



Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales
ICADE

EL HIDRÓGENO RENOVABLE Y LA CRISIS ENERGÉTICA

Autor: Rodrigo Portillo Márquez

Director: Isabel Catalina Figuerola Ferretti

MADRID | Junio 2024

RESUMEN EJECUTIVO

El hidrógeno verde es un activo que tiene un enorme potencial como vector energético y fuente de energía en distintos sectores. Para analizar su potencial en la transición energética, es crucial entender su producción a partir de energías renovables, como la solar y eólica, y la infraestructura necesaria para su almacenamiento y transporte. Este trabajo de fin de grado examina detalladamente el proceso de producción del hidrógeno verde, su cadena de valor y compara sus ventajas medioambientales con otras formas de hidrógeno, como el hidrógeno gris y azul.

Además, para valorarlo como activo de inversión, se realiza un análisis exhaustivo de los costes asociados a su producción, almacenamiento y transporte. Se evalúan las aplicaciones actuales del hidrógeno en la industria, el transporte y la generación de energía, destacando su capacidad para descarbonizar estos sectores. El estudio también explora los proyectos y políticas en diversos países, enfocándose en la Hoja de Ruta del Hidrógeno en España. Se plantea y valora la capacidad de creación de un mercado donde realizar su compraventa. Además, incluye un modelo explicativo de las variaciones del precio del hidrógeno y los factores que las determinan. y concluye que el hidrógeno verde es una opción viable a largo plazo, especialmente con el apoyo gubernamental adecuado y continuas inversiones en infraestructura y tecnología. Este análisis subraya que, con las estrategias correctas, el hidrógeno verde no solo contribuirá a la sostenibilidad y reducción de emisiones, sino que también impulsará el crecimiento económico y la independencia energética de España.

Índice

I. ¿QUÉ ES EL HIDRÓGENO VERDE?	5
1. Producción del hidrógeno verde y su cadena de valor	5
i. ¿Qué es el hidrógeno verde? ¿Cómo se genera?	5
ii. Proceso de producción del hidrógeno verde	6
iii. Infraestructura necesaria	6
iv. Métodos de almacenamiento	8
v. Comparación con otras formas de hidrógeno	9
2. Costes	10
i. Análisis de costes de fuentes de energía	11
ii. Análisis de otros costes de producción	13
iii. Análisis de costes de almacenamiento y transporte	14
iv. Análisis de costes financieros	14
v. Comparación de costes con otras fuentes de energía	15
II. SITUACIÓN ACTUAL EN LA SOCIEDAD	16
1. Aplicaciones actuales del hidrógeno: industria	16
2. Aplicaciones actuales del hidrógeno: transporte	17
3. Aplicaciones actuales del hidrógeno: energía	18
III. PROYECTOS Y POLÍTICAS ACTUALES EN DIFERENTES PAÍSES	18
1. Hoja de Ruta del Hidrógeno en España	19
2. Situación en otros países	20
IV. EL HIDRÓGENO VERDE COMO ACTIVO DE INVERSIÓN	21
1. Historial como activo	21
i. Evolución del interés y la inversión en el hidrógeno verde	22
2. Precios y modelo de compraventa	23
i. Modelo de compraventa actual del hidrógeno y perspectivas a futuro	23
3. Crecimiento esperado	25
i. Proyecciones de crecimiento de la industria	25
ii. Factores que impulsan el crecimiento del hidrógeno	26
4. Comparación de atributos frente a otros commodities	26
V. FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS VARIACIONES DEL PRECIO DEL HIDRÓGENO	28
1. Descripción de los principales factores políticos, económicos y tecnológicos que influyen en los precios	28
2. Análisis previo de los precios	29
i. Análisis cualitativo de las fluctuaciones históricas y sus causas	29
ii. Análisis cuantitativo: Correlaciones con otros commodities	30
3. Modelo explicativo de regresión lineal	31
i. Diseño del modelo de regresión y resultados	31
4. Viabilidad como activo de inversión	33
VI. LAS EMPRESAS DEL SECTOR DEL HIDRÓGENO	33
1. Descripción de las empresas y diferenciación sectorial	33
2. Papel del hidrógeno en la actividad empresarial y privada	35
3. Previsiones de inversión privada	37
VII. BENEFICIOS QUE PUEDE TRAER EL HIDRÓGENO RENOVABLE	38
1. Impacto medioambiental	38
2. Beneficios financieros	39
3. Beneficios macroeconómicos	39

VIII. CONCLUSIÓN.....	40
IX. ANEXOS Y BIBLIOGRAFÍA	42

I. ¿QUÉ ES EL HIDRÓGENO VERDE?

1. Producción del hidrógeno verde y su cadena de valor

i. ¿Qué es el hidrógeno verde? ¿Cómo se genera?

El hidrógeno es el elemento más ligero que existe, y uno de los más abundantes en la Tierra. Combinándose con otros elementos como el oxígeno y el carbono, componen el 75% de la materia del Universo (Centro Nacional del Hidrógeno, n.d.). Por ello, no es una fuente de energía que se pueda tomar directamente de la naturaleza, como podría ser la energía eólica o la fotovoltaica, sino que tiene un papel de vector energético, como sería la electricidad. Un vector energético es un medio para transportar y almacenar energía de manera eficiente desde su lugar de producción hasta su punto de consumo.

Actualmente el hidrógeno tiene múltiples usos en distintos sectores, utilizándose principalmente como producción de energía en pilas de combustible, que generan electricidad a través de una reacción electroquímica entre el hidrógeno y el oxígeno; como generador de calor y electricidad en plantas de energía y otras plantas industriales; y como forma de almacenamiento de energía (Dincer & Acar, 2015).

La diferencia entre el hidrógeno verde y el hidrógeno gris viene dada por la forma en la que se obtiene y produce el mismo. El hidrógeno verde es un tipo de hidrógeno que se produce mediante el uso de energías renovables y es considerado una fuente de energía limpia y sostenible. A diferencia del hidrógeno gris, que se produce a partir de combustibles fósiles, el hidrógeno verde se obtiene a partir de la electrólisis del agua.

ii. Proceso de producción del hidrógeno verde

La electrólisis del agua es un proceso a través del cual se descomponen las moléculas de H₂O en gases de oxígeno e hidrógeno por separado. Este proceso se lleva a cabo utilizando electricidad, por lo que no emite dióxido de carbono. Para que el hidrógeno sea considerado verde, la electricidad utilizada también debe obtenerse de fuentes renovables como la energía eólica, solar, o hidroeléctrica. Se recolecta y purifica agua, que es introducida en un electrolizador, un dispositivo que contiene celdas electrolíticas. Luego, con electricidad renovable, se divide el agua a través de una reacción química por la que se separa el hidrógeno y el oxígeno. El primero se recoge y almacena en tanques especializados, mientras que el oxígeno suele ser liberado a la atmósfera (aunque también puede ser capturado para otros usos industriales). Los tanques de hidrógeno lo contienen de diversas formas, pudiéndose almacenar en forma de gas a alta presión, en forma líquida a baja temperatura, o en materiales hidruros que absorben y liberan el hidrógeno.

iii. Infraestructura necesaria

El hidrógeno por sí mismo no se caracteriza especialmente por necesitar una infraestructura especialmente amplia para su producción en sentido explícito. Basta con los electrolizadores. Sin embargo, el hecho de producirlo de manera sostenible para que sea considerado hidrógeno verde sí que aumenta la complejidad y el tamaño de la infraestructura necesaria. Más complicada aún se vuelve cuando se tiene en cuenta la infraestructura de almacenamiento, transporte y distribución necesaria.

Para la producción del hidrógeno como tal, se necesitan las plantas de electrólisis. En ellas es donde ocurre el proceso que se detalló en el apartado anterior. Contienen electrolizadores que dividen el agua en hidrógeno y oxígeno. Los más habituales son los electrolizadores alcalinos, que usan soluciones alcalinas como los

electrolitos. Otros tipos de electrolizadores son los de membrana de intercambio protónico y los de óxido sólido. El electrolizador está compuesto por dos electrodos: el ánodo (electrodo negativo) y el cátodo (electrodo positivo). Estos electrodos permiten el paso de la corriente eléctrica a través del agua, facilitando así el proceso de separación de las moléculas, denominado electrólisis (Repsol, 2023).

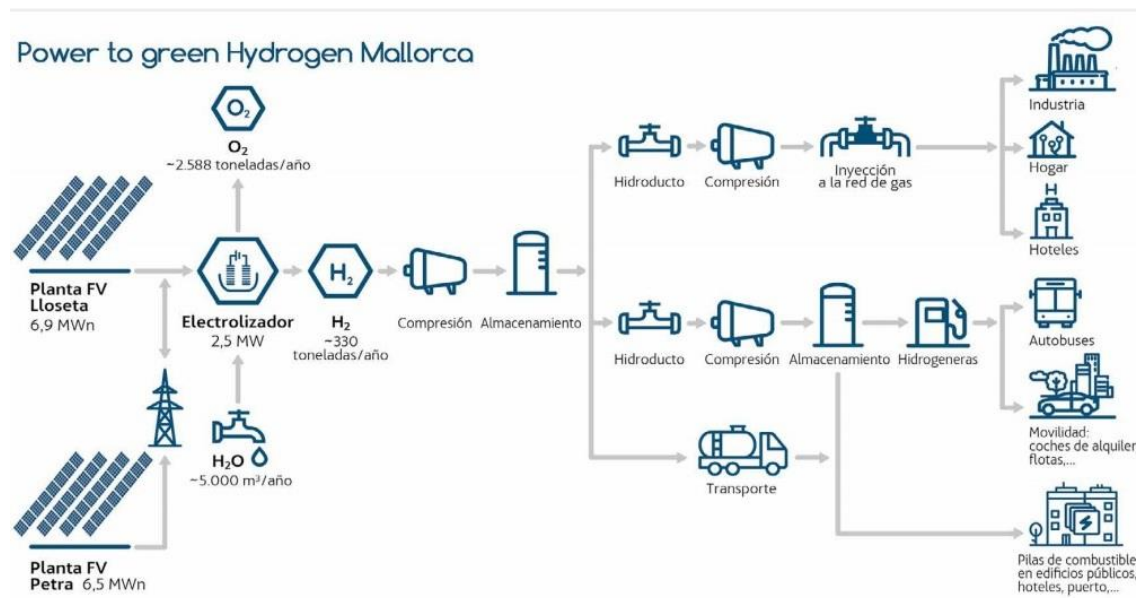
Por otro lado, es fundamental tener en cuenta la infraestructura necesaria para la generación de energía utilizada en el proceso de electrólisis, ya que este tiene un alto consumo. Para ello, la planta de electrólisis debería tener en las proximidades plantas de energía renovable de distintos tipos. Las más conocidas son las de energía eólica, que utilizan molinos para transferir la energía del viento en electricidad; la energía fotovoltaica, que utiliza paneles solares para transformar los fotones de la luz solar en electricidad; y la hidroeléctrica, que utiliza el movimiento del agua para generar la electricidad con presas y turbinas. Esta infraestructura puede estar diseñada para la producción del hidrógeno, y ser durante la vida útil su fuente de energía, en cuyo caso se estaría hablando de un modelo “isla”; o puede ser externa, y vender la electricidad a la planta de electrólisis a través de un PPA (más sobre este tema en el apartado de costes).

