



Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales

Transición Energética e Hidrógeno Renovable: Análisis de Precios y Competitividad

Autor: Claudia Agullo Lara

Director: Isabel Figuerola Ferretti

MADRID | Abril 2024

RESUMEN

El presente trabajo académico pretende analizar la transición energética hacia el hidrógeno verde como una alternativa sostenible. Dado el contexto actual de crisis energética y calentamiento global, surge la necesidad de transitar hacia fuentes de energía renovables. En este sentido, el hidrógeno renovable emerge como una solución prometedora para reducir la dependencia de las fuentes de energía tradicionales. Sin embargo, el hidrógeno verde todavía está en fases tempranas de desarrollo, por lo que no existe un mercado establecido ni precios transparentes o mecanismos de *Price Discovery**. Por este motivo, se ha realizado un estudio con el objetivo de predecir o replicar los precios del hidrógeno verde a partir de los precios de combustibles fósiles, específicamente el gas natural y el petróleo, para los mercados de Europa y de Estados Unidos. Para ello, se han analizado los precios mediante Python, empleando diferentes técnicas estadísticas para determinar la relación entre las series temporales, tales como correlación, cointegración, causalidad y modelo de regresión lineal. Dicho análisis, permite identificar al gas natural como la opción más viable para replicar los precios del hidrógeno renovable, contribuyendo así al establecimiento de estándares en su valoración de mercado.

PALABRAS CLAVE

Hidrógeno verde; crisis energética; calentamiento global; sostenibilidad; energías renovables; transición energética; descarbonización; combustibles fósiles; gas natural; petróleo; electrólisis; cadena de valor; barreras regulatorias; oferta y demanda; precios; mercado del hidrógeno.

**Price Discovery: es el proceso que determina los precios de mercado de las materias primas a través de las interacciones entre compradores y vendedores. Este mecanismo ayuda a establecer el precio evaluando la dinámica de la oferta y la demanda.*

ABSTRACT

This academic paper aims to analyze the energy transition towards green hydrogen as a sustainable alternative. Given the current context of energy crisis and global warming, the need to move towards renewable energy sources arises. In this sense, renewable hydrogen emerges as a promising solution to reduce dependence on traditional energy sources. However, green hydrogen is still in the early stages of development, so there is neither an established market nor transparent pricing or price discovery mechanisms. For this reason, a study has been carried out with the aim of predicting or replicating green hydrogen prices based on fossil fuel prices, specifically natural gas and oil, for the European and US markets. To this end, prices have been analyzed using Python, employing different statistical techniques to determine the relationship between the time series, such as correlation, cointegration, causality and linear regression model. This analysis allows us to identify natural gas as the most viable option for replicating renewable hydrogen prices, thus contributing to the establishment of standards in its market valuation.

KEYWORDS

Green hydrogen; energy crisis; global warming; sustainability; renewable energies; energy transition; decarbonization; fossil fuels; natural gas; oil; electrolysis; value chain; regulatory barriers; supply and demand; prices; hydrogen market.

Índice

1. Introducción.....	7
1.1. Presentación del tema	7
1.2. Justificación del tema.....	8
1.3. Objetivos de la investigación.....	8
1.4. Metodología	9
2. Revisión de la Literatura.....	10
2.1. Contexto de crisis energética.....	10
2.2. Transición energética.....	11
2.3. Panorama de las fuentes de energía:.....	13
2.3.1. Tradicionales y no renovables	14
2.3.1.1. Petróleo.....	15
2.3.1.2. Gas natural	15
2.3.2. Fuentes de energía renovables	16
2.4. El hidrógeno verde como nueva fuente energética.....	18
2.4.1. Características	18
2.4.2. Ventajas del hidrógeno verde	19
2.5. Cadena de valor del hidrógeno verde	20
2.5.1. Producción del hidrógeno verde	21
2.5.2. Transporte y distribución del hidrógeno verde.....	22
2.5.3. Usos del hidrógeno verde.....	24
2.5.4. Barreras en la cadena de valor	24
2.6. Barreras e hitos regulatorios.....	26
2.7. Dinámicas de oferta y demanda.....	27
2.8. Mercado y precios de hidrógeno verde.....	29
2.9. Factores que influyen en los precios del gas natural, petróleo e hidrógeno verde	30
3. Metodología del estudio.....	32
3.1. Selección y recopilación de datos	32
3.2. Variables e indicadores clave del estudio	33
3.3. Procesamiento y limpieza de datos	34
3.4. Análisis estadísticos.....	35
3.4.1. Correlación de Pearson y mapas de calor	35
3.4.2. Análisis de cointegración	36

