eólico. En la Figura 15 se muestra el mapa del recurso eólico en Europa.

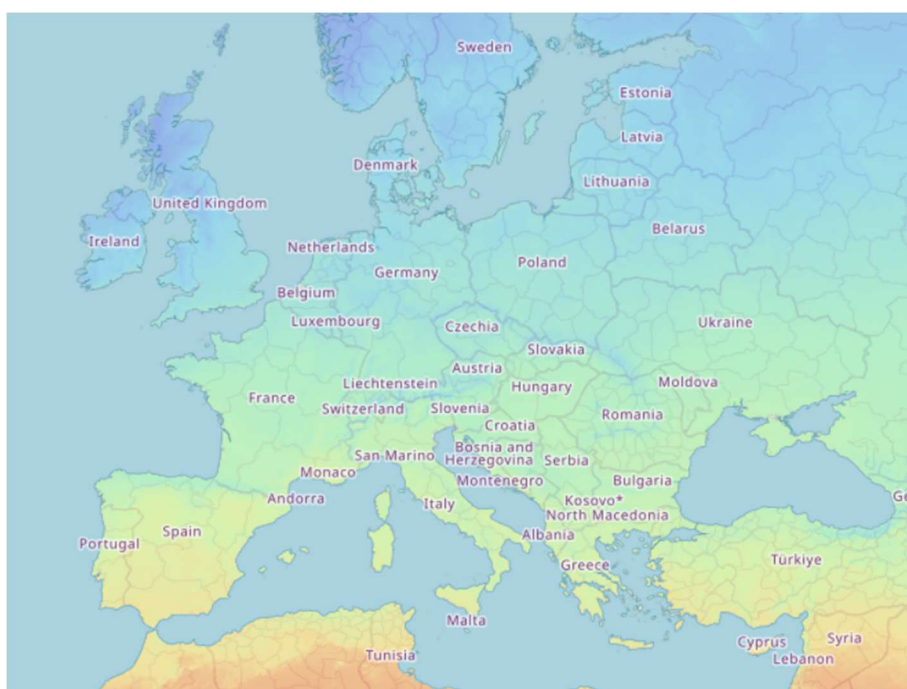


Figura 13 Mapa de recurso solar disponible en Europa

²⁹ https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

³⁰

https://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_radiacion_solar/atlas_de_radiacion_24042012.pdf

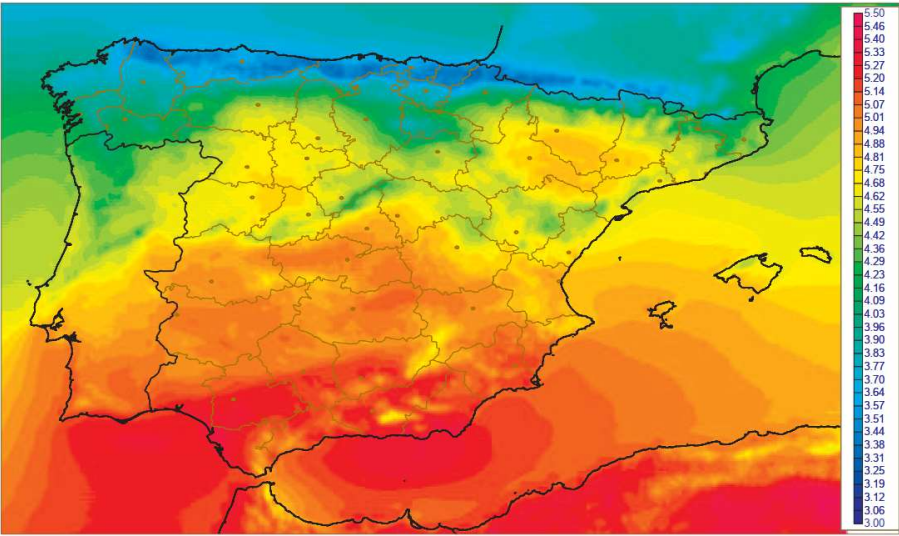


Figura 14 Mapa de Irradiancia Global media (1983-2005) SIS (CM-SAF) en la Península Ibérica, en kWh/m2 día

