



Universidad Pontificia Comillas (ICADE)

Hidrógeno Verde: Nuevo Commodity en un Mundo de Transición Energética

Autor: Celso García-Morales García

Tutor: Isabel Catalina Figuerola Ferreti Garrigues

MADRID | Junio 2024

Índice

1. Introducción	1
1.1 Motivación.....	5
1.2 Objetivos	5
1.3 Metodología	5
2. Marco Teórico	6
2.1 Energía renovable y transición energética	6
2.2 Tipos de hidrógeno	9
2.3 Formas de producción del hidrógeno verde.....	10
2.4 Hidrógeno verde como nuevo commodity.....	11
2.5 Creación de un nuevo mercado	13
2.6 Precios del hidrógeno verde	14
2.7 Relevancia económica, política y medioambiental del hidrógeno verde	15
3. Impacto ambiental y desafíos	19
3.1 Sostenibilidad y consideraciones éticas en la producción de hidrógeno verde.....	20
4. Indexación de índices	23
4.1 Indexación del gas natural al índice brent	24
4.2 Indexación del hidrógeno verde al gas natural	26
5. Análisis de regresión para proyección de precios de hidrógeno verde	29
6. Conclusiones	30
7. Declaración del uso de herramientas de inteligencia artificial	32
8. Bibliografía	33

1. Introducción

El hidrógeno verde, tiene su origen en recursos que son considerados infinitos, aunque no lo son absolutamente, tal como sí sucede con la electricidad que proviene de fuentes de energía como la eólica y/o solar, sin embargo, se ha convertido en la posible respuesta ante la situación que se presenta en el sector energético. El hidrógeno verde proporciona alternativas de solución dadas las expectativas del consumidor, quien persigue una fuente de energía, que no contamine en cualquiera de sus formas, que sea limpia, descarbonizada, que no se acabe, que esté libre de residuos, que se produzca con facilidad en aquellas zonas donde sólo se cuenta con luz solar y/o viento y agua, que tenga bajo costo, que no tenga dependencia de los ciclos de la materia prima y que su producción genere la menor o nula cantidad de conflictos. No obstante, el precio que implica la tecnología de las plantas que producen hidrógeno verde es elevado, por lo que en ocasiones es necesario el financiamiento externo, lo que trae como consecuencia ineludiblemente, que el valor final del producto sea muy alto al comparar costes con otros combustibles.

Bajo esta perspectiva y ante la posibilidad de producir hidrógeno verde, el “Plan Nacional integrado de Energía y Clima” (PNIEC), se ha trazado como propósito reducir las emisiones de “Gases de Efecto Invernadero” (GEI) en aproximadamente 20% para el año 2030, transformando, de este modo, el “*mix energético*” y centrando dicha transición en las emisiones de tipo fotovoltaica y eólica. Es evidente que la instalación de potencia renovable que se requiere, debe necesariamente, hacer uso de tecnología de respaldo, dada la intermitencia energética; por tanto deben emplearse entonces, interconexiones y el agua. Con respecto al agua, el PNIEC fomenta las centrales hidroeléctricas reversibles con el propósito de gestionar la producción renovable y apoyar la reglamentación de las cuencas en condiciones extremas; de igual manera, se ha vislumbrado la posibilidad de instalar baterías en forma escalonada mientras la transición energética sigue su rumbo.

Tal como puede notarse, las potencialidades del hidrógeno verde han sido poco valoradas, pues puede también ser herramienta para almacenar gran cantidad de energía por tiempo prolongado, aun cuando, el PNIEC sólo hace referencia al

hidrógeno como combustible que puede emplearse para el transporte o cuyo uso se encuentra en investigación.

En el país español, el PNIEC ha señalado que el Gobierno se ha comprometido a fomentar a través de la aprobación de planes, el uso exclusivo de gas renovable, biometano, hidrógeno y otros combustibles provenientes de materia prima y energía renovable. Asimismo, considera anunciar normas específicas conlleven a la inyección de estos gases a la red de gas natural, tomando en cuenta la capacidad para almacenar del “gas natural licuado” (GNL) y su capacidad de regasificación, de esta manera se convierte en un “*hub*” físico para la comunidad de gas natural y gas renovable. En tal sentido, son diversas las instituciones y entidades que se interesan y se embarcan en proyectos de hidrógeno con el fin de innovar y dar mayor valor a este sistema energético.

El hidrógeno verde se presenta entonces como nuevo “*commodity*” para la industria, prueba de ello, son los acuerdos que se han efectuado entre el Gobierno de las Islas Baleares, Enagás, Acciona y Cemex, todo con el fin de desarrollar una planta de generación de hidrógeno verde a partir de energía eléctrica renovable. Otro proyecto que se puede nombrar es I+D Renovagas, se basa en la tecnología *Power to Gas*, participan empresas como Enagas, Gas Natural Fenosa, el Centro Nacional del Hidrógeno (CNH2) y TecNALIA, estas organizaciones buscan dar máximo aprovechamiento a la energía eléctrica excedente de origen renovable para producir hidrógeno (Merodio, 2019).

Es de resaltar, que se tienen iniciativas de empresas privadas como Arcelor, en las que se proponen atrapar el dióxido de carbono (CO₂), el hidrógeno H₂, el proceso de electrólisis y la producción de biocombustibles, sin embargo, son enfáticos ante el incremento de los costes y proponen hacer sus trabajos atacando tres frentes, las “energías limpias”; carbono circular y el mantenimiento de combustibles fósiles atrapando y almacenando; sin dejar de lado, la optimización de la eficiencia energética.

Para el futuro, la consideración del hidrógeno verde como fuente de energía constituye un escenario que ha de permitir la producción de hidrógeno partiendo de agua, empleando electricidad y calor de fuentes renovables; así como también, se

podrá utilizar para satisfacer las diferentes demandas, propias de la industria y las energéticas, poniendo a prueba su rol como fuente de energía (Merodio, 2019).

1.1 Motivación

Para la realización de este estudio se ha tomado en cuenta que el hidrógeno verde puede suministrar beneficios para el desarrollo socioeconómico de un país, sin embargo, también es importante conocer cuál es el alcance para establecer un análisis de posible mercado para su comercialización; para ello, llama la curiosidad y el interés personal indagar acerca de los avances tecnológicos que se tienen y el grado en que el país español se encuentra involucrado, de esta forma, se puede conocer el modo, en que se puede dar la comercialización de hidrógeno verde y plantear las mejores condiciones y aspectos que debe ser tomados en cuenta para la sostenibilidad de un proyecto como el que se describe

1.2 Objetivos

Analizar el panorama para la creación de un mercado para el hidrógeno verde como nuevo *commodity* en un Mundo de Transición Energética y su indexación al índices como el gas natural.

Caracterizar el hidrógeno verde como nuevo *commodity*, considerando costes de producción, importancia política y económica de su producción y su impacto ambiental

1.3 Metodología

Considerando que el propósito esencial de este proyecto es el estudio del panorama para la creación de un mercado del hidrógeno verde como nuevo *commodity*, se ha considerado conveniente para ello, caracterizar este tipo de energía, conocer las diferentes formas de producción y los posibles mercados de acuerdo a la demanda energética que puede satisfacer y los beneficios que llegar a proporcionar. De igual modo, se han hecho comparaciones entre costes de producción del hidrógeno verde con otros tipos de energía, analizados los precios y sus evoluciones históricas.

2. Marco Teórico

El hidrógeno uno de los elementos de mayor abundancia en el planeta, se encuentra siendo parte de compuestos orgánicos junto al carbono y al oxígeno. En tal sentido, el hidrógeno no se corresponde con una fuente de energía primaria, más bien es considerada, portadora de energía, para ello, se emplea el término “vector energético”. Esta energía se debe producir, separando los compuestos que los constituye y aportando energía, calor o electricidad, proveniente de fuentes primarias.

Hasta el momento, industrialmente se ha producido hidrógeno partiendo de fósiles; el 96% del hidrógeno del mundo proviene del gas natural y vapor de agua, es consumido en infinidad de procesos propios de la industria química, petroquímica, metalurgia, electrónica y en vehículos espaciales. Solamente un 4% del hidrógeno es producido mediante el proceso de electrólisis del agua y el producto se destina a las aplicaciones que se llevan a cabo con gas altamente puro (Merodio, 2019). En consecuencia, el hidrógeno como tipo de energía, es bien conocido, pero su mayor realce en la actualidad se debe a la posibilidad de ser empleado como “vector energético”.