Para el almacenamiento, el transporte y la distribución, las plantas de producción de hidrógeno deben contar con infraestructura adicional. El almacenamiento del hidrógeno es un componente crucial para su utilización efectiva, ya que permite gestionar la producción y el consumo de manera eficiente. Hay diferentes métodos y tecnologías utilizadas para almacenar el hidrógeno, que se detallarán en el apartado siguiente de almacenamiento. En cuanto a la infraestructura del transporte, también existen varias técnicas utilizadas para transportar el hidrógeno hasta sus destinos.

Existen gasoductos de hidrógeno (hidroductos), que son redes de tuberías específicamente diseñadas para transportar hidrógeno a alta presión. Actualmente, el transporte de hidrógeno verde a través de gasoductos habituales presenta ciertos desafíos técnicos y de seguridad, pero es una posibilidad que se está explorando

activamente. Conseguir transportarlo a través de estas redes de gasoductos aumentaría de forma considerable su valor, ya que ahorraría la necesidad de una inversión abismal en infraestructura de tuberías y facilitaría y agilizaría su transporte. Sin embargo, por el momento no es posible, debido a lo altamente inflamable que es el elemento, y la posible fragilización de las tuberías por su transporte (Wang, J., Zhang, Y., & Wang, T., 2020). Otro método de transporte es el de los camiones que lo transportan en estado líquido. Estos vehículos están adaptados para transportarlo con seguridad, pero tiene un alto coste operativo. Para que todos estos sistemas funcionen, también es requerido que haya estaciones de distribución donde el hidrógeno se pueda dispensar a los vehículos especiales, o donde controlar el estado y la distribución del hidrógeno por los gasoductos.

El siguiente esquema muestra un ejemplo de la cadena de valor del hidrógeno de un proyecto de Enagás y Acciona para Mallorca, ofreciendo una imagen más visual de la infraestructura necesaria. En este caso, se trataría de un modelo de “isla”, conectado de forma directa a la fuente de energía renovable.



Fuente: Energias-renovables.com

iv. Métodos de almacenamiento

El almacenamiento del hidrógeno es una parte esencial en la cadena de valor del hidrógeno, ya que es necesario conservarlo de forma segura y eficiente para su posterior utilización. Los principales métodos de almacenamiento de hidrógeno son: el almacenamiento en estado gaseoso, el almacenamiento en estado líquido, el almacenamiento en materiales sólidos, y el almacenamiento en líquidos orgánicos portadores de hidrógeno.

En estado gaseoso, el hidrógeno se almacena a altas presiones en cilindros robustos hechos de materiales como acero o compuestos de fibra de carbono. Este método utiliza compresores para alcanzar las presiones necesarias y sistemas de seguridad avanzados para prevenir fugas, ofreciendo una tecnología madura y ampliamente utilizada, aunque con riesgos asociados debido a las altas presiones. En estado líquido, el hidrógeno se almacena a temperaturas extremadamente bajas en tanques especialmente aislados para mantenerlo en ese estado líquido. Este método requiere un alto consumo de energía para llevarse a cabo, pero también mantiene una alta densidad de la energía del hidrógeno y es eficiente para el transporte a largas distancias, aunque su manejo es complejo y costoso debido a las bajas temperaturas necesarias. El almacenamiento en materiales sólidos se podría dividir en dos, en los hidruros metálicos y en los materiales porosos. Los hidruros metálicos son combinaciones de algún metal y el hidrógeno. Tanto estos materiales como los porosos pueden absorber y liberar el hidrógeno, pero necesitan de una infraestructura de carga y descarga, y de control de la temperatura para poder ser operativos. La última forma común de almacenamiento de hidrógeno es la del almacenamiento en líquidos orgánicos portadores de hidrógeno (LOHC). El hidrógeno se almacena en compuestos orgánicos líquidos que pueden liberar hidrógeno mediante una reacción química. Aunque los LOHC presentan una solución prometedora, su implementación requiere una infraestructura adecuada y un manejo cuidadoso de los compuestos químicos involucrados. (Eberle, Felderhoff, & Schüth, 2009).

v. Comparación con otras formas de hidrógeno

El hidrógeno verde se distingue de otras formas de hidrógeno, como el hidrógeno gris y el azul, principalmente por su impacto ambiental y su método de producción. El hidrógeno verde se produce mediante electrólisis del agua utilizando electricidad de fuentes renovables, lo que resulta en cero emisiones de dióxido de carbono durante su producción. En contraste, el hidrógeno gris se produce a partir de gas natural mediante un proceso de reformado con vapor que libera grandes cantidades de CO₂, contribuyendo significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero (González Enríquez, D. 2023). El hidrógeno azul, por su parte, también se produce a partir de gas natural, pero incluye la captura y almacenamiento de carbono (CCS) para reducir las emisiones de CO₂. Sin embargo, la tecnología de CCS no es completamente eficiente, y aún se generan algunas emisiones residuales (Melaina et al., 2013).

En términos de sostenibilidad, el hidrógeno verde es claramente la opción más favorable debido a su producción limpia y renovable. Aunque el hidrógeno azul presenta una mejora respecto al gris al mitigar parcialmente las emisiones de carbono, sigue dependiendo de combustibles fósiles y tecnologías de captura de carbono que todavía están en desarrollo y no son infalibles (Hydrogen Science Coalition, 2023). A pesar de los avances tecnológicos, el coste del hidrógeno verde es actualmente más elevado que el del hidrógeno gris y azul, debido a los costes asociados con la generación de electricidad renovable y la electrólisis. No obstante, se espera que con el tiempo y el avance de las tecnologías renovables y de electrólisis, los costes del hidrógeno verde disminuyan, haciéndolo una alternativa más competitiva y accesible.

2. Costes

Como se venía comentando, los costes de producción del hidrógeno verde son muy superiores a los del hidrógeno gris habitual. Se deben analizar desde distintos frentes, atendiendo a los costes de producción; de almacenamiento, transporte y logística; y a los costes financieros. Además, para analizar los costes de producción, se

deben tener en cuenta varias líneas distintas de costes asociados. Debe valorarse el componente de las fuentes de energía (teniendo en cuenta además que deben ser renovables) atendiendo a su forma de captación, los costes del agua utilizada, el de la tecnología de la electrólisis, y los costes operativos y de mantenimiento (incluyendo personal, maquinaria, etc.). Adicionalmente, para realmente valorarlo como posible activo de inversión y sopesar su viabilidad de uso común en el futuro, se deben comparar estos costes con los de otras fuentes de energía. En el presente trabajo, se analizarán principalmente los costes dentro del territorio nacional (España).

i. Análisis de costes de fuentes de energía

Para los costes de la electricidad renovable que se utilizará para el proceso de la electrólisis en la producción del hidrógeno, es importante analizar los factores geográficos y los factores del mercado de electricidad, ya que de ellos depende en gran parte la disponibilidad de las fuentes de energía y con ello su coste. Con eso en mente, se divide el análisis de los costes de electricidad en dos: por un lado, se analizarán los costes con un modelo de obtención de electricidad mediante la conexión a la red eléctrica, y por otro, con un modelo “isla” por el que hay una conexión directa entre las fuentes de energía y las plantas de electrólisis.

La conexión a la red eléctrica a su vez puede venir dada de tres formas distintas: firmando de un contrato de PPA (Power Purchase Agreement) con un proveedor, comprando electricidad en el mercado diario público, o mediante una combinación de ambos métodos. En el primer escenario, la producción de hidrógeno estará restringida por la cantidad de horas acordadas en el PPA. Además, para certificar el hidrógeno como renovable, deberá cumplir con los criterios de correlación temporal horaria establecidos en el Acto Delegado (UE) 2023/1184 (Cossent et al., 2023). Por otro lado, comprando la electricidad en el mercado público se eliminarían las limitaciones del número de horas en el que puede operar el electrolizador. Sin embargo, esta opción tendría varias desventajas. Se perdería la opción de que el hidrógeno producido se certificase como RFNBO (Combustibles renovables de origen no biológico), por lo que

ya no estaríamos hablando de hidrógeno verde, sino gris. Además, si la necesidad horaria de conexión a la red fuese alta, implicaría operar el electrolizador durante horas de alta demanda eléctrica, que aumentaría de forma sustancial el precio y por ende los costes operativos. Por ello, para producir hidrógeno verde las empresas deberían basarse principalmente en los acuerdos de PPA.

En el modelo isla, la planta donde se encuentra el electrolizador está directamente conectada con la fuente de energía renovable, como puede ser un parque eólico o de paneles solares. No está conectada a ninguna red, ni depende de unos terceros, sino que obtiene toda la electricidad necesaria de una zona localizada dentro de un ámbito determinado (normalmente cerca del electrolizador). Por este motivo, es muy importante tener en cuenta los factores geográficos, ya que montar una planta de producción de hidrógeno verde en zonas con poco sol, poco viento, y poca agua complicaría mucho la generación de la energía necesaria. Además, las horas de funcionamiento del electrolizador en este modelo dependen completamente de la capacidad de las fuentes para generar energía. En términos económicos, los costes variables son menores a los del modelo de conexión a red, ya que se ahorran los cargos y peajes por la conexión, además de que se asume todo el margen de la venta. Sin embargo, el impacto del gran CAPEX que implica la construcción o compra de una planta de energía de estas características se ve reflejado en el coste final, determinado también por el número limitado de horas (Cossent et al., 2023).

El modelo óptimo para conseguir beneficios con la producción de hidrógeno verde es una combinación de los dos mencionados, un modelo híbrido. De esta forma, el electrolizador está conectado tanto a la red eléctrica como a una fuente directa de energía renovable. A pesar de tener que incurrir en los costes que supone la conexión con la red eléctrica, supone muchos beneficios contar con ambos modelos. Garantiza que la generación de hidrógeno no dependa solo de las horas en las que la fuente de energía renovable está produciendo, lo que rentabiliza más la inversión en el CAPEX. Además, el hecho de estar conectado a la red eléctrica permite que se pueda vender el exceso de energía producida en caso de no ser usada. Es importante que, de media, la electricidad usada mantenga los estándares requeridos para considerarse RFNBO y que

así el hidrógeno producido sea considerado verde.

ii. Análisis de otros costes de producción

El proceso de electrólisis conlleva otros costes de producción muy relevantes que no deben dejarse de lado. Entre ellos, los más importantes son el coste de agua, el coste de la tecnología de la electrólisis, y los costes operativos y de mantenimiento.