3.4.3.	Análisis de causalidad de Granger	37
3.4.4.	Modelo de regresión lineal simple	37
4.	Resultados.....	39
4.1.	Análisis exploratorio y estadísticas descriptivas	39
4.2.	Volatilidad de los precios.....	39
4.3.	Exploración de tendencias y correlaciones	41
4.4.	Análisis de cointegración	42
4.5.	Análisis de causalidad.....	43
4.6.	Modelo de regresión lineal simple	44
5.	Conclusiones.....	47
5.1.	Conclusiones generales	47
5.2.	Limitaciones y futuras líneas de investigación.....	49
6.	Declaración de Uso de Herramientas de Inteligencia Artificial Generativa en Trabajos Fin de Grado	51
7.	Bibliografía.....	53
8.	Anexos.....	62
8.1.	Código de programación en Python	62

Índice de figuras:

Figura 1: Diferencia de temperatura media mundial(°C)

Figura 2: Los colores del hidrógeno

Figura 3: Etapas de la cadena de valor del hidrógeno verde

Figura 4: Barreras en la cadena de valor y sus respectivas políticas

Figura 5: Hitos regulatorios en Europa

Figura 6: Demanda de hidrógeno global por sector

Figura 7: Evolución coste del hidrógeno verde

Figura 8: Comparativa cadena de suministro VS mercado

Figura 9: Evolución del número de mercados con estrategias de hidrógeno verde

Figura 10: Variables del estudio

Figura 11: Conversión unidades de medida

Figura 12: Evolución de los precios del gas natural e hidrógeno verde en Europa

Figura 13: Evolución de los precios del petróleo e hidrógeno verde en Europa

Figura 14: Evolución de los precios del gas natural e hidrógeno verde en Estados Unidos

Figura 15: Evolución de los precios del petróleo e hidrógeno verde en Estados Unidos

Figura 16: Mapas de calor de las correlaciones de los vectores energéticos

Figura 17: Cointegración entre gas natural e hidrógeno verde

Figura 18: Análisis de causalidad Granger en Europa

Figura 19: Análisis de causalidad Granger en Estados Unidos

Figura 20: Regresión lineal simple en Europa

Figura 21: Regresión lineal simple en Estados Unidos

1. Introducción

1.1. Presentación del tema

En la actualidad, el calentamiento global y la crisis energética suponen dos grandes desafíos para la humanidad, por lo que la búsqueda de soluciones sostenibles es fundamental. Esta necesidad se ve intensificada por factores geopolíticos, como la pandemia de COVID-19 y la guerra en Ucrania, que han aumentado la volatilidad de los mercados energéticos y acelerado la transición hacia fuentes de energía renovables. Los países se ven obligados a reevaluar su dependencia de las fuentes de energía tradicionales y a considerar alternativas más sostenibles y limpias.

Dentro de este marco, el hidrógeno verde, también conocido como hidrógeno renovable, emerge como una alternativa prometedora para la transición hacia un futuro energético más sostenible. Este vector energético posee el potencial de sustituir a los combustibles fósiles en aplicaciones donde la electrificación resulta inviable, además de servir como complemento esencial a otras fuentes de energía renovable, contribuyendo significativamente a satisfacer la creciente demanda energética.