2.1 Energía renovable y transición energética

Desde el año 2020 se han incrementado los precios de toda la materia prima, particularmente las críticas, esto ha sucedido por diversas razones, el crecimiento económico posterior a la pandemia por COVID-19, el conflicto de Ucrania y sus consecuencias y el abastecimiento de materia fósil y los programas gubernamentales que se anuncian a nivel mundial y que hacen referencia a la transición energética para alcanzar la neutralidad climática. Es de resaltar, que entre los programas a los que se hace referencia se tienen el “Pacto Verde Europeo de la Comisión Europea”, cuyo fin es descarbonizar la economía en los próximos 30 años, dicho en otras palabras, busca que se consiga el equilibrio al producir gases de efecto invernadero, lo que puede lograrse a través de la electrificación a bajo coste y la movilidad, para esto es fundamental el uso de cobre (Cu) y litio (Li), razón por

la cual, la “Agencia Internacional de Energía” (AIE) ha previsto que para el año 2040 estos metales incrementen su costo considerablemente.

Bajo este panorama y en relación a la transición energética, también se han establecido objetivos en este ámbito para el año 2030 como matricular alrededor de 15 millones de coches eléctricos o, a pesar de la guerra de Ucrania, expandir las energías renovables para proteger el clima, favoreciendo la seguridad nacional y las energías de la libertad.

En conjunto, tanto la Unión Europea como el gobierno alemán han centrado el proceso de transición en la innovación ecológica, partiendo de alternativas tecnológicas; y en la innovación científica para enfrentar la crisis que se presenta con la energía y con el clima. En este sentido, vienen trabajando para la obtención de la materia prima que se requiere para la transición verde y corporativa a través del reciclaje.

Bajo esta perspectiva, Bertinat y Chemes (2022) denominan la posición descrita como “transición energética corporativa” y manifiestan que se ha convertido en un modelo caracterizado por una visión técnica, económica y hegemónica. Fundamentalmente, busca disminuir la emisión de gases de efecto invernadero y mayor seguridad energética, dando respuesta con nuevas fuentes de energía renovable y el empleo de recursos estratégicos, garantizando el crecimiento y sostenimiento verde sin ningún tipo de límites.

En consecuencia, se cree que la innovación en el ámbito ecológico asociada con la descarbonización puede generar un período extenso en el que la materia prima demandada incrementa los costes a largo plazo. Por tanto, eso significa que se está ante la presencia de una nueva etapa de acumulación a través del embargo de materia prima, suelos, viento y radiación solar. Es de resaltar, que en este contexto, el interés se encuentra en torno a los combustibles fósiles, metales preciosos, industriales y lubricantes que contribuyen con el impulso de una economía verde y electrificada de alta tecnología, de igual manera, hay gran interés sobre la materia prima crítica del hidrógeno verde (Dietz, 2023).

Hasta ahora, se ha propuesto que el hidrógeno verde tenga alta prioridad para la transición energética, para su producción se requiere de energía renovable, en

contraposición con otros tipos de hidrógeno, cuya producción es a partir de energía fósil. En el año 2020, Alemania se estableció como objetivo la producción de 14 teravatios/hora de hidrógeno verde para el 2030; pero esta demanda es difícil de satisfacer, a menos que se hagan importaciones de países ricos en sol y viento y con “alto potencial de energías renovables” (Dietz, 2023). Las conformadas “asociaciones de hidrógeno” se están dando en diferentes países como Marruecos, Sudáfrica, Namibia y Chile y próximamente en Colombia, Argentina y México.

Con el objetivo de garantizar el abastecimiento de hidrógeno verde y el acceso a ciertos privilegios el gobierno, las empresas participan activamente en el desarrollo de plantas de hidrógeno verde. Prueba de ello, *Siemens Energy* tiene en sus proyectos la construcción y dirección de una planta de 20 mw de electrólisis para la producción de hidrógeno verde para Colombia; En Chile, la empresa Porsche y *Siemens Energy* construyeron una planta industrial que produce *e-fuels* partiendo de hidrógeno verde.

Hasta ahora se percibe que el hidrógeno renovable implica altos costes, sin embargo, se puede precisar para los próximos 16 años, las energías renovables, los electrolizadores y la logística de hidrógeno pueden estar más desarrollados y, por tanto, el coste de producción podría abarataarse y ser menor. Gracias a los proyectos y actividades en desarrollo en España, se puede lograr que el hidrógeno verde sea un combustible muy competitivo frente a otros. Sin embargo, para alcanzar este objetivo, es necesario disminuir su precio, lo cual se puede lograr reduciendo el costo de la electricidad, mejorando la tecnología de los electrolizadores e incentivando la demanda de hidrógeno.

Teniendo estas consideraciones en cuenta, el hidrógeno descarbonizado tiene planes de futuro, para el 2030 se espera en primer lugar, que la demanda del hidrógeno verde se expanda, y que el consumo de esta energía se incremente dada la disminución de costes (2-3 euros/kg para el año 2030 y para el año 2050 de 2 euros/kg). En consecuencia, se afirma que el hidrógeno verde se presenta como una fuente de energía muy competitiva con respecto a otros combustibles, además que ha de ser esencial para la descarbonización de aquellos sectores que no pueden ser electrificados (García, 2022).

2.2 Tipos de hidrógeno

Aunque el hidrógeno es abundante en la Tierra, no se haya puro en la naturaleza, no se tienen yacimientos de este elemento para su extracción; por tanto, para su obtención debe separarse de las moléculas de agua y/o combustible fósil. En consecuencia, se maneja técnicamente un código de colores que permiten hacer distinción en los métodos para producir el hidrógeno.

La mayor parte de hidrógeno que se usa es gris, se obtiene partiendo de combustibles fósiles, de metano (CH_4) o la gasificación de carbón, esta producción representa el 95% del abastecimiento de hidrógeno y suministra una fuerte emisión de CO_2 al planeta, contradiciendo los objetivos sostenibles de la Unión Europea. Este tipo de hidrógeno es el producido a partir de gas natural u otros hidrocarburos ligeros como el metano (CH_4) o gases licuados de petróleo mediante procesos de reformado y , actualmente representa el 99% de hidrógeno producido en España.

El hidrógeno gris mantiene un buen rendimiento de producción (aproximadamente del 80%), pero constituye una fuente de contaminación considerable por lo que se está investigando y considerando rutas alternativas y limpias que lo sustituyan, como es el caso del hidrógeno verde y azul.

La producción de hidrógeno verde se fundamenta en la electrólisis del agua con energía de fuentes renovables, siendo su producción es limitada pero favoreciendo un escenario de posible cambio. En el caso del hidrógeno azul se obtiene partiendo de combustibles fósiles con CCS, este método se puede aplicar para producir hidrógeno gris y disminuir las emisiones de CO_2 (Cerezo, 2022). No obstante, dado que el hidrógeno azul depende de los combustibles fósiles se pueden presentar fugas de metano (CH_4), más perjudicial al ambiente que el CO_2 . En consecuencia, esta producción también genera efecto invernadero, aun ocurriendo en cantidades mínimas.

Si se considera la producción de hidrógeno azul bajo estrictos criterios de emisión de gases, se puede conseguir un considerable incremento en el volumen de hidrógeno y se puede promover el desarrollo de la infraestructura y tecnología vinculada con su producción. Aunado a esto, el hidrógeno azul ofrece flexibilidad en

el mercado; no obstante, el hidrógeno verde suministra la solución con carbono cero posicionándola como la mejor alternativa para el futuro.

El hidrógeno turquesa, con sus mínimas emisiones de carbono, se produce a través de la pirólisis del metano, un proceso que no genera CO₂ y tiene su propio mercado. Por último, se encuentra el hidrógeno rosa, el cual se obtiene utilizando electricidad generada por energía nuclear.