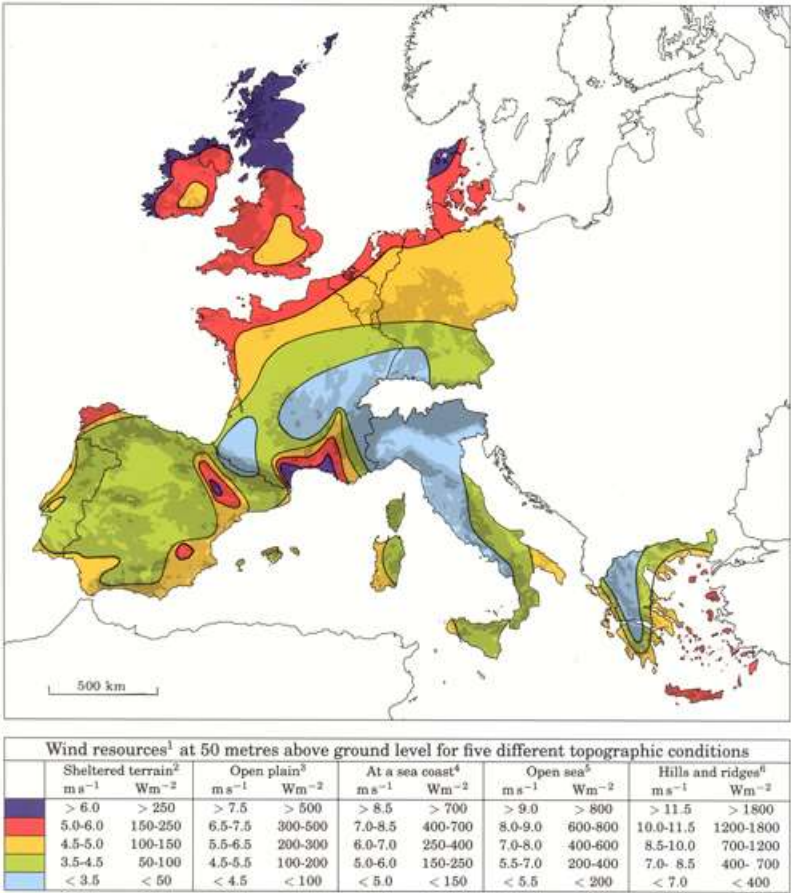


Figura 15 Mapa del recurso eólico en Europa

6.3 POTENCIAL INDUSTRIAL DE LA ZONA

Las regiones de **Andalucía y Alentejo tienen un alto potencial industrial**. Se han identificado los siguientes sectores en los que la actividad industrial que se venía llevando a cabo hasta el momento puede dirigirse hacia el sector de producción de hidrógeno y derivados.

6.3.1 HIDRÓGENO RENOVABLE

En Andalucía ya existen empresas del sector del hidrógeno renovable, fabricantes de electrolizadores y equipamiento.

- **H2B2:** es una empresa fabricante de electrolizadores tipo PEM contenerizados. Ubicados en Sevilla llevan trabajando en el sector desde Y tienen capacidad de fabricación de electrolizadores de hasta 5 MW.
- **ARIEMA:** es una empresa de consultoría y también ha desarrollado su propio electrolizador. Está localizada en Madrid, pero los talleres de construcción de los equipos están en Huelva.
- **CLANTECH:** es una ingeniería especializada en el diseño y puesta en marcha de estaciones de servicio de hidrógeno, llave en mano. HRS (*Hydrogen Refuelling Station*). También está desarrollando algunos proyectos de producción y presurización de hidrógeno para almacenarlo a altas presiones como mecanismo de aprovechamiento más eficiente de la energía renovable.

6.3.2 SECTOR AERONÁUTICO

En Andalucía hay un buen número de empresas, tanto ingenierías como fabricantes de equipamiento, que trabajan para el sector aeronáutico.

En este sector, las actividades relacionadas con el sector del hidrógeno se pueden enfocar en dos áreas:

- **Desarrollo de la tecnología del hidrógeno:** para su utilización como combustible de propulsión, ya sea directamente en motores a turbina, como mediante pilas de combustible.
- **Desarrollo de materiales composites para tanques de hidrógeno:** la logística del hidrógeno es primordial para el sector, tanto el almacenamiento como su transporte. Actualmente, el transporte de hidrógeno suele ser en forma de gas comprimido, y cuando no existe un hidroducto que conecte la planta de producción con la de consumo se suele transportar entre 200 y 380 bar en tanques presurizados en camiones, que son conocidos como tube-trailers. Estos tube-trailers suelen tener una tara de unas 28 toneladas con capacidad de transportar 1 tonelada de hidrógeno. Además, la fatiga de estos depósitos suele ser elevada porque suelen hacer ciclos de presurización hasta el 100% y despresurización hasta el 10% diarios. Estos materiales

y condiciones de trabajo pueden ser comparables a las necesarias en el sector aeronáutico.

6.3.3 SECTOR AUTOMOCIÓN

Hay diversas plantas de fabricación del sector de la automoción, que en los próximos años podrían cambiar su ámbito de actuación a equipamiento de motorizaciones eléctricas o de pilas de combustible, tanto de vehículos ligeros como pesados.

6.3.4 FABRICANTES DE CARROCERÍAS

Como continuación a la sección anterior, en la construcción de los tube-trailers no sólo son necesarios los propios tanques de hidrógeno, sino que también son necesarios los chasis de los remolques de camión.

6.3.5 CALDERERÍA Y CONSTRUCCIONES METÁLICAS

En las plantas de producción de hidrógeno y derivados se instalan tanques a presión para almacenamiento de hidrógeno, así como equipos de compresión y tuberías. Todos estos equipos serán fabricados en talleres especializados en este tipo de montajes, habituales para el sector industrial y “Oil&Gas”.

Este tipo de equipos dedicados a plantas de hidrógeno tienen requerimientos especiales respecto a los materiales utilizados, a los procedimientos de construcción y soldadura, y a las pruebas posteriores para certificar su adecuación a la normativa vigente. En los próximos años serán necesarias empresas de calderería y montaje mecánico especializadas e incluso homologadas en este de materiales y procedimientos.

Así mismo, los propios fabricantes de los electrolizadores requerirán de socios para la construcción de sus equipos según sus especificaciones y estándares. Un electrolizador está compuesto por el propio “stack”, que es donde se produce la electrolisis, que suele ser fabricado por los propios fabricantes, y por circuitos de recirculación de agua, refrigeración, separadores de humedad, etc. que pueden ser fabricados por cualquier taller de calderería con suficiente especialización.