En el panorama actual, no se ha establecido un mercado consolidado del hidrógeno verde. Su desarrollo depende de la existencia de precios transparentes y mecanismos efectivos de descubrimiento de precios. Por lo tanto, resulta crucial comprender como las dinámicas de los precios del hidrógeno verde se comparan con las de combustibles fósiles tradicionales, como el gas natural y el petróleo. Además, es importante reconocer que las fluctuaciones en los mercados de energía convencionales tienen un impacto directo en la competitividad y en la adopción del hidrógeno verde.

Este estudio pretende comprender en profundidad el potencial del hidrógeno verde para contribuir a la creación de un sistema energético más sostenible. Al analizar las interacciones entre los precios del hidrógeno verde y los de los combustibles fósiles, se busca identificar patrones que puedan predecir el comportamiento del precio del hidrógeno verde, basándose en las variaciones de los mercados energéticos tradicionales.

1.2. Justificación del tema

La elección del hidrógeno verde como tema principal del estudio se justifica por varias razones clave. En primer lugar, el hidrógeno verde desempeña un papel fundamental en la transición energética hacia fuentes de energía más sostenibles. En segundo lugar, es una solución para hacer frente a desafíos como la crisis energética y la diversificación de fuentes de energía sostenibles. En tercer lugar, el análisis permite predecir o replicar los precios del hidrógeno verde a partir de los precios del gas natural y el petróleo. Por último, el tema elegido es relevante, actual y tiene un impacto significativo en el futuro de la energía y el medioambiente.

1.3. Objetivos de la investigación

El principal objetivo de este estudio es realizar un análisis comparativo entre los precios del hidrógeno verde y los de los combustibles fósiles, como el gas natural y el petróleo, estableciendo un mecanismo que permita replicar los precios del hidrógeno verde en función de los precios de los combustibles fósiles. Esta evaluación es fundamental, debido a que la transparencia en la formación de precios y el *Price Discovery* son esenciales para la consolidación y desarrollo de un mercado eficiente para el hidrógeno verde. Para lograr dicho objetivo general, se abordarán también los siguientes objetivos específicos:

- Analizar el impacto del cambio climático y la crisis energética para acelerar la transición a energías renovables.
- Investigar las fuentes de energía tradicionales y la necesidad de usar renovables para descarbonizar el sector energético.
- Evaluar el potencial del hidrógeno verde como clave para una transición energética sostenible.
- Identificar barreras que limitan la adopción y mercado del hidrógeno verde.
- Examinar la evolución histórica de los precios del petróleo, gas natural, e hidrógeno renovable e identificar posibles patrones.
- Desarrollar análisis estadísticos para determinar si es posible predecir precios del hidrógeno verde basados en los de gas natural y petróleo. Los principales serán análisis de correlación, cointegración, causalidad y modelo de regresión lineal.

1.4. Metodología

Para alcanzar los objetivos mencionados anteriormente, se ha llevado a cabo una revisión de la literatura existente, recopilando información de fuentes académicas como Scopus y Google Scholar, informes, libros y artículos publicados por profesionales de la materia. En el proceso de búsqueda de información se usaron palabras claves como “crisis energética”, “cambio climático”, “transición energética”, “fuentes de energía tradicionales”, “fuentes de energía renovables”, “descarbonización”, “hidrógeno verde o “hidrógeno renovable” entre otras.

La segunda parte del estudio incluye el análisis cuantitativo para analizar la posibilidad de replicar los precios del hidrógeno verde en base a los precios del gas natural y petróleo. En primer lugar, se recopilaron los datos de los precios de fuentes confiables como Factset y S&P Global. Específicamente, se recolectaron datos de precios del gas natural y del petróleo para Europa y Estados Unidos, y estimaciones de precios del hidrógeno para las mismas regiones. Con estos datos, se utilizó Python, un lenguaje de programación usado en las aplicaciones web, el desarrollo de software, la ciencia de datos y el machine learning. Este software estadístico ha permitido realizar tareas analíticas como la visualización de datos, el análisis de correlaciones, cointegración, causalidad y modelos de regresión lineal.