Tabla 1: Tipos de hidrógeno

	Proceso	Fuente de energía	Emisión directa
Hidrógeno Gris	Reformado o gasificación	Combustible fósil	CO ₂ y CH ₄ fugitivo
Hidrógeno Azul	Reformado o gasificación con CCU	Combustible fósil	CO ₂ y CH ₄ fugitivo
Hidrógeno Verde	Electrólisis	Energía renovable	Nulas
Hidrógeno turquesa	Electrólisis	Gas natural	CH ₄ fugitivo
Hidrógeno Rosa	Electrólisis	Energía nuclear	Residuos radioactivos

Fuente: Cerezo (2022)

2.3 Formas de producción del hidrógeno verde

El hidrógeno verde, se obtiene de energías renovables, la materia prima que requiere es agua y biomasa, la producción puede efectuarse mediante procesos térmicos, electroquímicos y biológicos y puede producirse a través de tres tipos de procesos (García, 2022) que describen a continuación:

- **Electrólisis:** es el que más se utiliza para la obtención de hidrógeno verde. En el proceso se logra separar la molécula del agua en sus elementos oxígeno e hidrógeno aplicando electricidad. Tiene como ventaja el uso, precisamente de la electricidad, por lo que se puede emplear cualquier fuente de energía primaria

para la obtención del producto, es común que dichas fuentes tengan origen renovable. La gran desventaja es la estabilidad de la molécula del agua, razón por la cual, se requiere gran cantidad de energía para su separación, para resolver esto se aplica mayor temperatura de trabajo, aumenta la energía total y se sustituye una buena parte de la electricidad requerida con calor

- Foto electrólisis: el proceso tiene gran similitud con la electrólisis, sin embargo, en éste, la energía que se requiere proviene de sistemas fotovoltaicos, se emplean los foto electrolizadores que no se encuentran conectados a la red eléctrica pues disponen de un sistema de generación de energía fotovoltaica. El proceso suministra electricidad e hidrógeno. Al hacer uso de energía térmica para descomponer la molécula de agua disminuye el consumo de electricidad. Para separar la molécula de agua se necesitan más de 2500°C, lo que es inviable. Sin embargo, con los ciclos termoquímicos (SI y UT-3) se consigue disminuir esa temperatura y la descomposición de la molécula. El aporte de energía térmica se hace mediante fuentes internas, por tanto, se da máximo aprovechamiento al calor residual de plantas que llegan a temperaturas elevadas en su proceso.
- Gasificación de la biomasa: se trata de un proceso termo-químico a través del cual la biomasa se transforma en gas. Cuando esta gasificación utiliza oxígeno y un tipo de biomasa específico, se logra la obtención de un gas con diferentes componentes, en líneas generales, el gas producido está compuesto por CO, H₂, CH₄, CO₂ y N₂. La mayor desventaja del proceso es la formación de alquitranes.
- Fotobiólisis: este proceso está en fase de investigación, consiste en producir hidrógeno partiendo de algas verdes y cianobacterias, organismos capaces de liberar hidrógeno al recibir luz solar

2.4 Hidrógeno verde como nuevo commodity

Lo más atractivo del hidrógeno es lo versátil de su comportamiento, Entre sus utilidades, destaca su introducción en el sistema de gas, use en vehículos con pila de combustible y se puede transformar en combustibles sintéticos o en electricidad para el sistema. Permite que los sectores consumidores de energía se acoplen con el sector eléctrico, transformando la electricidad renovable en gas y

descarbonizando el sector industrial y de transporte (Van de Graaf, 2020). Adicionalmente, se tiene sinergia entre el hidrógeno y una red eléctrica basada en energías renovables. Sin dejar de mencionar que proporciona almacenamiento estacional para la electricidad renovable.

Son muchas las bondades del hidrógeno que lo convierten en el nuevo *commodity*, razón por la cual, se le brinda un amplio panorama en la sociedad y los diferentes sectores económicos defienden su uso. No obstante, es necesario que el hidrógeno participe en el *mix* energético con cero emisiones por lo que debe producirse simplificando el proceso, reduciendo costes dentro de un proceso eficiente a través del empleo de electricidad limpia (Van de Graaf, 2020).

Bajo esta perspectiva, se avizoran las siguientes dimensiones geopolíticas del hidrógeno:

- El hidrógeno viene impulsando el liderazgo tecnológico, por lo que cada país busca crear la tecnología.
- Los países están planteando políticas industriales verdes respaldadas con políticas comerciales.
- El hidrógeno ha generado polémica acerca de economías emergentes y en desarrollo y la forma de prevenir la deslocalización de sectores.
- El hidrógeno plantea, de igual forma, amenazas y oportunidades para aquellos países que producen combustible fósil, pues pueden convertirse en productores de hidrógeno o amoníaco azul.
- El hidrógeno puede propiciar interdependencia entre naciones y alterar alianzas y nexos políticos apareciendo riesgos para el suministro.
- Las infraestructuras que se requieren para producir hidrógeno requieren gran capital, pero se espera que la competencia sea entre hidrógeno azul y verde.
- La competencia geopolítica está presente y los países y empresas discuten acerca de estándares técnicos, certificación y garantías de origen.

2.5 Creación de un nuevo mercado

La ubicación geográfica y el clima del país español adjudican elevado potencial como líder en la producción y distribución del hidrógeno para el continente europeo. Vale decir, que esta producción, además de contribuir con la descarbonización, favorece en gran medida la economía española (Morante, Andreu, García, Guilera, Tarancón, y Torrell, 2020) proporciona puestos de trabajo e impulsa el desarrollo económico. Este cambio energético ofrece innumerables oportunidades, entre ellas:

- Se eliminan las emisiones en industria con dificultad para electrificar y descarbonizar favoreciendo la “economía climáticamente neutra” para el año 2050.
 - Desarrollo de los procesos y tecnología implícita para producir y distribuir hidrógeno y posicionamiento como precursores.
- Fortalecimiento de las fuentes de energía renovable, dado que para la obtención de hidrógeno 100% libre de emisiones, se requiere de energías renovables, por tanto, para conseguir que el hidrógeno producido sea competitivo las fuentes de energía que se emplean deben ser altamente eficientes, en consecuencia, se debe tomar en cuenta la inversión y el tipo de energía renovable.
 - Reducción de la dependencia energética, se prevé que España produzca el hidrógeno necesario para satisfacer la demanda nacional y europea, consiguiendo disminuir exponencialmente la dependencia al momento de importar energía fósil.
- Posicionar a España como potencia europea de producción de energía renovable, aprovechando las condiciones meteorológicas y geolocalización para la obtención de energías renovables, entre ellas, la eólica y la fotovoltaica
- Descarbonización de territorios insulares, dado que su acceso a la energía sostenible es limitado.
 - Aumento de la proporción de energía renovable en la red eléctrica.

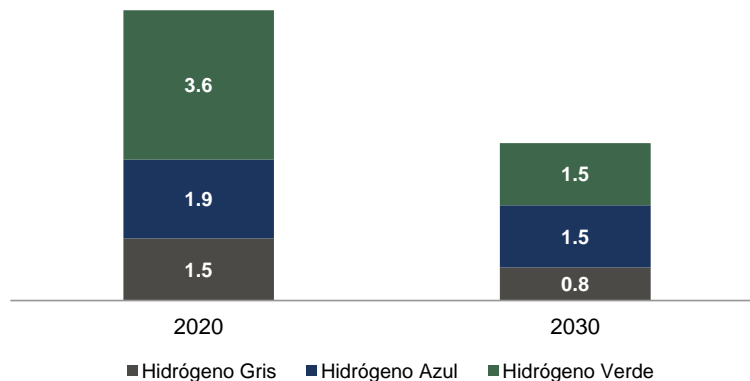
Las mencionadas y probablemente muchas más posibilidades se van presentando al país español con la producción de hidrógeno renovable, esta van surgiendo

progresivamente con el avance tecnológico. Por esta razón, España debe centrarse en esta producción, su fomento y desarrollo.

2.6 Precios del hidrógeno verde

Ante la panacea que se presenta con la producción de hidrógeno verde para España, se tiene también entre los obstáculos la superación del coste para que este sea competitivo. Hoy día, su producción oscila entre 3,5 y 7 euros el kilogramo. Para ilustrar, un kilogramo de hidrógeno permite aproximadamente 100 kilómetros de movimiento a un coche, lo que equivale entre 7 y 10 litros de gasolina, a pesar de esto, se espera que estos disminuyan, como se ha mencionado para el año 2030. En relación al coste de producción, se debe trabajar hasta alcanzar un valor alrededor de 2 euros/kg, lo equivale a 60 €/MWh que lo haría competitivo (Iberdrola.es, 2022). En la figura 3, se muestra una comparativa de los precios de hidrógeno

Gráfico 1: Coste de producción de hidrógeno hoy día y proyección a 10 años



Fuente Iberdrola.es (2022)

De los procesos de producción mencionados, la electrólisis es el camino más costoso, sin embargo, tiene posibilidad de mayor proyección para los próximos años. Adicionalmente, se debe señalar que el hidrógeno verde brinda ciertas ventajas que ofrece el hidrógeno azul, tales como la independencia energética, no

se presenta inseguridad para almacenar el CO₂ y los costes son menores. En función a la tecnología empleada para la producción se tiene una media de 4 euros/kg cuando se usa un electrolizador alcalino y este incrementa a 5 euros/kg si se utiliza electrolizador PEM.