6.3.6 EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN

En todas las plantas industriales de proceso son habituales los equipos de refrigeración, y las plantas de producción de hidrógeno y derivados no son la excepción.

En las plantas de producción de hidrógeno son necesarios equipos de refrigeración en tres aplicaciones:

- **Refrigeración del “stack”**: para de la energía eléctrica que se alimenta al electrolizador se pierde en forma de calor, que se debe disipar para que no aumente su temperatura. Esta refrigeración se suele hacer con agua de mar, si se dispone de su captación, o más

habitualmente con aero enfriadores, enfriando el electrolizador directamente con aire. En algunos casos excepcionales es necesaria la instalación de torres de refrigeración, pero se suele evitar para no consumir agua adicional.

- **Separadores de humedad del hidrógeno y oxígeno:** los electrolizadores disponen de dos separadores de humedad de la corriente de salida del hidrógeno y del oxígeno. Estos separadores suelen requerir agua fría a unos 5°C, por lo que se requieren enfriadoras de agua, o comúnmente conocidas como *chillers*.
- **Enfriadores de hidrógeno:** en la compresión de hidrógeno se calienta, y debe bajar la temperatura de nuevo hasta una temperatura ambiente, entre 25 y 30°C. Para este proceso es necesario disponer de agua de refrigeración a unos 15 a 20°C, por lo que puede conseguirse con aero enfriadores, o con enfriadoras.
- **Enfriadores de hidrógeno:** en el caso en que el hidrógeno vaya a tube-trailer o en estaciones de servicio, hidrolineras, es necesario bajar la temperatura hasta 5 o 10°C, para el primer caso, y hasta -40°C en el segundo. Por lo que son necesarias enfriadoras con esos rangos de temperatura, y con materiales adecuados para hidrógeno.

6.3.7 ESTACIONES DE SERVICIO

En el desarrollo del sector del hidrógeno se llevará a cabo la construcción de hidrolineras (sólo estación de servicio) e hidrogeneras (con producción de hidrógeno).

Las estaciones de servicio de hidrógeno son más complejas que las convencionales de productos petrolíferos debido a que almacenar y repostar un gas es siempre más complejo que repostar un líquido. Incluso las estaciones de servicio de gas natural no requieren de equipos de compresión y refrigeración como sí requieren las estaciones de servicio de hidrógeno.

Ya existen empresas que se han especializado en todo el equipamiento de almacenamiento, compresión y suministro del hidrógeno (que suele ir montado en contenedores), pero suelen abordar la construcción de la propia estación de servicio en el emplazamiento.

En Andalucía existen distintas empresas relacionadas con la instalación y mantenimiento de estaciones de servicio, que pueden especializarse en los requerimientos de las hidrolineras y/o incorporarlas a las estaciones de servicio actuales de productos petrolíferos, o incluso asociarse con las empresas que disponen del equipamiento de la hidrolinera.

6.3.8 FABRICACIÓN DE CATALIZADORES PARA AUTOMÓVIL

En una planta de electrolisis se suele instalar un catalizador para eliminar las trazas de oxígeno que van en la corriente de hidrógeno. Este equipo, llamado habitualmente DeOxo, es un catalizador que permite que el oxígeno que acompaña como trazas al hidrógeno reaccione para producir agua, y en el proceso posterior de secado se pueda eliminar, alcanzando la **pureza de hidrógeno requerida en muchas aplicaciones del 99,999%**.

Los fabricantes de catalizadores para automóvil podrían especializarse en la fabricación de estos equipos DeOxo.

6.3.9 PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES

Para la operación de las plantas de producción de hidrógeno, almacenamientos en puertos, estaciones de servicio de hidrógeno, etc. será necesario desarrollar toda la documentación correspondiente a prevención de riesgos laborales: **elaboración de planes de seguridad y salud**, formación, seguimiento, etc.

Las empresas que ya se dedican a este sector pueden especializarse en proyectos de hidrógeno.

6.3.10 EMPRESAS DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

Las empresas que ya se dedican al desarrollo e instalación de sistemas de control y automatización en plantas industriales podrán especializarse en los proyectos de hidrógeno, adaptando todos los sistemas de seguridad SIL, los sistemas contraincendios, los sensores de fugas y de llama de hidrógeno, etc.

6.3.11 GRUPOS ELECTRÓGENOS

Los grupos electrógenos tradicionales pueden ser sustituidos por pilas de combustible a hidrógeno, o grupos de combustión interna con metanol renovable. De este modo, se descarboniza el suministro eléctrico de la obra o el evento. Ya ha habido experiencias de este tipo con el proyecto EVERYWH2ERE de la Fundación del Hidrógeno de Aragón³¹.

6.3.12 MONTAJES ELÉCTRICOS

La producción de hidrógeno renovable implica una mayor cantidad de equipamiento eléctrico, ya que es necesaria la subestación y línea de evacuación de la energía eléctrica de las instalaciones fotovoltaicas y/o eólicas (como hasta ahora), pero también en la propia instalación de producción de hidrógeno renovable, ya que es necesaria la instalación de una subestación eléctrica, un edificio eléctrico para la distribución interna y transformadores para adecuar la tensión a los consumos.