2. Revisión de la Literatura

2.1.Contexto de crisis energética

La crisis energética ha sido un fenómeno de gran repercusión en el panorama actual, impulsando a los países a reconsiderar su dependencia de las fuentes de energía tradicionales. La situación de la energía, hoy en día, tiene similitudes con la crisis del petróleo de los años setenta, la cual, fue causada por factores geopolíticos que generaron aumentos en los precios, inflación y efectos negativos en la economía. No obstante, la situación actual es más compleja y ha tenido un impacto no sólo en el petróleo si no también en otras dimensiones como el gas natural, el carbón, la seguridad alimentaria, la electricidad y el clima (International Energy Agency [IEA], 2022).

Entre las causas principales de la crisis se encuentra la insuficiencia de energía proveniente de combustibles fósiles para satisfacer la creciente demanda, junto con la interrupción en la cadena de suministro a nivel global como consecuencia de la pandemia de COVID-19. Estos factores han causado cambios significativos en el sistema energético, generando incertidumbres en los mercados de materias primas (Ozili y Ozen, 2023).

Además, la guerra en Ucrania ha impactado los mercados energéticos, ya que Rusia comenzó a reducir su suministro de gas, llegando incluso a suspenderlo con el cierre del gaseoducto Nord Stream 1. Debido a esto, Estados Unidos y la UE impusieron varias sanciones a Rusia y varios países europeos expresaron su intención de disminuir gradualmente las importaciones de gas ruso hasta su eliminación total (Mohanna, 2022). Rusia es, sin duda, el principal exportador de combustibles fósiles a nivel mundial, por lo tanto, este conflicto creó tensiones en los mercados energéticos, generó mucha volatilidad en los precios de la energía y el gas alcanzó unos precios récord (Fabra, 2023).

Las fuertes subidas de los precios de la energía registradas tras la guerra demuestran lo vulnerable que es el continente a las interrupciones del suministro energético (Chuliá et al., 2024). Ello, unido a la dependencia del gas ruso, ha hecho que Europa busque otras alternativas como el Gas Natural Licuado (GNL) que llega por mar desde distintos países como Estados Unidos, cuatriplicando su precio al llegar a destino (Doe y Smith, 2021).

Los efectos principales de la crisis energética son significativos y requieren una identificación clara. En primer lugar, el aumento de los precios de los combustibles y la electricidad se erige como una de las respuestas más evidentes a esta situación. Como consecuencia de ello ha aumentado la inflación, perjudicando al consumo y la cesta de la compra. En segundo lugar, la inestabilidad económica emerge como un factor preocupante, dado que el incremento de los precios puede afectar negativamente a las empresas y al crecimiento económico. En tercer lugar, la crisis ha generado una notable inseguridad energética, ya que los países se han vuelto vulnerables ante interrupciones en el suministro, lo cual puede afectar negativamente a la estabilidad política y social (Comité Económico y Social Europeo, 2023).

Por último, un efecto positivo de la crisis energética es la transición hacia las energías renovables y limpias, entre las que una de las fuentes más incipientes es el hidrógeno verde. Estas fuentes de energía sostenible están reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles, disminuyendo el impacto en el cambio climático y mitigando la emisión de gases de efecto invernadero. Así, la presidenta de la Comisión Europea (CE), Ursula Von der Leyen, estableció la necesidad de reformar el mercado de la energía en Europa, fomentando las energías renovables (Fabra, 2023).

Para acelerar la transición energética es necesario que los gobiernos y las empresas aumenten la inversión en energías renovables, ya que tienen un papel fundamental para reducir la dependencia de los combustibles fósiles (Cantarero, 2020). Por otro lado, es importante implementar políticas energéticas que promuevan la sostenibilidad y la transición energética, para acelerar el despliegue de energías renovables sostenibles, como la eólica y la solar. Estas medidas reducirán el uso de fuentes de energía tradicionales y aumentarán la diversificación energética hacia fuentes renovables (Dormido et al., 2022).