Es de hacer notar, que para la siguiente década las energías renovables son fundamentales para disminuir el precio del hidrógeno verde, particularmente la energía solar y la eólica. De igual manera, el desarrollo en su totalidad de la electrólisis debe contribuir a la reducción del precio hasta el valor esperado 2,00 euros el kilogramo.

Cuando se produce hidrógeno debe estimarse el costo por lo que deben considerarse 3 variables. En primer lugar el coste del hidrógeno se hace midiendo el *Levelised Cost of Hydrogen* (LCOH), con esto se recopila el coste total del momento para la construcción y operación de la planta que genera de energía. Se toman en cuenta las variables gasto de inversión al año, costes para operar, el mantenimiento y el coste del combustible, de esta forma, se puede comparar con diferentes fuentes de energía. Para la producción de hidrógeno verde el mayor coste es el de electricidad, este debe ser menor a 60 euros/MWh para que pueda competir en precio y se requieren 1.500 horas de funcionamiento. Estos números no incluyen logística, es decir, procesos de compresión, almacenamiento, transporte y/o impuestos (García, 2022).

2.7 Relevancia económica, política y medioambiental del hidrógeno verde

La energía es esencial como recurso en todo proceso productivo y, por ende, para el desarrollo económico e industrial de un país. Por este motivo, el sector energético tiene un nexo positivo entre el desarrollo de la economía nacional y el consumo. Cuando el sector se comporta de modo eficiente y ofrece precios eléctricos razonables y que suministren energía de modo seguro, se consigue potenciar el desarrollo económico.

Por otro lado, al considerar los objetivos establecidos por los gobiernos en el mundo vinculados con el cambio climático y que batallan por cuidar la temperatura mundial,

es imprescindible que se trabaje por el desarrollo de energías renovables, necesarias para la transición, de esta forma, se facilita la coexistencia y equilibrio entre la producción eléctrica y la protección del ambiente. Es de resaltar, que a través de la utilización de energía renovable se busca menor dependencia del combustible fósil, obteniendo en paralelo beneficios a nivel económico, social y medioambiental.

En consecuencia, la energía renovable se ha convertido en el “combustible del futuro”, primordial para el sector energético en el mundo, dado que ofrece la posibilidad de descarbonizar la energía que ya se viene empleando hasta ahora. Al usar fuentes energéticas de esta clase supone un estimado de más del 90% en reducción de la emisión de CO₂. Toda esta ventaja conlleva a que la energía renovable y la eficiencia que pueda ofrecer dicha energía sea considerada la base y eje vertebral de la transición energética.

Bajo esta perspectiva y, con miras al impulso en la producción y consumo de energías renovables y eficiencia energética, son diversos los proyectos e inversiones que se hacen en esta área, muchos son orientados a la planificación y a la posibilidad de ampliar el sistema eléctrico. Se ha estimado que para la consecución de los objetivos propuestos por los gobiernos, la inversión acumulada hasta el 2050 debe ser de 120 billones de USD, esto implica invertir el 2% del PIB en tecnología, energía renovable y eficiencia energética. De esta forma, se consigue estimular el desarrollo económico, el crecimiento directo e indirecto en otros sectores y fortaleciendo las fuentes de empleo (IRENA, 2018).

La crisis del año 2008 permitió que en el mundo el sector energético se desarrollara exponencialmente, la inversión en energía renovable fue un 35% más que la de las no renovables, por tanto el año se convirtió en un punto de inflexión para la economía verde, fue la primera vez en que la inversión estaba favoreciendo a las energías limpias (Oshima, 2019).

En consecuencia, desde el panorama económico, la transición energética rumbo a una economía verde proporciona grandes beneficios, se consigue que mejore el PIB, las fuentes de empleo, el bienestar a nivel mundial, sin dejar de lado, el vestigio socioeconómico del *mix* energético. La influencia positiva que ejercen las energías

renovables sobre el sector económico está fundamentado, esencialmente, en que la energía es un “factor de coste” en la producción, por ende, la disminución de dichos costes infiere mayor competitividad al proceso, lo que incrementa el beneficio final. De igual modo, el coste para producir la energía va reduciendo al aparecer otras energías renovables, de esta manera, la energía solar y la eólica son las de mayor competitividad en el mundo (Bloomberg, 2020).

Se ha establecido que el hidrógeno como fuente energética sea fundamental para el sector económico a mediano plazo, particularmente para almacenar energías renovables o para el transporte, siendo esencial en este sector. La economía de hidrógeno ha de favorecer este escenario y contribuir con la eliminación de la dependencia de combustibles fósiles, marchando de esta forma, al unísono con los objetivos energéticos europeos, lo que viene a reflejar mayor calidad de vida para la sociedad.

Para alcanzar los múltiples beneficios socioeconómicos que proporciona la producción de hidrógeno verde los países requieren que se les dé un impulso que les lleve a la consolidación de infraestructuras y tecnología para la obtención de energía renovable. No obstante, siempre se tiene la existencia de posibles riesgos para las comunidades cercanas, ante esto y a pesar de la necesidad de desarrollar infraestructuras, dado el mercado emergente, es imperante que la configuración se logre considerando los intereses y derechos de todos los actores involucrados en beneficio del colectivo en general.

Ante la posibilidad de riesgos, se requiere que haya intervención política que dirija el capital invertido y la comercialización del producto, hidrógeno verde y sus derivados enmarcado en un horizonte sostenible. De esta forma, se consigue beneficiar el desarrollo en el tiempo, velar por los intereses de los implicados y establecer normas que deben ser respetadas por todos. En consecuencia, se debe contribuir con el proceso de transición y la seguridad energética dentro del marco de la equidad, la justicia y el cuidado del cambio climático

En este sentido, se estima que la economía del hidrógeno verde puede producir ingresos mayores a 2,5 billones de dólares al año, a partir de la comercialización de hidrógeno, vehículos, maquinarias, o equipos industriales, entre otros. Adicionalmente, este desarrollo económico sostenible ha de promover a mediano plazo, aumento en los puestos de trabajo, se estima que pueden llegar a ser más de 30 millones de cargos en todo el mundo para el año 2025.

En el país español el hidrógeno verde suministra ventajas ambientales, sociales empresariales y económicas, dado que el gobierno se ha propuesto para el año 2050 (MITERD, 2020), hacer uso del hidrógeno como “vector energético” con el fin de disminuir la emisión de CO₂ a la atmósfera y de efecto invernadero, en consonancia con los objetivos de la agenda política de Europa y el mundo. De igual manera, se busca que España lleve la batuta y liderazgo en investigación y desarrollo tecnológico para la producción y uso del hidrógeno verde, haciendo las cadenas de valor local y nacional.

Aunado a lo descrito, España también se ha propuesto a través del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto demográfico, el impulso de la energía renovable a través del hidrógeno verde aprovechando su capacidad para almacenar energía a gran escala. De este modo y a través del sistema eléctrico renovable se puede reducir la dependencia energética de la nación, es decir, se puede brindar mayor seguridad energética y optimización del sistema eléctrico.

Para culminar, el país español espera ser un fuerte exportador de energía renovable, explotando sus recursos naturales, excelente clima y extensión adecuada de terreno para instalar parques fotovoltaicos y eólicos. En consecuencia, se pretende dejar de ser importador para ser exportador de energía favoreciendo su economía, impactando positivamente en su PIB, se promueven los puestos de trabajo dada la cadena de valor y se fortalece la investigación y el desarrollo energético (Sánchez, 2021).

Todo lo anterior conlleva a señalar que el mercado del hidrógeno antes del año 2050, será primordial para la economía, para la descarbonización del ambiente, para la promoción de la energía sostenible y propiciando en la sociedad conciencia medioambiental.

3. Impacto ambiental y desafíos

Es fundamental crear y promover un entorno en el que se vea favorecido el proceso de oferta y demanda de energía renovable; un marco legal que priorice los proyectos para producir hidrógeno renovable, su aplicación, movilidad y otras acciones pertinentes. Para tal efecto, se requiere crear “*clústers* de hidrógeno”, en los que se centralice la ubicación, producción, transformación y consumo, dando máximo aprovechamiento a la economía de escala, al desarrollo de proyectos piloto, al sistema energético aislado y al transporte (Giménez, 2017).