El coste del agua, aunque relativamente bajo en comparación con otros costes, puede variar dependiendo de la disponibilidad y calidad del recurso en la región de producción. Es esencial considerar tanto el coste del agua dulce como los gastos asociados a la desalinización en zonas donde el agua salada es la fuente principal (Wulf & Kaltschmitt, 2018). Además, la tecnología de la electrólisis representa una inversión significativa. Los electrolizadores, que pueden ser de diferentes tipos como alcalinos, PEM (membrana de electrolito de polímero) o de óxido sólido, tienen diferentes costes de capital y eficiencia, lo que influye en el coste total del hidrógeno producido (Bhandari et al., 2014).

Los costes operativos y de mantenimiento también son cruciales. Incluyen el gasto en electricidad para el funcionamiento de los sistemas auxiliares, el mantenimiento regular de los electrolizadores, y los reemplazos de componentes necesarios debido al desgaste. Estos costes pueden variar significativamente según la tecnología utilizada y la escala de producción (Saba et al., 2018). Además, se deben tener en cuenta todo el personal necesario para el funcionamiento correcto de la planta, y los distintos ingenieros o inspectores que realizarán de manera periódica inspecciones para asegurar que todo funciona bien. Un manejo eficiente de estos costes operativos es vital para asegurar la competitividad del hidrógeno verde frente a otras fuentes de energía.

iii. Análisis de costes de almacenamiento y transporte

El proceso de almacenamiento, transporte y logística del hidrógeno verde conlleva una serie de costes importantes que afectan la viabilidad económica de una planta de electrólisis. El almacenamiento del hidrógeno, ya sea como gas comprimido o en forma líquida criogénica, implica costes iniciales significativos para la instalación de los sistemas necesarios, así como costes recurrentes de mantenimiento para garantizar la seguridad y la eficiencia del almacenamiento. Además, el transporte del hidrógeno a través de gasoductos especializados o camiones cisterna presenta desafíos técnicos y costes adicionales relacionados con la infraestructura, la seguridad y el cumplimiento de las regulaciones estrictas para evitar fugas y explosiones (Gondal, 2016).

En cuanto a la logística, los costes incluyen la planificación y coordinación de la cadena de suministro de hidrógeno, asegurando una integración eficiente de la producción, almacenamiento y transporte. Esto puede implicar inversiones significativas en sistemas de gestión y recursos humanos especializados para manejar la logística de manera efectiva. Además, la creación y mantenimiento de puntos de distribución, como estaciones de servicio de hidrógeno, añaden otra capa de costes operativos que deben ser considerados para garantizar la viabilidad económica del hidrógeno verde (Arena et al., 2019).

iv. Análisis de costes financieros

La generación de hidrógeno verde requiere una inversión considerable en infraestructura y tecnología, a menudo implicando la necesidad de financiación externa. Los costes financieros asociados a préstamos incluyen los intereses, que dependen de las tasas del mercado y las condiciones específicas del préstamo, como el período de amortización y la estructura de pagos. Además, se deben considerar las comisiones bancarias y otros gastos relacionados con la obtención de financiación, como los costes

de apertura y administración, que pueden ser significativos.

Adicionalmente, los costes de garantía, como seguros o avales, representan un gasto adicional necesario para asegurar la financiación. Sin embargo, muchos gobiernos están ofreciendo incentivos y subvenciones para promover la producción de hidrógeno verde, lo cual puede reducir la dependencia de préstamos comerciales y sus costes financieros asociados. Aunque acceder a estos fondos implica algunos costes administrativos y de cumplimiento, estos apoyos financieros pueden hacer que los proyectos de hidrógeno verde sean más viables económicamente. Para conseguir el objetivo de cero emisiones netas del hidrógeno, se calcula que se deben invertir 3 trillones de dólares, por lo que las ayudas son fundamentales (Hydrogen Council, 2021).

v. Comparación de costes con otras fuentes de energía

El hidrógeno verde tiene costes de producción significativamente más altos en comparación con el hidrógeno gris y otras fuentes de energía como el gas natural. Estos altos costes se derivan principalmente de la necesidad de utilizar electricidad de fuentes renovables para la electrólisis, la cual es más cara que los métodos de producción de hidrógeno gris, que utilizan gas natural sin capturar las emisiones de CO₂. Los costes de producción del hidrógeno verde incluyen no solo la electricidad renovable sino también el agua, la tecnología de electrólisis, y los costes operativos y de mantenimiento. El hidrógeno gris y el gas natural se producen de formas distintas, sin necesidad de agua ni de la maquinaria para la electrólisis. Su producción está más establecida y asentada, y con ello los costes de producción se ven muy reducidos frente a los del hidrógeno verde. (Grube et al., 2018).

Además de los costes de producción, el hidrógeno verde enfrenta desafíos adicionales en términos de almacenamiento y transporte. Los sistemas de almacenamiento y transporte especializados necesarios para el hidrógeno verde, como los tanques de alta presión y las instalaciones criogénicas, añaden costes significativos en comparación con las infraestructuras ya establecidas para el gas natural. La logística y distribución del hidrógeno verde también son más complejas y costosas debido a la necesidad de mantener la pureza y prevenir fugas.

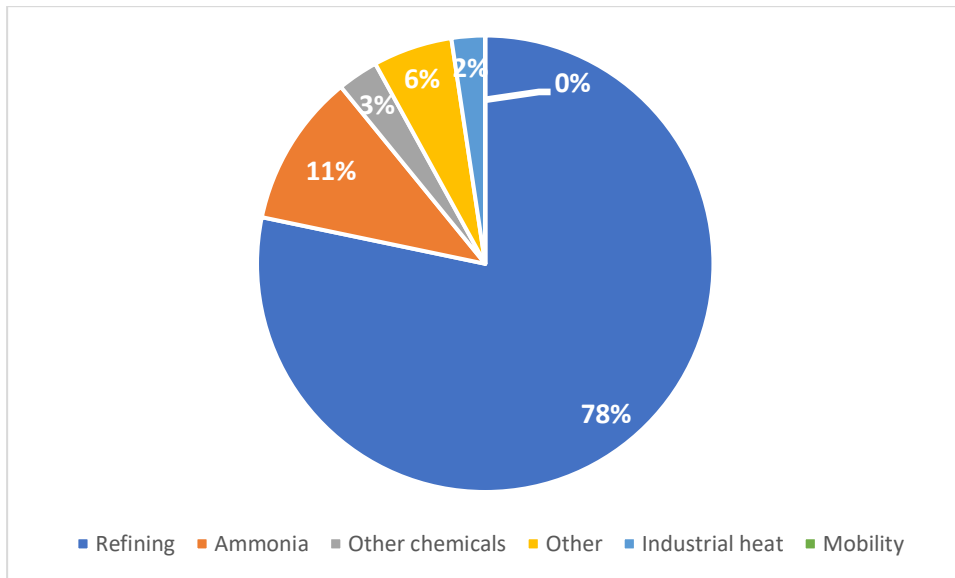
II. SITUACIÓN ACTUAL EN LA SOCIEDAD

1. Aplicaciones actuales del hidrógeno: industria

El mayor uso del hidrógeno en España actualmente se da en el sector industrial. Tiene varias aplicaciones en la industria en España, destacándose por su versatilidad y su capacidad para contribuir a la descarbonización de diferentes sectores. Actúa con un papel distinto al que tiene el gas natural, que en la industria tiene un papel más enfocado en la generación de electricidad y como combustible en procesos industriales. El hidrógeno actualmente se destina principalmente al refinado y a la producción de amoníaco. De hecho, de las 611.840 toneladas de hidrógeno que se consumieron en España en 2022, el 89.1% se destinó a la industria del refinado y la producción de amoníaco. La mayor parte de este consumo se debe a procesos industriales críticos como la hidrogenación y la desulfuración en refinerías, que utilizan el hidrógeno para eliminar impurezas del petróleo crudo y producir combustibles más limpios. Este uso es esencial para cumplir con las normativas ambientales y mejorar la calidad de los productos refinados. Además, la producción de amoníaco para fertilizantes es otro uso significativo del hidrógeno en España. El proceso Haber-Bosch, que combina hidrógeno con nitrógeno del aire, es fundamental para la fabricación de fertilizantes, un componente clave en la agricultura. La alta demanda de amoníaco refleja la importancia del hidrógeno en apoyar la producción agrícola sostenible (European Hydrogen Observatory, 2023).

Entre otras aplicaciones del hidrógeno en la industria se incluye la producción de metanol, que sirve como materia prima para numerosos productos químicos como plásticos y solventes (Bowker, 2019). Además, es utilizado en pilas de combustible para la generación de electricidad. Asimismo, el hidrógeno se emplea para almacenar el

exceso de energía generada por fuentes renovables como la eólica y la solar, facilitando el equilibrio entre oferta y demanda eléctrica y asegurando un suministro continuo (CSIC, 2022).



Fuente: European Hydrogen Observatory

2. Aplicaciones actuales del hidrógeno: transporte

El hidrógeno está emergiendo como una solución clave para descarbonizar el sector del transporte, con aplicaciones significativas en varios modos. Los vehículos pesados y de larga distancia, como camiones y autobuses de pila de combustible de hidrógeno, son cada vez más comunes debido a su capacidad para recorrer largas distancias con tiempos de recarga rápidos, comparables a los vehículos diésel, pero sin emisiones de carbono. En Europa, se espera un incremento significativo de camiones pesados impulsados por hidrógeno, con proyecciones de hasta 850,000 unidades para 2035, consumiendo aproximadamente 6,900 kilotoneladas de hidrógeno anualmente (McKinsey, 2023).

En el sector ferroviario, los trenes impulsados por hidrógeno son especialmente prometedores para líneas rurales y regionales donde la electrificación de las vías no es económicamente viable. Estos trenes pueden operar en modos bimodales, utilizando tanto líneas electrificadas como convencionales, lo que aumenta su flexibilidad y eficiencia (Belfer Center, 2023). Además, en aviación y transporte marítimo, el hidrógeno se presenta como una alternativa de bajo carbono. En aviación, puede ser utilizado directamente o en forma de combustibles sintéticos, mientras que, en el transporte marítimo, el hidrógeno y el amoníaco son vistos como soluciones viables para reducir las emisiones, aunque enfrentan desafíos relacionados con el almacenamiento y la infraestructura de reabastecimiento (European Commission, 2024).