2.2. Transición energética

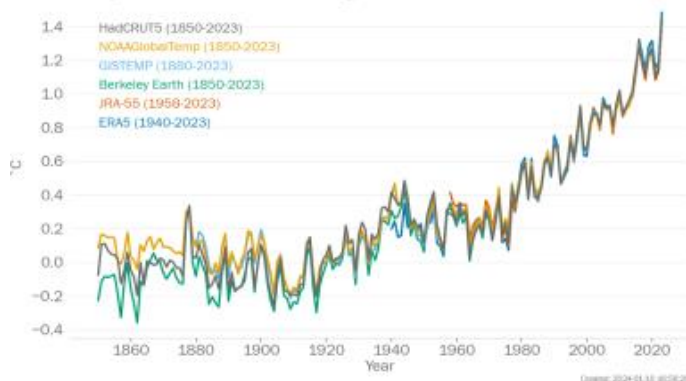
La transición energética se define como “el cambio del sector energético mundial de los sistemas de producción y consumo de energía basados en combustibles fósiles a fuentes de energía renovables como la eólica, la solar y la geotérmica, entre otras” (S&P Global, 2020). Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), la transición

energética es un cambio gradual y continuo de la producción mundial de energía hacia un sistema sin emisiones de carbono (Linares Llamas, 2018).

En la actualidad, el calentamiento global es una de las mayores preocupaciones y uno de los mayores desafíos al que se enfrenta nuestra sociedad. La temperatura de la tierra está aumentando, batiendo todos los récords históricos, en 2023 se alcanzó la mayor temperatura observada desde el inicio de los registros en 1850, superando en $1,45 \pm 0,12$ °C los niveles preindustriales. (Ap, 2024). Este aumento provoca el calentamiento de la atmósfera y el océano, elevando el nivel del mar debido al deshielo, así como otros cambios climáticos como la desertificación y fenómenos como huracanes, inundaciones e incendios (Peralta Rodríguez, 2020).

El aumento de fenómenos meteorológicos extremos está acelerando la transición a fuentes de energía que no dañan el medioambiente y se pueden transformar en energía eléctrica para el consumo. Con la transformación limpia del sistema eléctrico se podría llevar a cabo una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Wang et al., 2022).

Figura 1: Diferencia de temperatura media mundial(°C)



Fuente: OMM (Organización Meteorológica Mundial)

El efecto invernadero es un proceso en el que la radiación térmica emitida por la Tierra queda atrapada en la atmósfera debido a los gases con ese efecto (GEI), lo que provoca el calentamiento global (Communications, 2023). Aunque muchos de esos gases de efecto invernadero existen de manera natural, la actividad humana ha aumentado su presencia en la atmósfera (¿Qué Es La Transición Energética Y Cómo Impulsarla? | Repsol, 2024). El dióxido de carbono (CO₂) es el gas más importante, aunque existen más gases de

efecto invernadero como el metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y gases industriales como los hidrofluorocarbonos (Sidagis Galli et al., 2022).

En respuesta, el proceso de descarbonización se centra en reducir las emisiones de carbono a la atmósfera, principalmente CO₂ (Sidagis Galli et al., 2022). Es imprescindible promover el uso de energías renovables y mejorar la eficiencia energética para minimizar la huella de carbono (Dormido et al., 2022).