Los procesos industrializados en los que se emplea como materia prima el hidrógeno como refinamiento de petróleo y producción de fertilizantes y agroquímicos ofrecen un excelente impulso para la producción de hidrógeno renovable en pocos años; de igual manera, se puede utilizar algunos de los ODS y se integran a estos, usos industriales del hidrógeno renovable y utilizarse como propulsor que puede dar garantía de la competitividad a nivel industrial bajo condiciones de equidad en el ámbito comunitario. En consecuencia, los proyectos que se plantean para la descarbonización de la industria intensiva de hidrógeno permiten mayor dinámica y madurez en cuanto a tecnología y promueve la posibilidad de darles otros usos de utilidad.

Es fundamental que se fomente usos finales diferentes para el hidrógeno para localidades donde la electrificación no resulta ser una solución eficiente o poco viable técnicamente a mediano plazo, estas aplicaciones pueden ser transporte público, servicio urbano o transporte intermodal (Roca, 2020). El apoyo a este tipo de proyectos facilita el desarrollo de la competitividad con otros países; de igual modo, su potencial y versatilidad como “vector energético” debe ser evaluado, reforzado y priorizado para el almacenamiento de energía y para la descarbonización industrial y en los hogares cuando la electrificación no es del todo eficiente o viable.

A largo plazo, para el año 2050 se ha planteado que el hidrógeno almacene la energía que proviene de una red eléctrica totalmente renovable. Se persigue la

neutralidad climática y sostenibilidad de los destinos turísticos que tienen las islas y sus sistemas de energía aislados mediante soluciones basadas en hidrógeno.

Se debe ser cuidadoso para el establecimiento de un mercado de hidrógeno en Europa, para que no se distorsione la competencia en poco tiempo, puesto que puede suceder que el hidrógeno no renovable sustituya al hidrógeno renovable si no se estudia y analiza debidamente el impacto que esto puede tener en el ambiente. Para ello, se considera necesario que el hidrógeno renovable disponga de normas comunes en los países de la UE, que se establezcan reglas para los objetivos, para el etiquetado, que se muestren las garantías de origen, de esta forma, se contribuye con su expansión y se garantiza la igualdad de condiciones.

3.1 Sostenibilidad y consideraciones éticas en la producción de hidrógeno verde

Con el objeto de disminuir riesgos y garantizar la producción y el comercio del mercado emergente de hidrógeno, se deben tomar en cuenta recomendaciones para su sostenibilidad en el ámbito ambiental y social y que además promuevan el uso y producción de hidrógeno verde ante otro de cualquier color. El hidrógeno que se produzca para exportar debe incorporarse a la estrategia del país y ajustarse al respeto por los objetivos del Acuerdo de París, reconocer los objetivos de desarrollo sostenible, velar por la disminución de la pobreza energética y fomentar la economía fundamentada en energías renovables. Bajo esta premisa, las estrategias deben considerar la protección del ecosistema, generar beneficios económicos, promover la inclusión y cohesión social, respetar los derechos humanos, garantizar la aceptación y participación de los interesados, promover la transparencia. Por tanto, si se busca que la comercialización del hidrógeno sea de utilidad para todos es necesario que se integre al proceso de transición energética.

Con el fin de reducir costes y ampliar el mercado, se debe considerar un mercado competitivo, los proveedores compiten en función de los costes de producción, beneficiando a quienes producen a menos coste y siguen los criterios para el cuidado del ambiente y la sostenibilidad (Görlach, Jakob y De la Vega, 2022).

En consecuencia, las políticas y normativa requerida para esta comercialización sostenible de hidrógeno deben establecerse de manera unilateral y/o multilateral teniendo presente que se garantice la sostenibilidad. Es conveniente que estas políticas se configuren para que los países que producen se vean beneficiados de la cadena de valor del hidrógeno verde. La energía verde debe ser empleada en aquellos sectores que llegan a electrificarse, dado que bajo este escenario la energía renovable producida es más eficaz, tiene menor coste y genera menos emisión que el hidrógeno. Por ende, las estrategias para la exportación que se consideren deben mantener el equilibrio entre la obtención del hidrógeno y la energía renovable que se produce de uso local y crear ingresos partiendo de las exportaciones.

Es evidente que el valor comercial que tiene el hidrógeno verde es su sostenibilidad y su carácter, es decir que se produzca libre de carbono; por tanto, esto debe controlarse y verificarse transparente y confiablemente, siguiendo criterios debidamente establecidos y consensuados a nivel internacional. En la medida en que las naciones y su sector industrial utilizan hidrógeno verde cumplen con el fin de disminuir el carbono, también se incide favorablemente en las políticas fiscales, se reducen los obstáculos de importación, como el conocido “Mecanismo de Ajuste de las Fronteras de Carbono” establecido por la Unión Europea (Fundación Heinrich Böll y Brot für die Welt, 2022).

Se puede precisar que el mercado de hidrógeno verde y sus productos está surgiendo, por lo que para que esta comercialización internacional sea sostenible se necesita que haya cooperación y regulación internacional bien establecida, con los siguientes elementos:

- Sistema de seguimiento y contabilidad del hidrógeno verde que establezca el carácter verde del producto que se comercializa.
- Normas y mecanismos para supervisar y reclamar el hidrógeno verde y sostenible garantizando que se cumplan las reglas establecidas y el procedimiento a seguir en caso de haber incumplimiento.
- Conocimiento del mercado, qué se negocia, en cuál plataforma y bajo cuales condiciones y qué producto financiero se implementa.

- Debe haber garantía para quienes invierten sobre las condiciones de comercialización del producto en los proyectos previstos.
- Se deben garantizar las normas sociales y medioambientales a nivel nacional, regional/local.
- Debe existir cooperación bilateral proveedor e importador.
- Deben existir acuerdos plurilaterales entre grupo de países que tienen intereses comunes
- En el ámbito ambiental para la sostenibilidad se sugiere:
 - Existencia de requisitos para supervisar y mecanismos de control que eviten fugas de hidrógeno con sus correspondientes sanciones. Se recomienda no comercializar hidrógeno gaseoso, sino como un derivado.
 - Empleo del agua y desalinización, llevar al mínimo la utilización del recurso hídrico y buscar alternativas para que el proceso de desalinización sea seguro y limpio. Bajo ninguna circunstancia un proyecto de hidrógeno verde debe exponer el suministro de agua en la región. Al desarrollar alguna fuente de agua nueva para producir hidrógeno o procesarlo, se debe disminuir el estrés hídrico e incrementar la disponibilidad de agua en la región.
- Deben tenerse licencias y efectuarse estudios para conocer el impacto ambiental, esto para todos los proyectos y elaborarse estudios estratégicos que faciliten la planificación y gestión de proyectos en la región y el correspondiente informe.
- Se debe cumplir con la planeación espacial para que se garantice que las instalaciones se ubiquen adecuadamente previendo que el hidrógeno no genere impacto considerable en las comunidades.

Cabe destacar que la cooperación que se presenta entre naciones resulta fundamental para que se garantice que la normativa sea aceptada, sin embargo, esto debe hacerse en el alto nivel, de tal modo que realmente haya sostenibilidad. Es necesario que exista un conjunto de países que produzcan hidrógeno verde y se mantengan a la vanguardia, establezcan criterios para la buena práctica y normas y se puedan beneficiar entre ellos de una comercialización socioambiental sólida de hidrógeno verde.

4. Indexación de índices

La viabilidad de indexar el precio del hidrógeno verde al del gas natural busca establecer un mecanismo similar al utilizado históricamente para indexar el gas natural al petróleo Brent. El objetivo principal de esta estrategia es facilitar la integración del hidrógeno verde en el mercado energético, proporcionando una mayor estabilidad y predictibilidad en los precios.

En primer lugar, se empleará el índice del petróleo Brent. Se trata de un tipo de petróleo que se extrae y comercializa en plataformas petrolíferas situadas en el Mar del Norte, y que sirve como referencia global para fijar precios del crudo. Es un índice crucial no solamente para el precio del combustible, sino también para sus productos derivados como lo son la gasolina, los lubricantes y el polietileno.

Se utilizará también el TTF (Titile Transfer Facility), que hace referencia al nombre que recibe el mercado virtual de gas en los países Bajos, y, que, a su vez, sirve como referencia para establecer el precio del gas a nivel europeo. Este mercado fue implementado en 2003 con el objetivo de facilitar el intercambio de este recurso energético en un único mercado, y desde entonces se ha convertido en el más grande en el continente europeo. La influencia del TTF es tal que varios países europeos, a pesar de tener sus propios mercados nacionales, utilizan su precio como referencia para el gas en los mercados internacionales.