Por lo tanto, las empresas dedicadas a montajes eléctricos tendrán un volumen de negocio mayor, ya que será necesaria la instalación de equipamiento eléctrico tanto en la planta de producción renovable, como en la propia planta de producción de hidrógeno.

6.3.13 SUMINISTRO DE TUBERÍA Y RACORES

Las plantas de producción de hidrógeno tienen requisitos especiales en los montajes mecánicos respecto a los materiales utilizados (algunos aceros al carbono habituales no son válidos), así

³¹ <https://hidrogenoaragon.org/es/proyectos/everywh2ere/>

como en los procedimientos de soldadura y certificación. La presión nominal en algunas partes de las instalaciones puede llegar a 200, 300 y hasta más de 700 bar.

En muchas instalaciones también se opta por la instalación con tubería y racores especiales, que no requieren soldadura, pero sí homologación de los montadores

Por lo tanto, las empresas que ya se dedican al suministro de tubería y racores se podrán especializar en el sector del hidrógeno, amoníaco o metanol.

6.3.14 CENTROS DE INVESTIGACIÓN Y FORMACIÓN

Los centros de investigación se podrán especializar en toda la tecnología alrededor del hidrógeno: electrolizadores, pilas de combustible, almacenamiento, optimización de la operación, materiales, procesos de producción de amoníaco y metanol, procesos de craqueo de amoníaco y metanol para volver a producir hidrógeno, etc.

Adicionalmente se podrán preparar y organizar cursos de formación de todos los niveles y áreas de conocimiento: consultoría, ingeniería, operación y mantenimiento, prevención de riesgos laborales, personal de planta, conductores y manipulación de tube trailers, etc. Se podrán desarrollar simuladores de planta para poder dar formación a los operadores de planta.

6.4 PUERTOS Y POLOS INDUSTRIALES

El sector del hidrógeno verde se va a desarrollar entorno al concepto de “valle de hidrógeno” que son zonas en las que coinciden geográficamente empresas con potencial o proyectos de producción de hidrógeno verde y empresas que pueden consumirlo en sus procesos de producción para descarbonizarse o para producir derivados de hidrógeno verde.

Y estos valles de hidrógeno suelen estar en zonas en las que existe un puerto con capacidad de adaptarse a los futuros nuevos tránsitos de productos energéticos, que suelen tener polos industriales ya existentes del sector químico o petroquímico.

Por ello, se han revisado los puertos y polos industriales en el Alentejo y Andalucía.

6.4.1 PUERTO Y POLO INDUSTRIAL DE SINES

El Puerto de Sines es un puerto portugués de aguas profundas. Actualmente es el principal puerto de la costa atlántica de Portugal por cantidad de mercancías movidas y presenta condiciones naturales únicas en la costa portuguesa para acoger todos los tipos de buques.

Sus características geofísicas contribuyen para su consolidación como activo estratégico nacional, siendo, por un lado, la principal entrada de suministro energético del país (petróleo, sus derivados y gas natural) y, por otro, se posiciona ya como un importante puerto de carga general/contenedores con elevado potencial de crecimiento para ser una referencia ibérica, europea y mundial. Está dotado de modernas terminales especializadas, puede mover los diferentes tipos de mercancías, y ofrece excelentes accesibilidades marítimas sin restricciones.

Ya que es de construcción relativamente reciente, 1978, dispone de un ordenamiento de referencia, libre de presiones urbanas, asegurando capacidad de expansión a largo plazo. Ofrece accesibilidades terrestres adecuadas para el tráfico actual, disponiendo de un plan de evolución tanto por carretera como por vías ferroviarias, que permitirá dar respuesta a las proyecciones futuras de crecimiento del puerto y a su área de influencia.

El Puerto de Sines y su Zona Industrial y Logística, con más de 2 000 ha, son ya una plataforma logística de ámbito internacional con capacidad para recibir los grandes actores de los sectores marítimo-portuario, industrial y logístico³².

- **GALP:** dispone de una refinería en la zona industrial junto al puerto. Se ha tomado la decisión final de inversión (FID) para la puesta en marcha de dos proyectos a gran escala cruciales para la descarbonización de la refinería de Sines y sus productos energéticos. GALP se ha asociado con MITSUI en una empresa conjunta (75/25) para producir biocombustibles avanzados en una unidad adyacente a la refinería de Sines, con una capacidad de 270 000 toneladas anuales, tanto de gasóleo renovable (por hidrotratamiento de aceite vegetal – HVO) como combustible de aviación sostenible (SAF)³³. Por otro lado, GALP invertirá cerca de 250 M€ en el proyecto de una planta de producción de hidrógeno verde de 100 MW de capacidad de electrólisis, capaz de producir hasta 15 000 toneladas de hidrógeno renovable al año, que permitirá sustituir alrededor del 20% del consumo actual de hidrógeno gris³⁴.
- **REPSOL:** también dispone de refinería en la zona industrial junto al puerto. Invertirá 657 M€ en su ampliación con dos nuevas plantas de materiales poliméricos de alto valor añadido, 100% reciclables, que estará operativa en 2025³⁵.
- **MADOQUA POWER2X:** es el proyecto de producción de amoniaco que se está llevando a cabo en la zona industrial junto al puerto. En este proyecto participan las empresas MADOQUA Renewables, POWER2X y CIP (*Copenhagen Infrastructure Partners*). La Figura 16 muestra un esquema de este proyecto. Este proyecto ha sido uno de los siete proyectos que han sido seleccionados en la primera subasta del Banco Europeo del Hidrógeno²⁸ resuelta en el mes de abril de 2024; para producir un total de 511 000 tH2 en los próximos 10 años, por un total de 245 M€.