3. Aplicaciones actuales del hidrógeno: energía

Por último, más allá de la industria y el transporte, el hidrógeno también tiene grandes oportunidades de aprovecharse como fuente de energía. El hidrógeno puede ser utilizado en turbinas de gas y pilas de combustible para generar electricidad, proporcionando una fuente de energía flexible que puede complementar la energía renovable intermitente, como la solar y la eólica. Esto es especialmente relevante para el almacenamiento de energía a largo plazo, donde el hidrógeno se puede almacenar y luego reconvertir en electricidad cuando la demanda es alta o la producción de energía renovable es baja. Otra aplicación importante es en la calefacción de edificios, donde el hidrógeno puede ser mezclado con gas natural en redes de distribución existentes o utilizado directamente en calderas y sistemas de calefacción a base de hidrógeno. Esta capacidad de integración en infraestructuras existentes facilita la transición hacia sistemas de energía más limpios (IEA, 2019).

III. PROYECTOS Y POLÍTICAS ACTUALES EN DIFERENTES PAÍSES

1. Hoja de Ruta del Hidrógeno en España

La Hoja de Ruta del Hidrógeno en España, aprobada por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), constituye una estrategia destinada a promover el desarrollo del hidrógeno renovable como un vector energético esencial para alcanzar la neutralidad climática y transformar el sistema energético del país. El documento establece objetivos específicos y líneas de acción detalladas para fomentar la producción, distribución y uso del hidrógeno verde en diversas aplicaciones.

Entre los principales objetivos destacan la neutralidad climática para 2050, buscando un sistema eléctrico 100% renovable y libre de carbono; la instalación de al menos 4 GW de capacidad de electrólisis para 2030; y el fomento de la creación de empleos verdes junto con el desarrollo de cadenas de valor industrial innovadoras.

Las líneas de acción se dividen en varias áreas clave. Respecto a la producción de hidrógeno renovable, se incentiva la instalación de plantas de electrólisis que utilicen fuentes de energía renovable y se establecen esquemas de incentivos financieros y mecanismos de apoyo. En aplicaciones estratégicas, se promueve el uso del hidrógeno en procesos industriales intensivos en carbono, en el transporte a través de la adopción de vehículos de pila de combustible y la instalación de infraestructuras de recarga, y en la generación de electricidad y sistemas de calefacción. En el ámbito de la innovación, se impulsan programas de investigación y desarrollo para mejorar las tecnologías de producción y uso del hidrógeno, así como la colaboración internacional para compartir conocimientos y atraer inversiones.

En cuanto al marco regulatorio y normativo, se propone la simplificación administrativa, la modificación de la clasificación de la producción de hidrógeno renovable, y la implementación de un sistema de Garantías de Origen para certificar el uso de fuentes renovables. También se contemplan incentivos fiscales y financieros para reducir los costes de producción del hidrógeno renovable.

La monitorización y evaluación de esta hoja de ruta incluye la creación de un sistema para monitorizar la producción y consumo de hidrógeno, garantizando la trazabilidad y evaluación de las medidas implementadas, y la evaluación de la viabilidad de establecer objetivos de penetración del hidrógeno renovable para 2025-2030.

En la hoja de ruta también se describe la “visión 2030 y 2050”, con los objetivos de la Unión Europea sobre el hidrógeno verde y el papel que desempeñará España en conseguirlos. Para 2030, en España se espera alcanzar al menos 4 GW de capacidad de electrólisis, desarrollar entre 300 y 600 MW en proyectos demostrativos, y establecer corredores de hidrógeno y hubs de innovación en varias regiones del país. La visión para 2050 es lograr un sistema energético totalmente descarbonizado con el hidrógeno renovable como elemento central, aumentar la independencia energética de España y contribuir significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (MITECO, 2020).

2. Situación en otros países

La Unión Europea ha establecido objetivos ambiciosos para el desarrollo del hidrógeno renovable como parte de su estrategia para alcanzar la neutralidad climática, por lo que el resto de los países miembros tendrán unas políticas y unas líneas de acción similares a las marcadas en España. El Fit for 55 y el REPowerEU son paquetes de políticas clave que buscan acelerar la producción y uso del hidrógeno renovable. La UE tiene como objetivo producir 10 millones de toneladas de hidrógeno renovable y importar otras 10 millones de toneladas para 2030, lo que totaliza 20 millones de toneladas para esa fecha (World Economic Forum, 2023). Para alcanzar estos objetivos, la UE ha implementado 20 acciones clave que incluyen el desarrollo de infraestructuras, la facilitación de inversiones a través de la Clean Hydrogen Alliance, y la creación de un marco regulatorio claro para la certificación del hidrógeno renovable (European Commission, 2023).

En Estados Unidos, la Estrategia Nacional de Hidrógeno Limpio y la Hoja de Ruta proporcionan un marco estratégico para la producción, transporte, almacenamiento y uso del hidrógeno limpio. Esta estrategia, impulsada por la Ley de Infraestructura Bipartidista y la Ley de Reducción de la Inflación, incluye subsidios significativos y créditos fiscales para fomentar la producción de hidrógeno bajo en carbono. Por ejemplo, se han asignado 8 mil millones de dólares para la creación de centros de hidrógeno limpio, y se ofrecen créditos fiscales de hasta 3 dólares por kilogramo de hidrógeno bajo en carbono producido (Hydrogen Council, 2023), (U.S. Department of Energy, 2023).

China ha presentado su Plan de Hidrógeno a Largo Plazo, con el objetivo de descarbonizar los clusters industriales intensivos en hidrógeno y aumentar significativamente la producción de hidrógeno verde para 2030. Japón, por su parte, ha incluido el hidrógeno de bajas emisiones como una tecnología clave en su Estrategia de Crecimiento Verde para lograr la neutralidad de carbono en 2050. Esta estrategia se centra en la descarbonización de sectores críticos como la generación de energía, la industria y el transporte (Vector Renewables, 2022).

En conclusión, el hidrógeno renovable es una prioridad global. Las principales potencias han implementado estrategias ambiciosas para descarbonizar sectores industriales y de transporte, subrayando la importancia del hidrógeno como vector energético clave. La colaboración internacional y el compromiso compartido serán esenciales para alcanzar los objetivos establecidos.

IV. EL HIDRÓGENO VERDE COMO ACTIVO DE INVERSIÓN

1. Historial como activo

i. Evolución del interés y la inversión en el hidrógeno verde

El interés en el hidrógeno verde como activo de inversión ha evolucionado significativamente en la última década, especialmente impulsado por la necesidad global de descarbonizar la economía y cumplir con los objetivos climáticos. En sus inicios, el hidrógeno verde era considerado una tecnología emergente con potencial a largo plazo, pero con barreras significativas debido a los altos costes de producción y la falta de infraestructura adecuada. Sin embargo, a medida que los costes de las energías renovables disminuyeron y las tecnologías de electrólisis mejoraron, el hidrógeno verde comenzó a atraer una mayor atención de los inversores. Este cambio se ha visto reflejado en el aumento de proyectos e inversiones en infraestructura para la producción y el transporte de hidrógeno verde.

En la actualidad, el mercado del hidrógeno verde está en un punto de inflexión. Los gobiernos y las grandes corporaciones han realizado compromisos sustanciales para apoyar el desarrollo de esta tecnología. Por ejemplo, la Comisión Europea ha implementado la estrategia del hidrógeno, que incluye objetivos claros y fondos significativos para la producción de hidrógeno renovable, con el objetivo de alcanzar una capacidad de producción de 10 millones de toneladas anuales para 2030. De manera similar, en los Estados Unidos, la Ley de Infraestructura Bipartidista y la Ley de Reducción de la Inflación han destinado miles de millones de dólares en subsidios y créditos fiscales para fomentar la producción de hidrógeno bajo en carbono (McKinsey, 2023), (MDPI, 2024).

El hidrógeno verde ha comenzado a valorarse como una commodity en los mercados globales. A pesar de que aún no cuenta con un mercado regulado o un OTC consolidado como el gas natural o el petróleo Brent, la valoración como commodity viene por las altas perspectivas de futuro que se le está dando, especialmente desde 2020. Este cambio se debe a la creciente demanda de energías limpias y la proyección de que el hidrógeno verde jugará un papel crucial en la descarbonización de múltiples sectores. Inversores institucionales y fondos de inversión han comenzado a apostar por

el hidrógeno verde no solo por sus beneficios ambientales, sino también por las oportunidades financieras que representa. De hecho, muchos inversores están posicionándose en el mercado de hidrógeno verde con el objetivo de obtener ganancias financieras a largo plazo, sin necesariamente tener intenciones de explotarlo directamente. Se han creado multitud de ETFs, índices, y fondos de inversión enfocados al hidrógeno verde para que prácticamente cualquiera pueda invertir y esperar una rentabilidad (Rankia, 2024). Este fenómeno ha sido impulsado por las expectativas de que el hidrógeno verde alcanzará una competitividad de costes comparable a los combustibles fósiles en las próximas décadas (PwC, 2023).

2. Precios y modelo de compraventa

Los precios y el modelo de compraventa del hidrógeno verde es algo que se debe analizar en detalle para poder valorar su atractividad como activo financiero. Actualmente el precio del hidrógeno gris se encuentra entre 1 y 2€/kg, mientras que el hidrógeno verde varía entre 3 y 8€/kg (PwC, 2023) (otros estudios lo consideran con un precio incluso más alto). Se espera que esta diferencia se reduzca conforme se invierta más en el hidrógeno renovable. Por otro lado, ambas formas de hidrógeno están a falta de un mercado regulado que facilite su compraventa, ya que la creación de este mercado aumentaría de forma exponencial su potencial como activo donde invertir. Sin embargo, aún existen varios factores que dificultan establecer un precio regulado. Por ello, es imprescindible analizar el modelo actual de compraventa del hidrógeno, y sus perspectivas a futuro.

i. Modelo de compraventa actual del hidrógeno y perspectivas a futuro

Actualmente no hay un mercado existente consolidado del hidrógeno que funcione de la misma forma que podría funcionar el del gas natural, el de la electricidad o el de otros commodities como el petróleo Brent. En lugar de eso, la compraventa de hidrógeno se lleva a cabo a través de acuerdos directos entre las empresas, también conocidos como transacciones Over-the-Counter (OTC). Estos contratos especifican

detalladamente las condiciones de entrega, cantidad, precio y calidad del hidrógeno, así como otros términos relevantes. Entre estos tipos de acuerdos están los ya mencionados Power Purchase Agreements (PPAs). Para los contratos de hidrógeno verde, se les considera como un tipo especial de contratos OTC, ya que son muy específicos. De hecho, se les considera que forman parte del modelo de cadena de suministro energética.

La caracterización de cadena de suministro se distingue por tener contratos y relaciones a largo plazo, confianza en la contrapartida, escaso número de participantes, baja transparencia, y un grado de desajuste entre la oferta y la demanda (Cossent et al., 2023). La principal dificultad para gestionar los precios del hidrógeno es el transporte desde la oferta a la demanda. Al tener una estructura de transporte poco consolidada y con altos costes, el precio varía mucho dependiendo de cada caso. Una posible solución para este problema será la creación de “hubs” regionales donde se produzca el hidrógeno y sirva de referencia para el ajuste de los precios a nivel regional y global. Sin embargo, el mercado no se encuentra en ese estado aún, ya que los precios que se determinan para el hidrógeno renovable (como los de Platts Global S&P) están basados en análisis de costes operativos y de capital, en función de los proyectos y ubicación (Cossent et al., 2023).