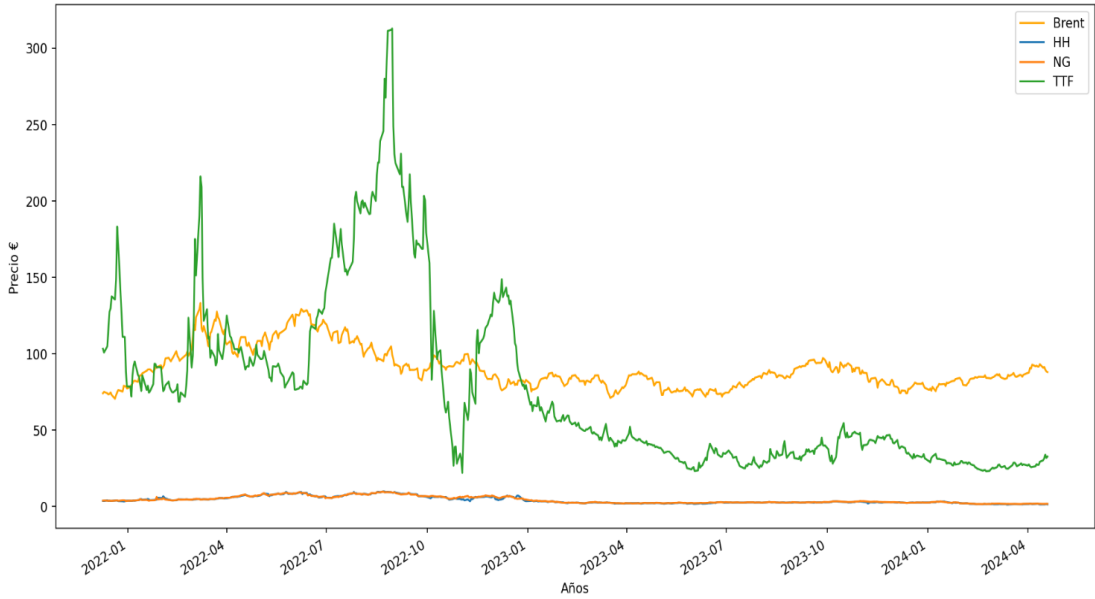
Asimismo, se utilizará el índice HH (Henry Hub), que se utiliza como referencia principal para los precios del gas natural no solo en Estados Unidos, sino también en una parte significativa del mercado global. Este índice es ampliamente

reconocido como estándar para los contratos futuros de gas natural. Su denominación se deriva del gasoducto Henry, que actúa como punto central de interconexión para varios gasoductos importantes como lo son el Gulf South Pipeline y el Transcontinental Gas Pipeline.

En relación también con este índice, se empleará también el NG NYMEX, que se refiere al contrato de futuros de gas natural negociado en la Bolsa Mercantil de materias primas de Nueva York (NYMEX). Se trata del principal punto de referencia de Estados Unidos para fijar los precios los precios futuros de gas natural de todo el territorio.

4.1 Indexación del gas natural al índice brent

Gráfico 2: Evolución de precios de Brent, HH, NG Nymex y TTF



Fuente: Factset

En el gráfico se muestra la evolución de los precios desde el año 2022 hasta 2024, comparando del índice Brent con los índices de gas natural mencionados (HH, NG, TTF), mostrando la gran fluctuación de estos indicadores, sobre todo en el caso del TTF, y las correlaciones existentes entre el precio del petróleo y del gas natural.

Para facilitar su comprensión, es pertinente explicar el funcionamiento de la indexación del gas natural al Brent. Básicamente, indexar implica vincular el precio del gas natural al precio del petróleo. En la práctica, esto se logra de diferentes maneras, pero la más utilizada es aplicando una fórmula que establezca el porcentaje del precio de Brent o una relación específica entre el precio del gas natural y el del petróleo. A modo de ejemplo, podría determinarse que el precio del gas natural es equivalente al precio del Brent más un porcentaje fijo.

Es importante destacar que la indexación del gas natural al petróleo, como se observa en el gráfico, está perdiendo cada vez más su atractivo económico. Esto se debe principalmente a la alta volatilidad que el petróleo puede experimentar debido a factores externos, lo cual puede provocar fluctuaciones imprevistas en los precios del gas natural. Este fenómeno es demostrable con los conflictos actuales, como la guerra entre Rusia y Ucrania, y los enfrentamientos en el conflicto Palestino-israelí y en el Medio Oriente, han generado incertidumbre y una volatilidad significativa en los mercados petroleros.

Consecuentemente, cada vez más países están abandonando el método de fijación de precios vinculado a petróleo (OPE) y está optando por la competencia de Gas contra Gas (GOG) como principal mecanismo de fijación de precios en el mercado de gas natural. Este cambio se refleja claramente en el significativo aumento de las importaciones de Gas natural licuado desde 2005, mientras que la participación en la OPE continúa disminuyendo, como se observa de manera constante en el gráfico con una tendencia descendente (Till & Mchich, 2020).

Por lo tanto, lo que se pretende es que los precios de gas se determinen más directamente por las condiciones del mercado de gas en lugar de estar vinculados al precio del petróleo y su volatilidad inherente, marcada por factores geopolíticos y económicos globales. Se trata de una estrategia que proporciona una mayor flexibilidad y que refleja de manera más precisa la verdadera curva de oferta y demanda específica del mercado del gas.

Dicho todo lo anterior, y habiendo explorado los aspectos negativos y contraproducentes de la indexación, es igualmente relevante examinar sus aspectos positivos y las razones que respaldaron su implementación:

La principal ventaja de indexar al Brent es la transparencia, ya que utilizar un índice mundialmente reconocido, ello genera una gran confianza en los acuerdos comerciales y facilita la gestión de riesgos al estar todos los precios debidamente regulados. En esta misma línea, al quedar todo ampliamente regulado, facilita considerablemente los procesos de negociación, ya que las partes involucradas en la transacción están haciendo uso de un índice de referencia común y ampliamente aceptado.

Asimismo, el hecho de que Brent sea un índice global permite que los precios del gas puedan alinearse mejor en los mercados internacionales, lo que facilita considerablemente su comparación y posterior negociación.

Por último, la indexación de precios puede facilitar el acceso a financiamiento de proyectos, especialmente en el sector energético, ya que los prestamistas tienden a considerar más predecibles los flujos de efectivo asociados con contratos indexados, lo que puede aumentar la confianza en la viabilidad financiera de dichos proyectos.

4.2 Indexación del hidrógeno verde al gas natural

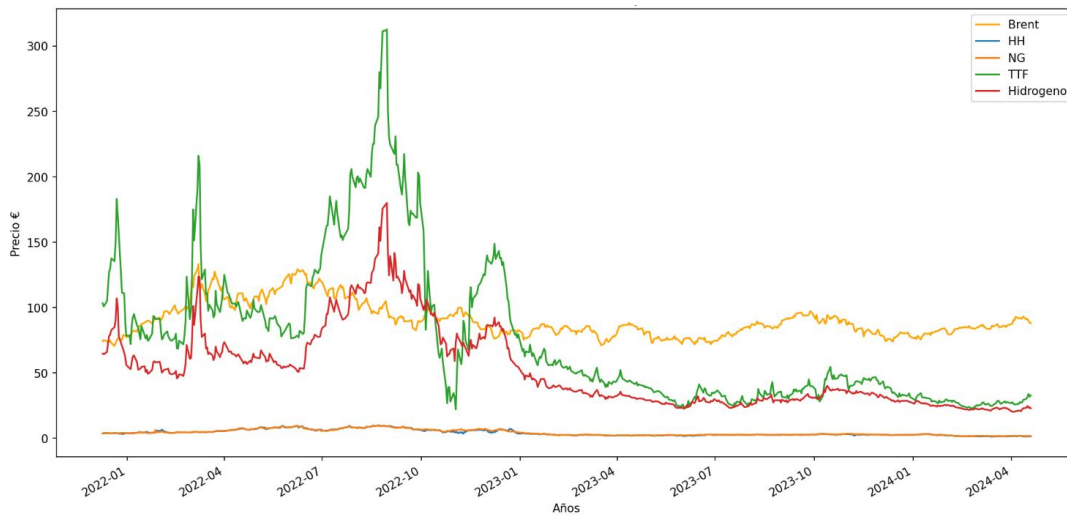
La indexación del hidrógeno verde al gas natural tiene varias ventajas importantes. En primer lugar, puede reducir la volatilidad y facilita la planificación financiera de productores y consumidores. Además, hace que el hidrógeno verde sea más competitivo frente a otras fuentes de energía, fomentando su adopción y facilitando la transición hacia una economía más limpia.