³² <https://www.apsinesalgarve.pt/puerto-de-sines>

³³ <https://www.industriambiente.com/noticias/20230926/galp-invertira-650-millones-euros-en-proyectos-de-hidrogeno-verde-y-hvosaf-en-sines-portugal>

³⁴ <https://hidrogeno-verde.es/galp-producira-hidrogeno-verde-en-sines/>

³⁵ <https://www.repsol.com/es/productos-y-servicios/quimica/quimica-news/repsol-gobierno-portugues-firman-inversion-657-millones-ampliar-complejo-industrial-sines/index.cshtml>



Figura 16 Esquema del proyecto MadoquaPower2X de producción de amoníaco renovable en el puerto de Sines

6.4.2 PUERTO Y POLO INDUSTRIAL DE HUELVA

El Puerto de Huelva es un puerto de interés general del sistema portuario español que cuenta con numerosas fortalezas. Está situado en el arco suratlántico de Europa, próximo al Estrecho de Gibraltar, en el cruce de las rutas de navegación Norte-Sur y Este-Oeste, por lo que dispone de una posición geoestratégica como puerto *import/export* y hub para las nuevas tendencias del comercio marítimo internacional, sobre todo de Europa con el Atlántico y con mercados emergentes como el norte de África y el continente americano.

Es el puerto más extenso de España con 17 kilómetros en los términos de Huelva y Palos de la Frontera y es el primer enclave industrial de Andalucía y segundo de España.

Se trata de un puerto natural de estuario, con una zona de aguas protegidas de 1 120 hectáreas. Es el puerto con mayor extensión de superficie libre a concesionar del sistema portuario estatal al contar con 1 700 hectáreas. Dispone de 8,5 kilómetros de muelles públicos y privados.

En cuanto a volumen de tráfico total portuario, el Puerto onubense se encuentra entre la quinta y la séptima posición del sistema portuario español, con un volumen total de tráfico que en el año 2022 superó los 32 millones de toneladas de mercancías. Por tanto, se sitúa entre los siete primeros puertos del sistema español en movimiento de mercancías y segundo de Andalucía. Además, es también el segundo puerto de Europa de mayor crecimiento en la última década³⁶.

Junto al puerto se encuentra un importante polo industrial con industrias de distintos sectores, algunas de ellos con proyectos de producción de hidrógeno verde ya conocidos.

→ **CEPSA:** con su acuerdo con la naviera MAERSK está proyectando la que será la mayor planta de metanol verde de Europa, con una inversión de hasta 1 000 M€, tendrá una

³⁶ <https://www.puertohuelva.com/2023/09/27/el-puerto-de-huelva-afrenta-la-transicion-energetica-apostando-por-el-hidrogeno-verde/>

capacidad de producción de 300 000 toneladas de metanol al año³⁷. También están desarrollando el “Valle Andaluz del Hidrógeno Verde”, junto con su planta de San Roque (Campo de Gibraltar, Cádiz). Las plantas tendrán una capacidad combinada de electrólisis de 2 GW y producirán hasta 300 000 toneladas de hidrógeno verde al año, y la producción de biocombustibles 2G y productos derivados como el amoníaco y metanol verdes³⁸.

- **FERTIBERIA:** es una empresa de producción de fertilizantes y está desarrollando proyectos de producción de amoníaco a partir de hidrógeno renovable en Huelva, en Puertollano y en Sagunto. Recientemente han firmado con CEPSA una alianza estratégica para impulsar la producción de hidrógeno verde y descarbonizar la industria en Huelva³⁹.
- **AIR LIQUIDE:** actualmente está en tramitación el proyecto para duplicar las instalaciones, por un lado, la producción de gases a industrias de la zona, como para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno.
- **ELECTRO QUÍMICA ONUBENSE:** es una empresa que ya utiliza la electrólisis de una disolución de sal común en sus procesos de producción, para obtener cloro gas y sosa cáustica, produciendo como subproducto hidrógeno gas. A partir del cloro gas se producen derivados como son el ácido clorhídrico, hipoclorito sódico, o cloruro férrico.
- **MAGNON:** cuenta en su complejo energético de Huelva con tres plantas de generación de electricidad con biomasa con una capacidad total de 137 MW que producen más de 800 TWh anuales. Podría ser un emplazamiento en el que instalar captura de CO₂ para la producción de metanol renovable.
- **ENAGAS:** cuenta con una de sus regasificadoras de gas natural en Huelva, y lo ha incluido en el desarrollo de la futura red troncal de hidroductos de España en 2023⁴⁰.

6.4.3 PUERTO Y POLO INDUSTRIAL DEL CAMPO DE GIBRALTAR

El puerto de la Bahía de Algeciras es el de mayor tráfico de España, e incluso en tráfico con vehículos rodados a escasa distancia del Puerto de Baleares. Dispone de capacidad de carga y descarga de contenedores, de graneles líquidos y sólidos, así como varios muelles de carga y descarga de vehículos rodados. También dispone de servicios de *bunkering*⁴¹.