Un activo similar que se podría tomar como referencia para imitar su consolidación en un mercado es el del gas natural licuado (GNL). En este activo, en vez de fijar un precio en base a los costes incurridos hasta entregarlo al destinatario, se ajusta el precio en base a los combustibles competidores, como puede ser el petróleo. Al tener el petróleo un valor cotizado en un mercado centralizado, resulta más sencillo ajustar en base a un factor de corrección y conseguir que el precio del GNL tenga las variaciones correctas. Para el caso del hidrógeno verde, un competidor directo que también está en el mercado centralizado sería el gas natural, por lo que se podrían establecer los precios en base a ello con ciertos factores de ajuste (más sobre las similitudes con otros commodities en el apartado de comparación de atributos frente a otros commodities).

Actualmente la base de datos con un histórico más largo de precios está en la plataforma proporcionada por S&P Global. Sus valoraciones están basadas en transacciones realizadas, aunque son datos muy limitados, especialmente en Europa. Los datos tienen información con frecuencia diaria desde diciembre de 2021. Serán los datos analizados para llevar a cabo los modelos explicativos y cuantitativos.

3. Crecimiento esperado

i. Proyecciones de crecimiento de la industria

Tras los análisis de proyectos, propuestas y políticas en los distintos países sobre las perspectivas del hidrógeno, no es de extrañar que la producción aumente de manera significativa. Según fuentes de la industria y a SPGlobal, se espera que la producción de hidrógeno aumente algo más de 25% para el 2030 (S&P Global, 2021). Esta cifra puede parecer pequeña al recordar la proyección plasmada por los diferentes organismos gubernamentales, que buscan un crecimiento exponencial. Sin embargo, se trata del hidrógeno en su totalidad, no solo el verde. Teniendo en cuenta que el hidrógeno verde a nivel global actualmente representa alrededor de 1% (S&P Global, 2021), y que ese aumento del 25% va a ser en su mayor parte por hidrógeno verde, el crecimiento de la industria renovable es muy alto. En 2022, España contaba con una capacidad aproximada de alrededor de 40MW, mientras que pretende llegar a los 4GW para 2030 (Green Hydrogen Organisation, 2023), por lo que el crecimiento a nivel nacional también será exponencial.

En términos de valor monetario de mercado, el mercado global del hidrógeno verde se valoró en 9.6 millones de dólares en 2023, y se espera que crezca a una tasa compuesta anual (CAGR) superior al 31% entre 2024 y 2032. Se anticipa que la capacidad global de despliegue de hidrógeno verde alcanzará los 150 GW para 2030, impulsada por la creciente preocupación por las emisiones de carbono y los esfuerzos por adoptar alternativas de combustibles más limpias (GMI Insights, 2023).

ii. Factores que impulsan el crecimiento del hidrógeno

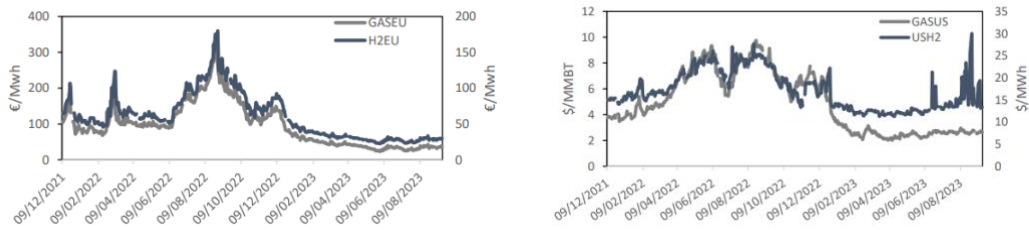
El crecimiento del mercado del hidrógeno verde está impulsado por factores tecnológicos, económicos y regulatorios que crean un entorno favorable para su desarrollo global. El compromiso mundial para reducir emisiones de gases de efecto invernadero aumenta la demanda de hidrógeno verde, sustituyendo combustibles fósiles y utilizando energía excedente de fuentes renovables para producir hidrógeno mediante electrólisis. Avances tecnológicos en electrólisis, como los electrolizadores PEM y alcalinos, están reduciendo costes y aumentando la eficiencia, haciendo el hidrógeno verde más competitivo. Además, subsidios, incentivos fiscales y políticas favorables, como la estrategia de hidrógeno de la UE y leyes en EE.UU., apoyan su crecimiento. La demanda crece en sectores como industria, transporte y generación de energía, con aplicaciones que incluyen flotas de camiones, aviones propulsados por hidrógeno y plantas de energía más flexibles y limpias.

Entre los factores que afectan el crecimiento del hidrógeno como activo donde invertir se encuentran los recién mencionados, además de las alteraciones de precio que sufre el kg de hidrógeno en el mercado. Cuanto más se acerque el precio del hidrógeno verde al del hidrógeno gris, más atractivo será para las empresas que lo utilizan. En la sección V del presente trabajo se comentará más en detalle los factores que influyen en las variaciones del precio del hidrógeno, que por lógica están relacionados con los mencionados anteriormente.

4. Comparación de atributos frente a otros commodities

Como se adelantaba en el apartado del análisis del modelo de compraventa del hidrógeno verde, el hidrógeno verde comparte muchas similitudes con otros commodities que ya se encuentran más consolidados en el mercado. El activo con el que

más se asemeja es con el gas natural licuado. Al analizar sus variaciones de precio históricas en el siguiente gráfico, se aprecia cómo ambos activos están muy correlacionados. Esto se debe en gran parte al coste variable que tiene el hidrógeno: la electricidad, y cómo este está ligado al precio del gas (Cossent et al., 2023).



Fuente: (Cossent et al., 2023)

Además, aunque el proceso de producción de ambos sea distinto, cuentan con una cadena de valor similar. Ambos gases, una vez licuados, pueden requerir infraestructura criogénica para su transporte y almacenamiento. Las similitudes incluyen la necesidad de transporte especializado y el manejo de riesgos asociados con el almacenamiento de líquidos criogénicos. Para la distribución, ambos suelen ser utilizados de manera directa en las aplicaciones industriales, o inyectados en gasoductos. Ambos productos comparten desafíos similares en términos de costes de infraestructura, manejo de riesgos y la necesidad de mercados estables para justificar las inversiones significativas requeridas.

Otro commodity que también comparte similitudes con el hidrógeno es el petróleo crudo. Ambos son fuentes de energía dedicadas en gran parte a la industria y el transporte. El petróleo también es usado para el refinado y la producción de fertilizantes y otros productos químicos industriales. Además, al igual que con el gas natural licuado, a pesar de que el proceso de producción sea muy distinto, comparten similitudes en el transporte y almacenamiento del activo.

El hecho de que el precio del hidrógeno vaya de la mano con el de sus productos

competidores implica que el aumento de los otros pueda favorecer a la industria del hidrógeno, haciendo su precio más competitivo. Sin embargo, al tratarse de fuentes energéticas, una subida de estos commodities podría implicar una subida de inflación, que repercutiría negativamente al desarrollo de los proyectos de hidrógeno.

V. FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS VARIACIONES DEL PRECIO DEL HIDRÓGENO

1. Descripción de los principales factores políticos, económicos y tecnológicos que influyen en los precios

Tal y como se venía comentando, hay varios factores a tener en cuenta a la hora de explicar los precios del hidrógeno verde. El principal factor que determina los precios del mismo es la variación de los precios de otros combustibles comparables, como pueden ser el gas natural o el petróleo crudo (Cossent et al., 2023). Variaciones en estos precios implican una mayor o menor competitividad del hidrógeno, lo que determina su demanda y por tanto su precio. Sin embargo, hay otros factores que se deben mencionar para poder explicar la competitividad real que está adquiriendo el hidrógeno. Entre ellos está el coste del MWh renovable (equiparable a su coste de producción), los tipos de interés (ya que la financiación de los proyectos depende de ello), y la variación del precio de emisiones de CO₂. Entrando más en detalle en este último punto, se debe comentar que las empresas tienen ciertos límites de emisiones de CO₂, y deben pagar si los exceden. De hecho, las toneladas de emisiones de CO₂ cotizan en un mercado, por el que las empresas pueden comprar y vender emisiones. Sin embargo, debido al impacto más a largo plazo que tienen estos factores, y las tendencias que solo podrían verse en intervalos más amplios, se dejarán fuera del modelo explicativo, ya que no existe un histórico de precios del hidrógeno lo suficientemente amplio como para poder ver los impactos de estos factores reflejados.

Los factores mencionados son activos que tienen una fluctuación, y con los que es fácil comparar correlaciones. Sin embargo, también hay otros factores más cualitativos, que dependen de decisiones políticas y enfoques de los distintos países. Hechos como la Guerra de Ucrania u otros eventos que modifican la red de suministro de energía en el mundo influyen de forma directa en el precio del hidrógeno. Otros factores macroeconómicos como los tipos de interés también afectan de manera considerable, ya que impactan en el nivel de inversión y el coste de capital. En el siguiente apartado del “análisis cualitativo de las fluctuaciones históricas y sus causas”, se analizará la correlación entre eventos y movimientos importantes que pueden determinar el precio de energía, junto con su impacto.