Para los inversores, la indexación también es atractiva, ya que reduce el riesgo financiero asociando los precios del hidrógeno a un mercado más maduro, lo cual podría atraer más inversiones a los proyectos de hidrógeno verde. Además, facilita

la planificación y la contratación a largo plazo, permitiendo a empresas y gobiernos establecer contratos con precios predeterminados.

Una indexación puede llevar a promover el uso del hidrógeno verde a través de precios competitivos, incentivando así su producción a gran escala y acelerando la descarbonización de sectores que depende otras fuentes de energía, contribuyendo así a los objetivos de reducción de gases de efecto invernadero.

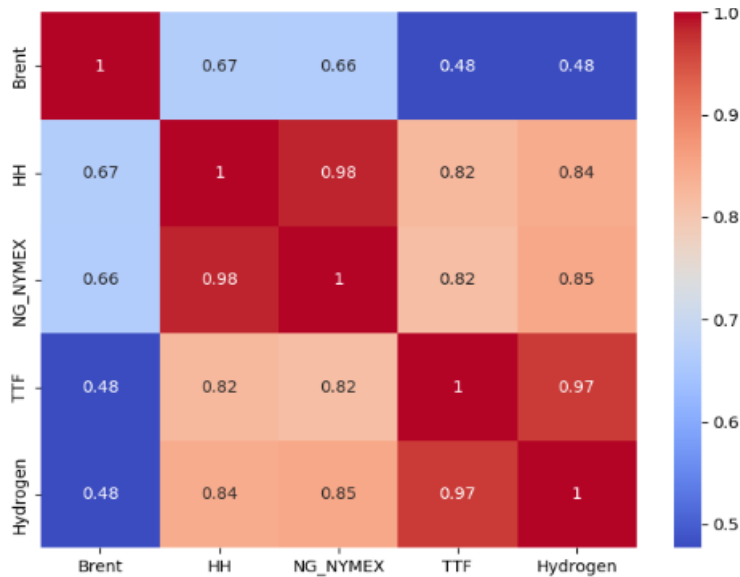
Gráfico 3: Evolución de precios de Brent, HH, NG Nymex, TTF e Hidrógeno verde



Fuente: Factset, Capital IQ

En el gráfico se muestra la evolución de los precios desde el año 2022 hasta 2024, comparando el Hidrógeno verde con el índice Brent y con los índices de gas natural mencionados (HH, NG, TTF), mostrando la gran fluctuación de estos indicadores a lo largo de los años.

Gráfico 4: Matriz de correlaciones



Fuente: Facset, Capital IQ

Para estudiar la viabilidad de la indexación de precios del hidrógeno en relación con los del gas natural, se analizan las posibles correlaciones entre los diferentes índices de referencia del gas natural y el petróleo Brent (incluido por reflejar la correlación con el Hidrógeno Verde)

La correlación con HH es de 0,85, lo que indica una fuerte correlación positiva. Esto sugiere que cuando el precio de HH aumenta, lo hace también el hidrógeno, moviéndose generalmente en la misma dirección. Para NG_NYMEX, la correlación es idéntica a la de HH (0,85), por lo que podemos extraer el mismo diagnóstico para ambos casos. Finalmente, la correlación con TTF es de 0,97, la más alta de todas. Esto sugiere que los factores que afectan a TTF pueden llegar a generar un impacto casi directo en el hidrógeno.

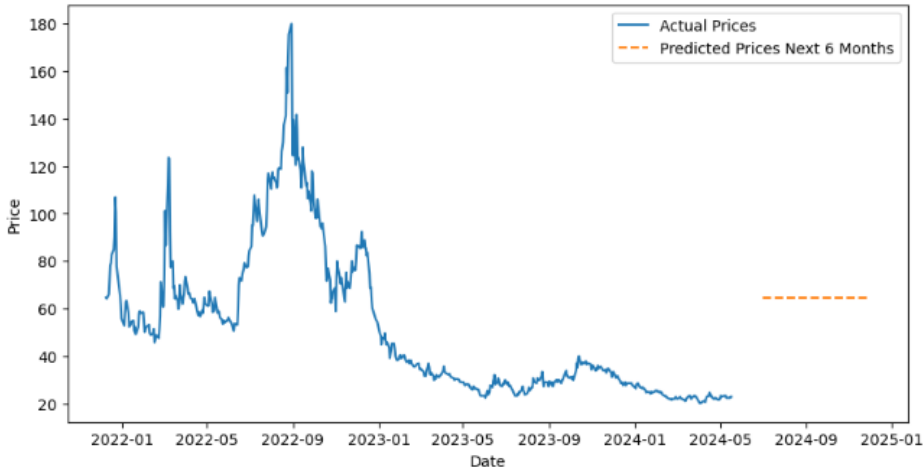
De esta forma, existe una alta correlación entre los índices de referencia, en algunos casos cercana a 1.0, lo que justifica la indexación, ya que indica un movimiento conjunto de los precios. Esta indexación permitiría anticipar posibles cambios y fluctuaciones en el mercado del hidrógeno. Además, La tabla de correlaciones

muestra la incipiente integración del hidrógeno en el mercado energético. A través de la indexación, podemos simplificar el seguimiento y análisis de los precios utilizando índices de referencia reconocidos.

Sin embargo, al igual que la indexación del gas natural al Brent, existen razones para no indexar el hidrógeno de esta manera como pueden ser las diferencias en la oferta y demanda de los mercados de hidrógeno y gas natural. A pesar del auge del mercado del hidrógeno, hay una notable diferencia de demanda en comparación con el gas natural. Esto podría distorsionar los precios del hidrógeno si se vinculan a los del gas natural. Además, se ha dado una alta volatilidad del gas natural en los últimos años debido al contexto geopolítico turbulento. La indexación podría hacer que los precios del hidrógeno sufran las consecuencias de esta volatilidad. Por último, los costes de producción del hidrógeno, especialmente del hidrógeno verde, son significativamente menores en infraestructura que los del gas natural, lo que sería otro factor a tener en cuenta en la posible distorsión de precios.

5. Análisis de regresión para proyección de precios de hidrógeno verde

Gráfico 5: Análisis de regresión



Fuente: Factset

En un análisis de regresión realizado sobre un conjunto de datos que contiene la fecha y el precio del hidrógeno en cada fecha, se buscó entender la tendencia de

los precios del hidrógeno a lo largo del tiempo y prever sus valores futuros. El dataset fue dividido en dos partes: un conjunto de entrenamiento (train) que comprendía el 60% de los datos, y un conjunto de prueba (test) con el 40% restante.

Para entrenar el modelo de regresión, se utilizó el conjunto de entrenamiento, y se evaluó su desempeño utilizando el error absoluto medio (MAE). El modelo arrojó un MAE de 4.62€ en el conjunto de entrenamiento, lo que indica que, en promedio, las predicciones del modelo se desviaron en 4.62€ de los precios reales del hidrógeno. Posteriormente, se evaluó el modelo en el conjunto de prueba, obteniendo un MAE de 1.79€, mostrando una mayor precisión en la predicción sobre datos no vistos previamente.

Con base en el análisis y las predicciones generadas por el modelo de regresión, se estima que los precios del hidrógeno se mantendrán en torno a los 70€ durante los próximos seis meses. Esta proyección considera la tendencia observada en los datos históricos y sugiere una estabilidad en los precios del hidrógeno a corto plazo, siempre y cuando no ocurran cambios significativos en los factores que afectan su mercado.

6. Conclusiones

La fundamental característica del hidrógeno renovable es ser “vector energético”, pues contribuye con el aprovechamiento de las energías renovables y permite incremento de estas en los sistemas energéticos. Resulta la oportunidad perfecta para la descarbonización de distintos sectores económicos, gracias a sus usos diversos. Por estos motivos se considera al hidrógeno en nuevo *commodity*, incluso llega a integrar la infraestructura para la producción de gas y electricidad descarbonizando diferentes sistemas energéticos.

Desde la perspectiva técnica el uso de hidrógeno renovable tiene muchas aplicaciones, pero en ocasiones puede que no represente la mejor opción para descarbonizar, entre ellas incluyen aquellas que emplean hidrógeno que proviene

de fuentes no renovables y donde no es posible su reemplazo por una alternativa renovable que reduzca las emisiones de gas que produce la industria de fertilizantes; sectores que no se pueden descarbonizar por la inviabilidad técnica para la electrificación directa, por lo que se requiere de nuevas tecnologías o la sustitución de los combustibles fósiles en sector transporte terrestre y marítimo.