La Terminal de Tráfico Pesado pretende disponer de un espacio, cerrado y controlado, dedicado a la concentración del tráfico pesado (semirremolques y unidades de carga completa) que

³⁷ <https://www.cepsa.com/es/prensa/el-puerto-de-huelva-sera-el-hub-de-metanol-verde-en-europa>

³⁸ <https://www.cepsa.com/es/negocios/commercial-clean-energies/hidrogeno-verde/valle-andaluz>

³⁹ <https://www.cepsa.com/es/prensa/cepsa-y-fertiberia-se-alian-para-producir-hidrogeno-verde>

⁴⁰ <https://www.enagas.es/es/transicion-energetica/red-gasista/infraestructuras-energeticas/transporte-hidrogeno/>

⁴¹ <https://www.apba.es/>

operan en el recinto portuario. Dispone de tres zonas diferenciadas: de rotación, logística y transporte horizontal. También dispone de red ferroviaria interior, compuesta por tres ramales:

- **CEPSA:** la refinería Gibraltar-San Roque dispone de instalaciones en las que pueden amarrar petroleros de hasta 350 000 toneladas de peso muerto con una capacidad de descarga de hasta 12 000 m³/hora. Esta planta también dispone de proyectos de producción de hidrógeno verde, y pertenece al desarrollo del “Valle Andalúz del Hidrógeno Verde”, junto con su refinería de La Rábida, en Palos de la Frontera.
- **EXOLUM:** presta principalmente servicios de almacenamiento, recepción y expedición de productos petrolíferos de búnker por buque tanque, gabarra y camión cisterna. La capacidad de almacenamiento es de 203 144 m³.
- **EVOS:** dispone de terminal de almacenamiento de hidrocarburos y otros graneles líquidos con capacidad de almacenaje de 403 000 m³, distribuidos en 22 tanques, con un pantalán para buques de hasta 225 000 toneladas de peso muerto. El proyecto de ampliación de la terminal de Evos Algeciras SAU contempla aumentar su capacidad nominal de almacenamiento en 880 803 m³ adicionales distribuidos en 36 tanques, lo que supone alcanzar un volumen total de almacenamiento de 1 286 649 m³.
- **ACERINOX:** la planta integral de Los Barrios tiene en marcha un proyecto que permitirá identificar las tecnologías de descarbonización más adecuadas para cada subproceso industrial, con especial atención a la electrificación a partir de energías renovables, el hidrógeno verde o azul, las bioenergías, o la captura y almacenamiento de carbono⁴².
- **EDP:** la empresa eléctrica portuguesa está desarrollando actualmente proyectos de transformación de las centrales térmicas de generación eléctrica, entre ellas, la Central Térmica Los Barrios, en la Bahía de Algeciras. EDP reconvertirá esta central y desarrollará proyectos de producción de hidrógeno renovable que permitirá su suministro a todo el entorno del Campo de Gibraltar y su exportación a través del puerto. El proyecto también incluye una instalación de almacenamiento energético en baterías de ion-litio de 255 MW⁴³.

6.4.4 PUERTO Y POLO INDUSTRIAL DE CÁDIZ

El puerto de la Bahía de Cádiz dispone de 275 hectáreas de suelo industrial concesionable, del cual está ocupado el 58%; por lo que existe una importante superficie a disposición de los operadores que deseen instalarse para desarrollar sus actividades relacionadas con el tráfico o la actividad portuaria⁴⁴. No tiene actividad industrial química o petroquímica. La mayor parte de la actividad es de construcción y reparación de barcos, así como de construcción aeronáutica.

⁴² <https://www.investinandalucia.es/acerinox-descarbonizara-su-planta-de-los-barrios/>

⁴³ <https://espana.edp.com/es/edp-spain/proyectos-transformacion-centrales-edp>

⁴⁴ <https://www.puertocadiz.com/autoridad-portuaria/carta-de-presentacion/>

- **NAVANTIA:** cuenta con dos astilleros en San Fernando y Puerto Real para los proyectos de construcción naval, buques civiles y eólica. El de Puerto Real dispone de uno de los mayores diques del mundo con capacidad para construir buques de hasta 500 metros de largo con dos de las mayores grúas pórtico de España. Son de las más importantes y competitivas instalaciones de Europa en el sector. También realizan la reparación de cualquier tipo de buques y, en concreto, de cruceros, en los que se ha especializado, y buques de la Armada española.
- **DRAGADOS OFF-SHORE:** dedicada a la construcción de plataformas y equipos petrolíferos en su planta en La Cabezuela-Puerto Real, desde donde han salido importantes proyectos hacia los más diversos lugares del mundo.
- **AIRBUS:** en sus instalaciones de Puerto Real se completa el montaje final y las pruebas funcionales del estabilizador horizontal del A380. También produce las cajas laterales del estabilizador horizontal para las familias A350 y A330, y los elevadores para la familia A320, entre otros componentes.
- **ALESTIS AEROSPACE:** está especializada en el diseño, fabricación y montaje de aeroestructuras complejas para los principales fabricantes mundiales del sector aeronáutico. Es líder en tecnologías de fabricación de materiales compuestos.

7. MODELOS DE ACTIVIDAD Y NEGOCIO

Los modelos de actividad y negocio relacionados con el hidrógeno renovable se describen a continuación.