2. Análisis previo de los precios

i. Análisis cualitativo de las fluctuaciones históricas y sus causas

Como se venía adelantando en el apartado anterior, las situaciones especiales macroeconómicas tienen impactos considerables en el precio del hidrógeno. Algunos eventos y cambios en las relaciones internacionales pueden determinar en gran medida la variación de precios de energía en su conjunto, y con ello el precio del hidrógeno verde. El siguiente gráfico muestra la evolución de precios del hidrógeno verde, con algunos eventos importantes que han determinado cambios en el mercado de la energía a nivel global:

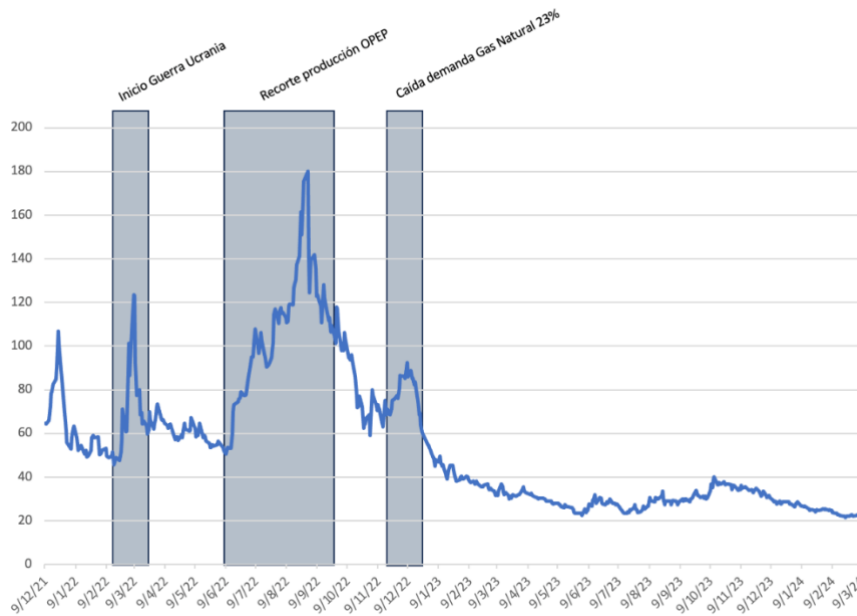


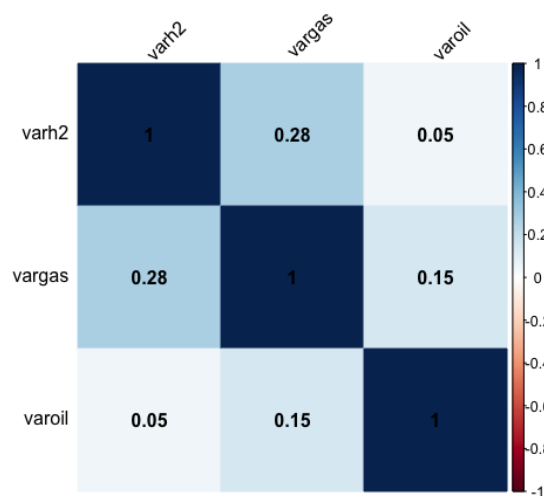
Gráfico de elaboración propia. Fuente: S&P Global

Lo primero que destaca del gráfico es el inicio de la guerra en Ucrania en febrero de 2022, que provocó un aumento abrupto en los precios debido a la incertidumbre y la disrupción en los mercados energéticos globales, alcanzando los precios del hidrógeno un pico notablemente alto. Posteriormente, los precios volvieron a subir con el recorte en la producción de petróleo por parte de la OPEP, lo que agravó la crisis energética y elevó aún más los precios del hidrógeno. Esta situación duró casi 6 meses, hasta que recuperó los niveles previos a finales de 2022. Finalmente, una caída en la demanda de gas natural en un 23% condujo a una estabilización y posterior disminución de los precios del hidrógeno a medida que la oferta comenzó a superar la demanda, y el mercado se ajustó a las nuevas condiciones energéticas globales. Este análisis muestra cómo los eventos geopolíticos y las decisiones de producción en el mercado energético tienen un impacto directo y significativo en los precios del hidrógeno.

ii. Análisis cuantitativo: Correlaciones con otros commodities

Antes de entrar en el modelo explicativo de regresión lineal, es importante comprobar que existe algún tipo de correlación entre los precios de los commodities. A

pesar de que correlación no implique causalidad, y que esto lo asegurará más el modelo explicativo, viene bien para empezar a generar algunas hipótesis sobre lo que se espera que determine más las variaciones en el precio del hidrógeno. Con ello, se han extraído los datos de los precios de los dos activos que se planteaban como similares, el gas natural y el petróleo, para compararlo. Los datos extraídos son de S&P Global, y hacen referencia los precios en Europa del hidrógeno HYNWB00, el gas natural TFMI00-NDEX, y al petróleo Brent BRN00-IFEU. Se ha realizado un tratamiento simple de los datos, ajustado la fecha y sacando los retornos para conseguir normalizar. Con ello se ha obtenido la siguiente matriz de correlación:



La matriz presenta unas correlaciones en línea con lo que se ha estudiado durante el trabajo. La mayor correlación existe entre los retornos del gas natural (variable “vargas”) y el hidrógeno verde (variable “varh2”). Sin embargo, una correlación de 0,28 no es especialmente alta, por lo que habrá que analizar con el modelo explicativo si de verdad las variaciones de una influyen en la otra. Por otro lado, se aprecia cómo los retornos del petróleo (variable “varoil”) están muy poco correlacionados con los del hidrógeno verde, con tan solo 0,05, lo que lleva a pensar que realmente no van muy de la mano. Sin embargo, sí que tienen algo más de correlación con el gas natural, 0,15.

3. Modelo explicativo de regresión lineal

i. Diseño del modelo de regresión y resultados

Al igual que para calcular las correlaciones, para el modelo explicativo se han cogido los datos del gas natural y petróleo crudo en Europa y se adaptado para tener la misma frecuencia y longevidad que los obtenidos sobre el hidrógeno verde de la plataforma de S&P Global. Para el tratamiento de datos, se han analizado los retornos de las variaciones, con el objetivo de normalizar las variables entre sí. Con ello, se ha creado un modelo de regresión explicativo, en el que se detalla el impacto que tienen las variaciones de las otras variables en el precio del hidrógeno. Los resultados son los siguientes:

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -0.000230  0.002478  -0.093   0.926
vargas      0.212650   0.032185  6.607 9.26e-11 ***
varoil      0.034799   0.103631  0.336   0.737
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.05827 on 550 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.0762,    Adjusted R-squared:  0.07284
F-statistic: 22.68 on 2 and 550 DF,  p-value: 3.42e-10

```

Los resultados no sorprenden, y confirman la hipótesis que se había generado en el apartado de las correlaciones. El gas natural tiene un impacto significativo en los movimientos de los precios del hidrógeno. Esto se aprecia analizando la primera columna de la matriz de coeficientes, que hace referencia a las Betas. De esta forma, se podría decir que por cada 1% que aumenta el precio del gas natural, el precio del hidrógeno sube en ~0,21%. El petróleo, como se esperaba, influye menos en los precios, afectando solo un 0,03%. Sin embargo, estas variaciones no se pueden asegurar sin tener en cuenta el nivel de significación de las variables. El p-valor para el gas natural tiene un valor muy bajo, por lo que se puede decir que la variable es significativa. Sin embargo, el del petróleo es superior al 10%, por lo que no asegura nada. Además, no se puede asegurar que el modelo nos proporcionase la variación del hidrógeno aun teniendo los datos futuros del gas natural y del petróleo. Esto es por el hecho de que el R cuadrado (dato que nos cuenta hasta qué punto las variables observadas explican la variable objetivo) es bastante bajo. De cualquier forma, sigue siendo un modelo útil de explicar, ya que puede dar información relativa a las variaciones de precio del

hidrógeno respecto a la de los otros commodities. El hecho de que el gas natural tenga una beta inferior a 1 significa que el hidrógeno tiene una menor sensibilidad, lo cual es muy interesante desde un punto de vista financiero.

4. Viabilidad como activo de inversión

Tras todos los análisis realizados, se puede considerar que el hidrógeno puede ser un buen activo de inversión, pero cuando el inversor busca una rentabilidad a muy largo plazo. Analizándolo desde una perspectiva puramente financiera, tiene unos retornos positivos, pero leves. Sin embargo, tiene menor sensibilidad que otros commodities, lo cual puede ser interesante para inversores con un perfil de riesgo más bajo. Por otro lado, al analizarlo desde una perspectiva más racional y de negocio, se le da más importancia al factor temporal y a sus atributos intrínsecos. No poder competir en costes frente a los otros commodities actualmente lo hace inviable como activo donde invertir a corto plazo. Las empresas, a pesar de tener una responsabilidad de sostenibilidad cada vez más creciente y estar más preocupadas por el medioambiente, priorizan sus márgenes ante todo, y por ello no les sería viable depender completamente de un activo que fuera entre 3 y 5 veces más caro. La industria debe seguir evolucionando, con inversiones en infraestructura y en I+D+I para conseguir reducir ese periodo en el que el hidrógeno se vuelve competitivo. De esta forma aumentará también su atractivo de inversión.

VI. LAS EMPRESAS DEL SECTOR DEL HIDRÓGENO

1. Descripción de las empresas y diferenciación sectorial

Conforme el hidrógeno verde va creciendo y tomando un papel cada vez más relevante en sus distintas aplicaciones, las empresas evolucionan para adaptarse y poder aprovecharse de la innovación que conlleva. Diversas empresas, desde startups

innovadoras hasta gigantes industriales establecidos, están invirtiendo fuertemente en tecnologías de producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno verde. Un claro ejemplo de esto son las grandes energéticas como Iberdrola y Acciona, que han adaptado sus estrategias y lanzado grandes inversiones para crear plantas de producción de hidrógeno verde con las que adelantarse en la carrera por la transición energética. Por otro lado, también se han creado varias startups para abordar el desafío de la producción y utilización del hidrógeno verde. Estas empresas han encontrado un hueco en el mercado donde veían un potencial desaprovechado, y son especialmente útiles para fomentar la innovación del sector. Algunas de ellas son H2Pro, SunHydrogen, y HyPoint.

Las empresas del sector del hidrógeno pueden clasificarse en distintas categorías de acuerdo con la función que representan en la cadena de valor del hidrógeno. El último eslabón de la cadena, referente a las empresas que representan las aplicaciones finales del hidrógeno verde, se analizará en el siguiente apartado, al estar directamente ligado al papel del hidrógeno en la actividad empresarial.

El primer grupo de las empresas que componen la actividad del hidrógeno verde son las productoras. Estas empresas suelen centrarse en la utilización de fuentes renovables para generar electricidad, que posteriormente se usa en procesos de electrólisis. Debido a la alta inversión inicial necesaria, suelen ser empresas grandes ya establecidas en el sector de la energía. Entre ellas destacan Iberdrola y Shell. Esta última, siendo una de las grandes petroleras que está diversificando hacia energías limpias, está desarrollando instalaciones de producción de hidrógeno verde en países como los Países Bajos y Alemania. Por otro lado, Iberdrola se ha convertido en una de las empresas líder en la transición energética a través del hidrógeno. Está invirtiendo significativamente en proyectos de hidrógeno verde, utilizando energía solar y eólica para alimentar sus electrolizadores. En 2022 inauguró la planta de hidrógeno verde de Puertollano (Ciudad Real). Esta planta cuenta con una inversión de más de 150 millones de euros, y es una de las plantas con mayor capacidad de producción de hidrógeno verde del mundo, con 20MW de capacidad (Iberdrola, n.d.).

Por otro lado, para que sea posible la producción del hidrógeno deben existir las empresas fabricantes de los electrolizadores. Las empresas que fabrican electrolizadores abarcan desde startups tecnológicas hasta grandes conglomerados industriales. Las startups, como HyStar y Enapter, se destacan por su innovación y agilidad. Este tipo de empresas suelen colaborar con universidades y centros de investigación para avanzar en sus tecnologías. Los grandes conglomerados industriales, como Siemens Energy y General Electric, poseen una infraestructura robusta y recursos significativos, permitiendo mayores inversiones a largo plazo. Otras empresas como las químicas y de ingeniería también pueden llegar a tener un papel en el desarrollo de los electrolizadores (Pérez, 2022).

Adicionalmente, también es importante el papel de las empresas de almacenamiento, logística y transporte del hidrógeno verde. Empresas como Carbotainer se dedican a diseñar y producir almacenes especiales para el hidrógeno, que luego son transportados en vehículos o conductos por empresas como Enagás.

2. Papel del hidrógeno en la actividad empresarial y privada

Como ya se ha mencionado, el hidrógeno verde está influyendo en multitud de sectores ya establecidos. Este apartado pretende dar una explicación más práctica y real de las aplicaciones del hidrógeno ya descritas en el inicio del trabajo. Con ello, se analizan en detalle cómo las empresas están aplicando el hidrógeno verde, dando ejemplos reales. Del mismo modo que se analizó al comienzo del trabajo, se deben separar los análisis del papel del hidrógeno en la actividad empresarial en tres frentes: su actividad en la industria, en el transporte, y como fuente de energía.

El hidrógeno es utilizado en la industria para producir amoníaco, refinar

petróleo, y fabricar metanol. Empresas como Yara International y CF Industries emplean hidrógeno para producir amoníaco, que se usa principalmente en fertilizantes agrícolas, esenciales para aumentar la productividad de los cultivos. En la refinación de petróleo, empresas como Shell y BP utilizan hidrógeno para producir combustibles refinados como gasolina, diésel y queroseno, que se utilizan en transporte, aviación y generación de energía. BP también produce productos petroquímicos utilizados en plásticos, productos farmacéuticos y cosméticos. En la producción de metanol, Methanex y OCI NV utilizan hidrógeno para fabricar metanol, que sirve como combustible y en la producción de plásticos y resinas. Empresas químicas como BASF y Linde emplean hidrógeno para producir una variedad de productos químicos, plásticos, pinturas y gases industriales como oxígeno y nitrógeno, utilizados en industrias como la automotriz, construcción, agricultura e incluso en aplicaciones médicas. Air Liquide produce hidrógeno y otros gases industriales usados en la refinación de metales, fabricación de semiconductores, procesamiento de alimentos y tratamientos médicos.

Empresas de transporte pesado como Alstom y Hydrogen Mobility Europe (H2ME) están liderando la implementación del hidrógeno como combustible alternativo. Alstom ha desarrollado el Coradia iLint, el primer tren de pasajeros impulsado por hidrógeno, operando en Alemania y en pruebas en otros países europeos (Alstom, 2022). H2ME agrupa a varios fabricantes para desarrollar camiones de carga pesados que utilizan hidrógeno, implementados en diversas rutas europeas para reducir emisiones en el transporte de mercancías (H2ME, n.d.). En el sector del transporte particular y público, empresas como Toyota y Hyundai están avanzando con vehículos de celda de combustible de hidrógeno. Toyota ofrece el Mirai, uno de los primeros automóviles de hidrógeno comercialmente disponibles, mientras que Hyundai ha lanzado el Nexu y el camión Xcient Fuel Cell, disponibles en varios mercados (TopGear, 2023).

Por último, el uso del hidrógeno como fuente de energía no se limita solo al transporte. Además de empresas industriales, que a menudo lo utilizan no solo como material en su proceso productivo, sino también como fuente de energía, también se

utiliza como fuente de energía para usos más cotidianos. Temas como la calefacción pueden verse revolucionados conforme avance la tecnología, con calderas de hidrógeno que pueden reemplazar las calderas de gas natural en los hogares. Calderas como la de Viessmann queman hidrógeno para producir calor, generando solo vapor de agua como subproducto (Viessmann, n.d.). Otros usos pueden incluir el uso del hidrógeno para transformarlo en electricidad para los hogares, e incluso su uso como fuente de energía para cocinas de forma similar al gas natural.

3. Previsiones de inversión privada

Las empresas privadas también buscan beneficiarse del crecimiento que tomará la industria del hidrógeno verde. No adaptar sus modelos al cambio podría dejarlas atrás por el coste monetario que se les ha instaurado a las emisiones de CO₂, que irá creciendo conforme se avance en la transición energética. Con ello, muchas empresas privadas han empezado a formalizar inversiones en la industria del hidrógeno verde, con el objetivo de poder beneficiarse de las ayudas y subvenciones que se proporcionan para ello actualmente, y buscando sacarle rentabilidad en el futuro. Se ha comentado ya cómo gigantes empresariales como Iberdrola y Shell han realizado ya inversiones millonarias con el objetivo de montar plantas de hidrógeno y adentrarse en el sector. Además de estas, muchas otras empresas están invirtiendo en ello para buscar un beneficio futuro.

La empresa tecnológica global Siemens Energy estima que reemplazar el hidrógeno de origen fósil con hidrógeno verde requeriría 820 GW de nueva capacidad de generación eólica, un 26% más de la capacidad instalada actual. Por esta razón, Siemens Energy se ha asociado recientemente con su filial Siemens Gamesa Renewable Energy, fabricante líder de turbinas eólicas, para invertir 120 millones de euros en cinco años para desarrollar una solución totalmente integrada de generación de hidrógeno verde a partir de energía eólica, que implica la división del agua de mar desalinizada directamente en el sitio (S&P Global, 2021).

Otro ejemplo de empresa privada que está llevando a cabo grandes inversiones en el hidrógeno es Repsol. En diciembre de 2023, Repsol formalizó un acuerdo con la Comisión Europea para recibir financiación del Fondo de Innovación, destinado al desarrollo de tecnologías bajas en carbono. Con ello Repsol, junto con Enagás Renovable, Iqoxe y Messer, pretenden liderar el proyecto del mayor electrolizador de España, con una capacidad de 150 MW en Tarragona. Repsol y las empresas asociadas liderarán el consorcio T-HYNET para desplegar un electrolizador alcalino a escala europea en el Complejo de Repsol Petróleo, produciendo 2.7 toneladas de hidrógeno renovable por hora para los consumidores locales (Repsol, n.d.).

VII. BENEFICIOS QUE PUEDE TRAER EL HIDRÓGENO RENOVABLE

1. Impacto medioambiental

El hidrógeno renovable ofrece numerosos beneficios medioambientales que pueden contribuir significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Como se ha ido mencionando a lo largo del trabajo, la producción de hidrógeno verde mediante la electrólisis del agua utilizando fuentes de energía renovable como la solar y la eólica no emite dióxido de carbono, lo que lo convierte en una alternativa limpia a los combustibles fósiles tradicionales. Esto es particularmente relevante en sectores difíciles de descarbonizar, como la industria pesada y el transporte de larga distancia, donde el hidrógeno puede reemplazar al carbón y al gas natural, reduciendo considerablemente las emisiones de CO₂ y otros contaminantes atmosféricos.

Además de la reducción directa de emisiones, el hidrógeno renovable puede contribuir a la mejora de la calidad del aire. Al utilizarse en pilas de combustible en lugar de motores de combustión interna, el hidrógeno produce solo vapor de agua como subproducto, eliminando emisiones nocivas de óxidos de nitrógeno y partículas finas que son comunes en los vehículos tradicionales. Esto puede resultar en una mejora

significativa de la salud pública, especialmente en áreas urbanas con alta densidad de tráfico. Adicionalmente, la integración del hidrógeno en la generación de electricidad y calefacción doméstica puede disminuir la dependencia de combustibles fósiles, promoviendo un sistema energético más sostenible y resiliente (Hydrogen Council, 2023).

2. Beneficios financieros