El hidrógeno da apertura para la creación de nuevos mercados dada su versatilidad, también es de precisar que este tipo de comercialización trae consigo fuertes riesgos, por ejemplo, la disminución de emisiones de CO₂ puede generar obstáculos socio ecológicos en las regiones donde se ubican las infraestructuras de producción y procesamiento, de igual manera, la enajenación de la tierra continua siendo motivo de disputa. Por esta razón, es imprescindible que se considere una “transición energética socioecológica” en la que prevalezca la justicia y todos los involucrados se vean beneficiados a través de la cooperación y el apoyo a los grupos vulnerables. Se considera conveniente que se reforme la transición energética verde, de tal modo, que las condiciones políticas mantengan su estándar y que este tipo de desarrollo se reproduzca en consonancia con los objetivos socioecológicos apegados a la correspondiente legislación medioambiental, en el marco de democracia y la política social.

Es imprescindible tener el control de la producción de hidrógeno, del consumo energético, del empleo de los recursos naturales y su explotación, esto implica que se debe existir organización para el bienestar público.

Como se ha podido mostrar, los intereses geopolíticos que se tienen alrededor del hidrógeno son inmensos; como materia prima el hidrógeno favorece el desarrollo de tecnologías que conllevan a cambios geopolíticos en el presente siglo, en esto se incluye el uso de diferentes tecnologías como inteligencia artificial, redes inteligentes, aprendizaje automático, entre otros. En virtud de ello, los países y empresas privadas trabajan para conseguir el control de un mercado en el que se comercializa hidrógeno como materia prima, aun cuando, todavía es incierto su alcance, sin embargo, se lleva a cabo en el mundo una carrera por el liderazgo de la tecnología y producción del hidrógeno limpio y que ha de tener grandes incentivos geopolíticos.

7. Declaración del uso de herramientas de inteligencia artificial

Por la presente, yo, Celso García-Morales García, estudiante de E-2 Analytics de la Universidad Pontificia Comillas al presentar mi Trabajo Fin de Grado titulado "Hidrógeno Verde: Nuevo Commodity en un Mundo de Transición 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 [el alumno debe mantener solo aquellas en las que se ha usado ChatGPT o similares y borrar el resto. Si no se ha usado ninguna, borrar todas y escribir "no he usado ninguna"]:

1. **Brainstorming de ideas de investigación:** Utilizado para idear y esbozar posibles áreas de investigación
2. **Estudios multidisciplinares:** Para comprender perspectivas de otras comunidades sobre temas de naturaleza multidisciplinar
3. **Corrector de estilo literario y de lenguaje:** Para mejorar la calidad lingüística y estilística del texto
4. **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 que 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: 19/06/2024

Firma: __Celso García-Morales García__

8. Bibliografía

- Bloomberg. (2020). Hydrogen Economy Outlook. Key messages. <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>
- Cerezo, F. (2022). Producción de hidrógeno verde: comparativa de la viabilidad técnica y económica de energía eólica onshore y offshore [https://dadun.unav.edu/bitstream/10171/64403/1/Cerezo Araujo Fermin_904717_MINT.pdf](https://dadun.unav.edu/bitstream/10171/64403/1/Cerezo_Araujo_Fermin_904717_MINT.pdf)
- Cerović, L et al. (2017). Economic Effects of Renewable Energy Technologies. *Naše gospodarstvo/Our Economy*, 63(2), 49–59. DOI: 10.1515/ngoe-2017-0012. https://www.researchgate.net/publication/318020129_Economic_Effects_of_Renewable_Energy_Technologies
- Chemes, J y Bertinat, P. (2022). Las transiciones energéticas en *Energía y Equidad* No 5. <https://www.researchgate.net/publication/373079604>
- Dietz, K. (2023). ¿Transición energética en Europa, “extractivismo verde” en América Latina? <https://nuso.org/articulo/306-transicion-energetica-europa-extractivismo-verde-america-latina/>
- escenario geopolítico. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7931500>
- Fundación Heinrich Böll y Brot für die Welt. (2022). Hidrógeno verde: criterios de éxito para su comercio y producción sustentable <https://cl.boell.org/sites/default/files/2023-03/hidrogeno-verde.-criterios-de-exito.pdf>
- García, M. (2022). Demanda del hidrógeno verde en España y potencial de penetración en el horizonte 2030. Caso de aplicación al análisis coste beneficio de usos de hidrógeno en una refinería, en la industria siderúrgica y en la industria química. https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/67031/TFG_Cavestany%20Garcia-Matres%2CMario.pdf?sequence=2

- Giménez, I. (2017). Retos del hidrógeno verde. <https://negociosostenible.camaravalencia.com/wp-content/uploads/2021/07/ECONOMA-ARAGONESA-revista-73-Hidrógeno-Verde-2.pdf>
- González García-Blanco, A (2010). Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno. http://www2.udg.edu/Portals/88/proc_industrials/5%20-%20Otros%20CombustiblesHidrógeno.pdf
- Görlach, B., Jakob, M y De la Vega, R. (2022), Pathways Towards a Global Market for Green and Sustainable Hydrogen: Need for Action and Policy Options. <https://www.boell.de/en/green-hydrogen> y <https://www.brot-fuer-die-welt.de/themen/gruener-wasserstoff/>.
- Iberdrola.es. 2022. Los mayores proyectos de hidrógeno verde en España - IBERDROLA. <https://www.iberdrola.es/blog/sostenibilidad/grandesproyectos-espana-hidrogeno-verde>
- IRENA. (2018). Transformación energética mundial. Hoja de ruta hasta 2050. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Global_Energy_Transformation_2018_summary_ES.pdf?la=en&hash=A5492C2AAC7D8E7A7CBF71A460649A8DEDB48A82
- Kingsbury, D. (2021). Green' Extractivism and the Limits of Energy Transitions: Lithium, Sacrifice, and Maldevelopment in the Americas. *Georgetown Journal of International Affairs*.
- Macmillen, D y Andreucci, D. (2022). Greening Extractivism: Environmental Discourses and Resource Governance in the 'Lithium Triangle'. *Environment And Planning E: Nature And Space vol. 5 No 2*.

- Merodio, M. (2019). El papel olvidado del hidrógeno en la transición energética
<https://magnuscmd.com/es/el-papel-olvidado-del-hidrogeno-en-la-transicion-energetica/>
- MITERD. (2020). Hoja de ruta del hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable.
https://www.miteco.gob.es/images/es/hojarutahidrogenorenovable_tcm30-525000.PDF
- Morante, J., Andreu, T., García, G., Guilera, J., Tarancón, A. y Torrell, M., (2020). Hidrógeno “vector energético” de una economía descarbonizada. 1st ed. Fundación Naturgy
- Oshima, T. (2009). En 2008 las renovables dominaron las inversiones energéticas. El Mundo.
<https://www.elmundo.es/elmundo/2009/06/04/ciencia/1244103852.html>
- Pandev, M et. al. (2017). Hydrogen Economy: the future for a sustainable and green society. *Bulgarian Chemical Communications. Volume 49* Special Issue C, https://www.researchgate.net/publication/317401949_Hydrogen_Economy_the_future_for_a_sustainable_and_green_society
- Proyecto Regional Transformación Social-Ecológica (2023). Desafíos del hidrógeno verde. ¿Nueva bonanza o más de lo mismo? <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/mexiko/20738.pdf>
- Roca, J. (2020). Europa apuesta por el liderazgo mundial en hidrógeno verde.
<https://elperiodicodelaenergia.com/europa-apuesta-por-el-liderazgo-mundial-en-hidrogeno-verde/>
- Sanchez, S. (2021). Análisis del sector de las energías renovables y su impacto económico. La economía del hidrógeno.
<https://repositorio.comillas.edu/rest/bitstreams/440507/retrieve>
- Shriver, D.; Atkins, P. y Langford, C. (1997). *Química Inorgánica. Vol. 1*. Reverté. Comisión Europea: “Un Pacto Verde Europeo”, commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es

- Singh, N, et al. (2019). Renewable Energy Development as a Driver of Economic Growth: Evidence from Multivariate Panel Data Analysis. *Sustainability* 2019, 11, 2418. <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/8/2418>
- Svampa, M. (2019). *Neo-Extractivism in Latin America: Socio-Environmental Conflicts, the Territorial Turn, and New Political Narratives*, Cambridge UP, Cambridge.
- Valero, J. (2010). El espejismo de una energía social. La economía del hidrógeno. *Revista Internacional de Sociología*. Vol.68, nº 2, Mayo-Agosto.
- Van de Graaf, T. (2022). El hidrógeno limpio: la piedra angular de un nuevo escenario geopolítico. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7931500>