7.1 MODELOS DE ACTIVIDAD Y NEGOCIO DEL SECTOR INDUSTRIAL

A continuación, se describen los modelos de actividad y negocio que pueden desarrollarse en el sector industrial. El desarrollo de negocio será entorno a la tecnología, la ingeniería y consultoría, la fabricación de bienes de equipo, la construcción y montaje, la operación y mantenimiento, etc.; que serán necesarios en el desarrollo de la infraestructura necesaria en toda la cadena de valor del hidrógeno y sus derivados. Si se desarrollan adecuadamente, no sólo se podrá suministrar a los proyectos de la Península Ibérica, sino que se podrá exportar fuera de España. Los sectores en los que se debe promover el desarrollo empresarial e industrial son los indicados en la sección 6.3.

7.1.1 CONSULTORÍA E INGENIERÍA

Aunque no lo hayamos incluido en la descripción del potencial industrial de la sección anterior, por no ser propiamente industrial, en las regiones de Andalucía y Alentejo existen numerosas empresas de consultoría e ingeniería con suficiente capacidad como para desarrollar todas las fases de un proyecto de producción de hidrógeno renovable y/o sus derivados.

El desarrollo de las capacidades de estas empresas en este nuevo sector les permitirá conseguir la contratación de servicios de consultoría e ingeniería, en primer lugar, para los proyectos de la Península Ibérica, para posteriormente, poder abordar proyectos internacionales apoyándose en la experiencia adquirida en el mercado doméstico.

7.1.2 BIENES DE EQUIPO

Todo el sector del hidrógeno renovable, incluyendo la cadena de valor y la producción de derivados necesita de un gran número de equipos que deberán ser instalados. Hay un gran número de equipos que son comunes a cualquier otro tipo de planta industrial, con algunas características particulares para este sector. Todas las empresas que se dedican a calderería, construcciones metálicas, equipos de refrigeración, tratamiento de aguas, suministro de tuberías y racores, carrocerías, construcción de estaciones de servicio pueden especializarse en el equipamiento de este tipo de plantas.

Pero no sólo en equipamiento común a otras industrias, sino que también se puede atraer nuevas instalaciones de fabricación y montaje de electrolizadores de los grandes tecnólogos y fabricantes mundiales. Este ha sido el caso de Cummins, fabricante de electrolizadores de

Estados Unidos, que el próximo año comenzará la producción de electrolizadores en su nueva planta en Guadalajara⁴⁵.

A medio plazo también se puede desarrollar el negocio de la reparación o reciclado de los “stacks”. Según las especificaciones de los fabricantes, deben ser sustituidos después de 80 000 horas de operación, lo que equivale a unos diez de operación, para recuperar la eficiencia inicial de la electrolisis. Esta operación suele estar en manos de los propios fabricantes, pero también pueden necesitar desarrollar una planta específica para estas operaciones.

7.1.3 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE PLANTAS

Al igual que en el caso anterior de los bienes de equipo, existen empresas dedicadas a la construcción y montaje de plantas industriales que podrán especializarse en la construcción de estas plantas de producción, no sólo de las propias plantas de producción de hidrógeno renovable, sino también de toda la cadena de valor, incluyendo, hidroductos, plantas de producción de derivados, almacenamientos en planta y en puerto, *bunkering* de barcos, estaciones de servicio, etc.

7.1.4 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS PLANTAS

Al igual que cualquier otra planta industrial se requerirá de personal cualificado para la operación y mantenimiento de las mismas, conociendo las peculiaridades de la operación de estas plantas, así como su mantenimiento óptimo. Y no sólo de las plantas de producción, sino también de las instalaciones de hidrógeno, amoníaco o metanol en los puertos, estaciones de servicio de hidrógeno, etc.

Como hemos comentado anteriormente, la especialización en este sector puede comenzar en las nuevas plantas que se van a construir en Andalucía y Alentejo, para posteriormente, poder exportar el conocimiento a otras plantas del mundo.

En este modelo de negocio también se incluye todo lo relacionado con prevención de riesgos laborales, prevención de accidentes mediante estudios de seguridad industrial, mantenimiento preventivo y planificado, etc.

7.1.5 DESARROLLO DE TECNOLOGÍA Y FORMACIÓN

La existencia de centros de investigación en ambas regiones, así como la disponibilidad de fondos europeos para desarrollar tecnología y llevar a cabo investigación, desde TRL (*Technology Readiness Levels*) bajos hasta altos próximos a desarrollos comerciales, es una oportunidad única. El desarrollo de conocimiento y tecnología permitirá liderar el sector a nivel nacional e internacional. Adicionalmente, el conocimiento adquirido deberá ser transmitido

⁴⁵ <https://www.cummins.com/es/news/releases/2022/10/13/cummins-drives-gigawatt-electrolyzer-manufacturing-plant-forward-spain>

mediante programas de formación adecuados en todos los niveles, desde la formación profesional de construcción y montaje, operación y mantenimiento, hasta grados universitarios de ingeniería y desarrollo tecnológico.

7.1.6 CONSTRUCCIÓN DE VEHÍCULOS

En las regiones de Andalucía y Alentejo existen centros de fabricación de automóviles, y empresas de construcción del sector aeronáutico y naval.

En el caso de los automóviles, podrían especializarse en piezas del sistema motriz de los mismos o camiones de pila de combustible de hidrógeno (en Sevilla, por ejemplo, existe una fábrica de cajas de cambio del grupo Renault).