El compromiso global con esta transformación se evidenció en la firma del Acuerdo de París en 2015. La Unión Europea estableció un calendario de objetivos para, en primer lugar, reducir el consumo energético y para, en segundo lugar, aumentar el uso de energías renovables, disminuyendo las emisiones de CO₂. Estas medidas contribuirán a luchar contra el cambio climático y alcanzar una economía neutra en carbono en 2050 (Redondo y Vega, 2021). Además, en la pasada Conferencia de las Partes (COP28) del 28 de diciembre de 2023, se hizo un nuevo llamado a "alejarse" de los combustibles fósiles, ya que la disminución del calentamiento global sólo será posible si se lleva a cabo la eliminación progresiva de los mismos (Collection, 2024).

En la actualidad, los combustibles fósiles siguen siendo la base del sistema energético global, no obstante, el uso de fuentes de energía renovables está aumentando considerablemente (Times/Redux, 2023). El hidrógeno renovable surge como una alternativa sostenible en el contexto de transición energética hacia energías más limpias. Este se produce mediante la electrolisis del agua, utilizando electricidad generada por fuentes de energía renovables, lo cual no emite dióxido de carbono y contribuye a la descarbonización del sector energético (Fell et al., 2023).

2.3. Panorama de las fuentes de energía:

Las fuentes de energía son aquellos recursos naturales que pueden ser transformados para producir energía de algún tipo. Estas fuentes son esenciales para la sociedad y se clasifican en dos categorías fundamentales según su impacto ambiental: fuentes de energía no renovables y fuentes de energía renovables (Martínez y Caro, 2010). En el contexto actual de transición y crisis energética, resulta importante comprender ambos conceptos y sus respectivos efectos en el medioambiente.

2.3.1. Tradicionales y no renovables

Las fuentes de energía no renovables o energías convencionales son aquellas que se encuentran en la naturaleza en cantidades limitadas, son agotables, no se regeneran o lo hacen muy lentamente en comparación con la esperanza de vida humana. En la actualidad, los tipos de energía no renovable más empleados son los combustibles fósiles provenientes de la materia orgánica acumulada en sedimentos transformada en condiciones de temperatura y presión adecuadas, y la energía nuclear, que incluye todos los componentes químicos necesarios para alimentar y operar los reactores nucleares, donde se produce energía a través de una reacción conocida como fisión nuclear (Tipos de energía no renovable y su impacto medioambiental, 2023).

Un informe reciente sobre energía global de BP revela que los combustibles fósiles todavía representan más del 80% de la energía primaria consumida en todo el mundo («Energías no renovables, ¿qué son? características y tipos», 2023). Sin embargo, el uso masivo de fuentes de energía no renovables tiene numerosas desventajas que impactan en la sociedad y en el medioambiente.

Entre las principales desventajas se encuentra la alta contaminación atmosférica producida durante los procesos de extracción, transporte, procesamiento y combustión del petróleo, el gas natural y el carbón. Estos emiten contaminantes y gases de efecto invernadero, contribuyendo al calentamiento global y al cambio climático (SveaSolar, 2023). Los contaminantes liberados incluyen partículas, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono (CO₂) (Pablo Dávila et al., 2012). Las fuentes de energía no renovables están afectando en gran medida a la salud de los humanos, ya que contaminan el aire y causan enfermedades respiratorias y cardiovasculares entre otras. La Organización Mundial de la Salud (OMS) afirma que la contaminación del aire causa la muerte de millones de personas cada año, ya que aproximadamente el 90% de las personas de todo el mundo respiran aire contaminado (World Health Organization: WHO, 2018).

Además de impactar la salud, también provocan daños en la biodiversidad, causando daños irreparables a la flora y la fauna. La extinción de especies y el desequilibrio de ecosistemas pueden resultar de la deforestación, la degradación del hábitat y la contaminación. Asimismo, las reservas de estas fuentes de energía son finitas y eventualmente se agotará en algunos años. (Novelec, 2023) Según algunas fuentes, el

petróleo dejará de existir en 40 años, el gas natural en 60-80 años y el carbón en aproximadamente 200 años (Canogar, 2006). Por último, la producción de energía nuclear, si bien no emite gases de efecto invernadero, conlleva riesgos asociados a la radiación y la contaminación radiactiva, cuyos efectos a largo plazo y los desechos contaminantes afectan a las futuras generaciones (Tognoli, 2017).