El hidrógeno verde tiene el potencial de generar beneficios financieros significativos. La inversión en infraestructuras y tecnologías asociadas al hidrógeno verde puede estimular la economía mediante el desarrollo de industrias innovadoras. Un estudio de Deloitte proyecta que el mercado global del hidrógeno verde podría alcanzar los 1,4 billones de dólares anuales para 2050, con un crecimiento sostenido desde los 642 mil millones de dólares anuales en 2030. Este mercado en expansión no solo fomentará el desarrollo tecnológico y la infraestructura necesaria para la producción y el uso del hidrógeno verde, sino que también atraerá inversiones significativas del sector privado, promoviendo un crecimiento económico sostenido y resiliente (Deloitte, 2023).

Además, el hidrógeno verde puede ofrecer beneficios financieros mediante la reducción de costes asociados con las emisiones de carbono. A medida que los gobiernos implementan políticas más estrictas y establecen precios sobre el carbono, las industrias que adoptan tecnologías de hidrógeno verde pueden beneficiarse de menores costes operativos a largo plazo. Las políticas de apoyo, como los subsidios y los créditos fiscales, están diseñadas para facilitar esta transición, haciendo del hidrógeno verde una inversión financieramente atractiva y sostenible.

3. Beneficios macroeconómicos

El hidrógeno verde tiene el potencial de impulsar significativamente la economía de España, generando empleo y atrayendo inversiones. La implementación de proyectos

de hidrógeno verde puede crear miles de empleos directos e indirectos en diversas regiones. Además, el desarrollo de la infraestructura necesaria para la producción y transporte de hidrógeno verde atraerá inversiones significativas del sector privado, fortaleciendo la economía regional y nacional.

La adopción masiva del hidrógeno verde también puede mejorar la balanza comercial de España al reducir la dependencia de importaciones de combustibles fósiles y posicionar al país como un exportador neto de energía renovable. España, con sus abundantes recursos de energía solar y eólica, está bien posicionada para liderar la producción de hidrógeno verde en Europa. La capacidad de producir hidrógeno a bajo coste puede hacer que España se convierta en un centro de exportación de hidrógeno hacia otros países europeos, lo que incrementará los ingresos nacionales y contribuirá al crecimiento económico. La integración del hidrógeno verde en la economía también promoverá la sostenibilidad, ayudando a España a cumplir con sus objetivos climáticos y a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Euronews, 2023), (World Economic Forum, 2023).

VIII. CONCLUSIÓN

El hidrógeno verde tiene un gran potencial para ser una solución clave en la transición hacia una economía descarbonizada. Sin embargo, su viabilidad como activo de inversión depende de varios factores, incluyendo el desarrollo de infraestructura adecuada, la reducción de costes a través de innovaciones tecnológicas y un fuerte apoyo gubernamental. Actualmente, el hidrógeno verde presenta mayores costes en comparación con otras fuentes de energía, lo que limita su competitividad en el corto plazo. No obstante, con inversiones continuas en I+D y la expansión de la infraestructura de producción y distribución, se espera que estos costes disminuyan, mejorando su atractivo para los inversores y su capacidad de penetración en el mercado energético global.

Para que el hidrógeno verde se consolide como un activo de inversión viable, es esencial que los gobiernos implementen políticas de apoyo robustas, como subsidios, incentivos fiscales y la creación de mercados regulados que faciliten la compraventa de hidrógeno. La creación de un mercado de compraventa de hidrógeno también ayudará a su crecimiento, proporcionando un marco estructurado que establezca los precios y promueva la transparencia en las transacciones. Además, la colaboración internacional será crucial para compartir tecnologías y mejores prácticas, así como para establecer estándares globales que promuevan la adopción del hidrógeno verde. Si se gestionan adecuadamente estos aspectos, el hidrógeno verde no solo contribuirá significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también impulsará el crecimiento económico y la independencia energética, posicionando a España y otros países en la vanguardia de la producción de energías renovables.

IX. ANEXOS Y BIBLIOGRAFÍA

Declaración del uso de ChatGPT:

Por la presente, yo, Rodrigo Portillo Márquez, estudiante de ADE + Business Analytics de la Universidad Pontificia Comillas al presentar mi Trabajo Fin de Grado titulado "El hidrógeno renovable y la crisis energética", declaro que he utilizado la herramienta de Inteligencia Artificial Generativa ChatGPT u otras similares de IAG de código sólo en el contexto de las actividades descritas a continuación:

1. **Brainstorming de ideas de investigación:** Utilizado para idear y esbozar posibles áreas de investigación.
2. **Referencias:** Usado conjuntamente con otras herramientas, como Science, para identificar referencias preliminares que luego he contrastado y validado.
3. **Corrector de estilo literario y de lenguaje:** Para mejorar la calidad lingüística y estilística del texto.
4. **Sintetizador y divulgador de libros complicados:** Para resumir y comprender literatura compleja.
5. **Revisor:** Para recibir sugerencias sobre cómo mejorar y perfeccionar el trabajo con diferentes niveles de exigencia.
6. **Traductor:** Para traducir textos de un lenguaje a otro.

Afirmo que toda la información y contenido presentados en este trabajo son producto de mi investigación y esfuerzo individual, excepto donde se ha indicado lo contrario y se han dado los créditos correspondientes (he incluido las referencias adecuadas en el TFG y he explicitado para qué se ha usado ChatGPT u otras herramientas similares). Soy consciente de las implicaciones académicas y éticas de presentar un trabajo no original y acepto las consecuencias de cualquier violación a esta declaración.

Fecha: 21/06/2024

Firma:



Bibliografía:

Alstom. (2022). Estreno mundial: 14 Coradia iLint iniciarán el servicio de pasajeros en Baja Sajonia, Alemania. Retrieved from <https://www.alstom.com/es/press-releases-news/2022/8/estreno-mundial-14-coradia-ilint-iniciaran-el-servicio-de-pasajeros-en>

Arena, S., Sgarbossa, F., Tang, O., Peron, M., Renewable hydrogen supply chains: A planning matrix and an agenda for future research, International Journal of Production Economics, Volume 255, 2023, 108674

Belfer Center for Science and International Affairs. (2023). Sustainable Mobility: Renewable Hydrogen in the Transport Sector. <https://www.belfercenter.org/publication/sustainable-mobility-renewable-hydrogen-transport-sector>

Bhandari, R., Trudewind, C. A., & Zapp, P. (2014). Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261300509X>

Bowker, M. (2019) Methanol Synthesis from CO₂ Hydrogenation. ChemCatChem, 11(16), 3984-3990. <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cctc.201900401>

Centro Nacional del Hidrógeno (CNH₂). (n.d.). **El hidrógeno**. Retrieved from <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). (2022). El hidrógeno verde, un acumulador energético para catapultar las renovables. Recuperado de <https://www.csic.es/es/actualidad-del-csic/el-hidrogeno-verde-un-acumulador-energetico-para-catapultar-las-renovables>.

Cossent, R., Figuerola-Ferretti, I., Gerres, T., Sanz, F., Segarra, I., Serna, S. (2023). Informe Anual de la Cátedra de Estudios sobre el Hidrógeno de la Universidad Pontificia Comillas. Recuperado de <https://files.griddo.comillas.edu/informe-hidrogeno-anual-2022-2023.pdf>

Deloitte. (2023). Green Hydrogen: Energizing the path to net zero. Recuperado de <https://www.deloitte.com/global/en/issues/climate/green-hydrogen.html>

Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review on clean hydrogen production options. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 11094-11111.

Eberle, U., Felderhoff, M., & Schüth, F. (2009). "Chemical and Physical Solutions for Hydrogen Storage." *Angewandte Chemie International Edition*, 48(36), 6608-6630.

European Commission. (2024). Hydrogen for heavy duty transportation: working in synergy with the partnerships. https://www.clean-hydrogen.europa.eu/media/news/hydrogen-heavy-duty-transportation-working-synergy-partnerships-2024-04-24_en

European Commission. (2023). Key actions of the EU Hydrogen Strategy. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en

European Hydrogen Observatory. Hydrogen Production <https://observatory.cleanhydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/production-trade-andcost/hydrogen-production>

Euronews. (2023, March 2). Spain is ramping up green hydrogen production - but can its renewable energy sector keep up? Retrieved from <https://www.euronews.com/green/2023/03/02/spain-is-ramping-up-green-hydrogen-production-but-can-its-renewable-energy-sector-keep-up>

GMI Insights. (2023). Green Hydrogen Market Size, Forecast Report, 2024-2032. <https://www.gminsights.com/es/industry-analysis/green-hydrogen-market>

Gondal, Irfan. (2016). Hydrogen transportation by pipelines. 10.1016/B978-1-78242-362-1.00012-2

González Enríquez, D. (2023). ¿Qué es y cómo se genera el hidrógeno gris?. INESEM Revista Digital. Recuperado de <https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/hidrogeno-gris/>.

Green Hydrogen Organisation. (2023). Spain. Retrieved from <https://gh2.org/countries/spain>

Grube, Thomas & Wulf, Christina & Reuß, Markus & Zapp, Petra & Robinius, Martin & Hake, Jürgen-Friedrich & Stolten, Detlef. (2018). Life Cycle Assessment of hydrogen transport and distribution options. Journal of Cleaner Production. 199. 10.1016/j.jclepro.2018.07.180.

H2ME. (n.d.). About H2ME. Retrieved from <https://h2me.eu/about/>

Hydrogen Council. (2023). Hydrogen Insights 2023. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/05/Hydrogen-Insights-2023.pdf>

Hydrogen Council. (2021). Financial investment needed for hydrogen. <https://hydrogencouncil.com/en/study-financial-investment-needed-for-hydrogen/>

Hydrogen Science Coalition. (2023). ¿Qué es el hidrógeno azul? ¿Debería sustituir al gas natural?. Recuperado de <https://h2sciencecoalition.com/es/blog/que-es-el-hidrogeno-azul-deberia-sustituir-al-gas-natural/>.

International Energy Agency (IEA). (2029). The Future of Hydrogen https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf

Iberdrola. (n.d.). Hidrógeno verde: Contribuyendo a un futuro sostenible. Retrieved from <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde>

McKinsey & Company. (2023). Unlocking hydrogen's power for long-haul freight transport. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/global-infrastructure-initiative/voices/unlocking-hydrogens-power-for-long-haul-freight-transport>

McKinsey & Company. (2023). Global Energy Perspective 2023. <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023>

MDPI. (2024). Current Status and Economic Analysis of Green Hydrogen Energy Industry Chain.

Melaina, M. W., Antonia, O., & Penev, M. (2013). Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: A review of key issues. *Journal of Hydrogen Energy*, 38(16), 7157-7167. <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51995.pdf>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2020). Hoja de Ruta del Hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es>

Pérez, A (2022, November 8). Los fabricantes de electrolizadores HyStar y Enapter aterrizan en España. *El Economista*. <https://www.eleconomista.es/energia/noticias/12025173/11/22/Los-fabricantes-de-electrolizadores-HyStar-y-Enapter-aterrizan-en-Espana-.html>

PwC. (2023). The green hydrogen economy. <https://www.pwc.com/gx/en/industries/energy-utilities-resources/future-energy/green-hydrogen-cost.html>

Rankia. (2024, March 4). Qué es y cómo invertir en hidrógeno verde: Acciones, ETFs y fondos. Rankia. Retrieved from <https://www.rankia.com/blog/bolsa-desde-cero/4919986-que-como-invertir-hidrogeno-verde-acciones-etfs-fondos>

Repsol. (n.d.). T-HYNET: El mayor electrolizador de España. Retrieved from <https://www.repsol.com/es/tecnologia-digitalizacion/technology-lab/reduccion-emisiones/hidrogeno-renovable/t-hynet/index.cshtml>

Repsol. (2023). Electrolizador: qué es, tipos y usos comunes. Recuperado de <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/electrolizador/index.cshtml>.

Saba, S. M., Müller, M., Robinius, M., & Stolten, D. (2018). The investment costs of electrolysis – A comparison of cost studies from the past 30 years. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(3), 1209-1223.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319917344956>

S&P Global. (2021, April 22). The hydrogen economy: Green H2 offers energy and process technology majors a long-term growth opportunity. Retrieved from

<https://www.spglobal.com/ratings/en/research/articles/210422-the-hydrogen-economy-green-h2-offers-energy-and-process-technology-majors-a-long-term-growth-opportunity-11902044>

TopGear. (2023). Hyundai Nexó y Toyota Mirai, los dos únicos coches de hidrógeno que se venderán en España en 2023. Retrieved from

<https://www.topgear.es/noticias/coche-electrico/hyundai-nexo-toyota-mirai-dos-unicos-coches-hidrogeno-venderan-espana-2023-1162426>

U.S. Department of Energy. (2023). U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap. https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/us-national-clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf?sfvrsn=c425b44f_5

Vector Renewables. (2022). El mercado renovable japonés de un vistazo. Recuperado de <https://www.vectorenrenewables.com/es/blog/el-mercado-renovable-japones>.

Viessmann. (n.d.). Calefacción con hidrógeno: Tecnología y sistemas. Retrieved from <https://www.viessmann.es/es/consejos/tecnologia-y-sistemas/calefaccion-con-hidrogeno.html>

Wang, J., Zhang, Y., & Wang, T. (2020). Review of hydrogen embrittlement in pipelines. *Journal of Materials Research*, 32(12), 2345-2356.

https://www.researchgate.net/publication/340851994_Review_of_Hydrogen_Embrittlement_in_Metals_Hydrogen_Diffusion_Hydrogen_Characterization_Hydrogen_Embrittlement_Mechanism_and_Prevention

World Economic Forum. (2023, January). How Spain and Portugal can become green hydrogen powerhouses. Retrieved from <https://www.weforum.org/agenda/2023/01/spain-portugal-green-hydrogen-powerhouse-davos23/>

Wulf, C., & Kaltschmitt, M. (2018). Life cycle assessment of hydrogen production. *Renewable Energy Journal*, 45, 1234-1250.