El sector aeronáutico y naval tiene distintas empresas de diseño y construcción, que tendrán que adaptarse a los nuevos sistemas motrices de los mismos.

En el caso naval, adicionalmente se tendrán que diseñar y construir buques para transportar estos combustibles renovables: hidrógeno líquido, amoníaco y metanol. Las condiciones de transporte se describieron en la sección 4.

7.2 MODELOS DE ACTIVIDAD Y NEGOCIO DE PRODUCCIÓN Y EXPORTACIÓN DE HIDRÓGENO Y DERIVADOS

El segundo tipo de modelos de actividad y negocio es la propia producción de hidrógeno verde, y sus derivados. Debido al gran recurso renovable de Alentejo y Andalucía y a la disponibilidad de todo tipo de empresas con cada una de las especialidades y de recursos humanos con formación adecuada, la Península Ibérica se puede convertir en un productor neto de productos energéticos renovables, con capacidad de dar suministro al consumo nacional, y de exportar productos energéticos. Esta producción de hidrógeno tendrá lugar en los entornos de los puertos y polos industriales, pero también podrán estar localizados en toda la geografía de Alentejo y Andalucía donde se encuentra la disponibilidad de terreno con recurso renovable. Estos puertos y polos industriales existentes en la zona se han descrito detalladamente en la sección 6.4.

Los promotores de este tipo de actividad suelen ser empresas ya consolidadas en el sector energético, algunas de ellas de las más importantes de España y Portugal.

7.2.1 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

La producción de hidrógeno renovable suele estar ubicada cerca o en la misma parcela que la producción de energía renovable, ya sea fotovoltaica o eólica; por lo que debe estar ubicada donde exista terreno disponible y agua, aunque el consumo no sea más elevado que el de cualquier otra industria.

Hasta el momento, los proyectos en tramitación de producción de hidrógeno no suelen disponer de conexión a hidroduto, y sus capacidades no son elevadas, del rango de 10 a 25 MW. Pero se están desarrollando también proyectos de mayor capacidad, de hasta 500 MW de electrolisis. Suelen estar cerca de los posibles consumidores y carreteras principales para poder instalar una estación de servicio de hidrógeno. De este modo, se organizan formando valles de hidrógeno, en los cuáles se reúnen productores de hidrógeno renovable y consumidores que desean descarbonizar sus procesos.

Este modelo de negocio ya ha tenido la oportunidad de optar a subvenciones procedentes de Europa y gestionadas por el IDAE en las convocatorias de los programas H2 Pioneros⁴⁶ y H2 cadena de valor⁴⁷. Estas subvenciones permiten reducir la inversión, CAPEX.

Recientemente, se ha resuelto la subasta del Banco Europeo del Hidrógeno que aporta una parte del precio de producción de hidrógeno durante diez años, entre 0,37 y 0,48€/kgH₂, es decir, aporta subvención al coste de producción, es decir, al OPEX²⁸.

7.2.2 PRODUCCIÓN DE DERIVADOS

El mejor modo de transporte del hidrógeno es comprimido por hidroduto, pero es necesaria una infraestructura que todavía no existe, aunque ya existe un proyecto de ENAGAS de una red troncal de hidrógeno⁴⁸. El hidrógeno dispone de la densidad energética más elevada de cualquier combustible por unidad de masa, pero es mucho menor si se incluye el contenedor. Para el caso en que se utilice como combustible renovable, o para transportar energía, se dispone de una densidad energética muy superior con el amoníaco y el metanol.

Por esta razón, el modelo de negocio de la producción de estos derivados es adecuado para todas las aplicaciones en que el hidrógeno no es la solución más adecuada.

Como se comentó en la sección 4, para la producción de amoníaco se necesita nitrógeno, que puede ser obtenido directamente del aire, por lo que una planta de producción de amoníaco renovable puede ser ubicada en cualquier terreno, siendo preferible en el entorno de un polo industrial o puerto.

Pero para la producción de metanol es necesaria una fuente de CO₂, que puede ser una planta de combustión de biomasa, una cementera o una planta de biogás, por ejemplo. Aunque también se puede obtener el CO₂ directamente de la atmósfera, pero el coste de su captura es superior. En este caso, la ubicación no siempre se encuentra en entornos industriales, sino cerca

⁴⁶ <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/programa-h2-pioneros-ayudas-para-proyectos-pioneros-y-singulares-de-hidrogeno>

⁴⁷ <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/programas-de-ayuda-la-cadena-de-valor-innovadora-del-hidrogeno-renovable-en>

⁴⁸ <https://www.enagas.es/es/transicion-energetica/red-gasista/infraestructuras-energeticas/transporte-hidrogeno/>

de la fuente de CO₂. También se puede transportar el CO₂ capturado, pero aumentaría su coste que impactaría en el coste del metanol.

7.2.3 ALMACENAMIENTO, DISTRIBUCIÓN Y EXPORTACIÓN

Por último, en los puertos ya existen algunas iniciativas para desarrollar almacenamiento de combustible renovables, tanto para el repostaje de los barcos, como para exportación. En este caso, serán los derivados amoníaco y metanol los que mayor capacidad de almacenamiento tendrán y los combustibles renovables más demandados, tanto para repostaje como para transporte.