Existen cuatro principales tipos de energías no renovables: el petróleo, el gas natural, el carbón (estos tres son combustibles fósiles) y la energía nuclear. A continuación, se analizarán el petróleo y el gas natural, ya que ambos son relevantes para nuestro estudio.

2.3.1.1.Petróleo

El petróleo es una combinación de diferentes compuestos orgánicos, principalmente hidrocarburos insolubles en agua, es un recurso no renovable también conocido como oro negro, petróleo crudo o simplemente crudo (Herrera Herbert, 2020). Este se acumula en trampas petrolíferas y se extrae mediante la perforación de rocas sedimentarias donde se han acumulado restos de animales y plantas durante millones de años. Una vez extraído se usa como fuente de energía y materia prima para la fabricación de una amplia gama de derivados (Novelec, 2023). El petróleo se calienta para usarse como combustible para automóviles y maquinaria, así como para la producción de plásticos, fibras sintéticas, explosivos o abonos (Repsol YPF., 2002). La Organización de las Naciones Unidas (ONU) indica que estas fuentes de energía generan dos tercios de las emisiones globales de CO₂, y también representan el 80% de la necesidad de energía primaria en el mundo (Claves de la Nueva Ley de Cambio Climático y Transición Energética, 2023).

2.3.1.2.Gas natural

El gas natural, también conocido como gas fósil, es un hidrocarburo mezclado de gases ligeros. Como todos los combustibles fósiles, se produce mediante la descomposición de los restos orgánicos que se encuentran bajo la superficie terrestre durante un período prolongado de tiempo. Se encuentra la mayoría de las veces, en forma de bolsas en los depósitos de petróleo, aunque también puede encontrarse en capas de roca sedimentaria sin petróleo. El principal componente del gas natural es el metano (CH₄) que contribuye al efecto invernadero y al cambio climático (López Jimeno, 2002 a).

La ONU afirma que el sistema de producción y consumo de combustibles fósiles, incluyendo el gas natural, libera aproximadamente 110 millones de toneladas de metano a la atmósfera anualmente. No obstante, el gas natural tiene menos emisiones de carbono y una mayor eficiencia de consumo que el crudo y el carbón, aunque siga considerándose un combustible fósil. Se prevé que la demanda mundial de gas natural siga aumentando al menos hasta 2030 (Wang et al., 2022).

2.3.2. Fuentes de energía renovables

Las fuentes de energía renovables son aquellas derivadas de fuentes naturales, tienen un papel fundamental ya que minimizan el impacto en el medioambiente y no producen desechos, son inagotables y provienen de recursos locales. Existen diferentes tipos de energías renovables que aprovechan recursos naturales que se regeneran continuamente (Novelec, 2023). Es fundamental destacar su importancia, ya que representan pilares esenciales para la transición energética, al ser fuentes limpias y abundantes.

En ese sentido, el hidrógeno verde se obtiene a través de la electrólisis, un proceso alimentado por energías renovables, por lo que su producción está intrínsecamente ligada a la disponibilidad y eficacia de estas (Fernández et al., 2022). Los fabricantes deben demostrar que sus emisiones de carbono durante el ciclo de producción del hidrógeno, junto con las emisiones asociadas con la energía utilizada en el proceso se encuentra por debajo de ciertos niveles (Fell et al., 2023). Para la obtención del hidrógeno verde mediante electrólisis, se puede utilizar electricidad generada a partir de cualquier fuente de energía renovable, siendo las más comunes la energía solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica (United Nations, s. f.-c).

- La energía solar es un recurso energético que se extrae de la luz que emite el Sol, es una fuente de energía inagotable y limpia. Esta se produce capturando la radiación solar a través de paneles fotovoltaicos o paneles térmicos para generar electricidad, calor, luz natural y combustibles. Es una de las energías renovables más abundantes, ya que también puede producirse cuando está el cielo nublado. Además, el coste de los paneles solares ha disminuido considerablemente en los últimos años haciéndolo más accesible y eficiente (González Besa, 2016).

- La energía eólica utiliza el viento para producir electricidad, el cual surge cuando las masas de aire se reorganizan y se mueven para mantener todas las temperaturas y presiones idénticas. Los aerogeneradores transforman la energía cinética captada mediante el viento en energía eléctrica. Esta tecnología ha cambiado mucho en las últimas décadas con turbinas más altas y rotores mayores, lo que ha mejorado su eficiencia. La energía eólica tiene gran potencial global, aunque suelen encontrarse en áreas remotas (López Jimeno, 2002b).
- La energía hidroeléctrica es una fuente de energía renovable que produce electricidad utilizando la energía cinética del agua en movimiento. Esta fuente de energía renovable se puede producir de dos maneras. La primera aprovecha el agua almacenada en embalses artificiales, liberando el agua mediante turbinas que producen electricidad al girar. La segunda no requiere embalses si no que se aprovecha los saltos de agua naturales para producir la energía. Es necesario construir pantanos, presas y turbinas e instalar equipos para producir la energía hidroeléctrica (Irusta, 2017). Existen también varias tecnologías que aprovechan la energía de los océanos, como las corrientes marinas, las olas y las diferencias de temperatura entre las capas de agua (Rivas, 2012).
- La energía geotérmica es una fuente de energía que utiliza el calor acumulado en la Tierra. El calor se encuentra en forma de vapor, agua o rocas calientes y puede ser utilizado en una variedad de aplicaciones para producir electricidad, calefacción directa y refrigeración. Los depósitos geotérmicos son áreas del subsuelo donde el calor natural es lo suficientemente alto como para ser utilizado, este se transmite a través de los materiales. Estos depósitos pueden ser hidrotermales, compuestos de forma natural o sistemas geotérmicos mejorados (EGS) que requieren estimulación hidráulica para obtener agua caliente o vapor a gran profundidad (MUNDIAL, 2017).

Las fuentes de energía renovables tienen numerosas ventajas. En primer lugar, el uso de estas energías supone numerosos beneficios ambientales que contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la contaminación del aire. Estas energías generan cantidades mínimas de CO₂, lo que supone una opción de energía muy limpia. En segundo lugar, el uso de estas energías puede estimular el desarrollo económico y crear nuevas oportunidades de empleo como la investigación, desarrollo, construcción y

mantenimiento dentro del sector de las energías renovables. Asimismo, se disminuye la dependencia de las importaciones de combustibles fósiles y los países son más autosuficientes y menos vulnerables a las fluctuaciones del mercado mundial de la energía. Por último, el uso de fuentes de energía renovables permite diversificar los recursos y no depender de un solo tipo de energía. En resumen, estas fuentes de energía renovable son accesibles, limpias, prácticamente inagotables y tienen numerosos beneficios para la sociedad (Maradin, 2021).

2.4.El hidrógeno verde como nueva fuente energética

2.4.1. Características

El hidrógeno verde es un elemento esencial en el proceso de descarbonización y transición energética (Fell et al., 2023). Este no es una fuente de energía principal sino un vector energético, es decir, un producto que requiere energía para ser obtenido y tiene la capacidad de almacenarla para luego liberarla gradualmente cuando sea necesario (Quiñonez, 2023).

A medida que avanzamos hacia la descarbonización de nuestro sistema energético, la electrificación emerge como una alternativa clave a los combustibles tradicionales. No obstante, hay sectores donde la electrificación no es posible, por lo que el hidrógeno renovable se presenta como una solución viable. El hidrógeno verde se perfila como una fuente energética emergente de gran importancia, destinada a jugar un papel crucial en el panorama energético del futuro (Gobierno de España, 2020).

El hidrógeno se obtiene mediante fuentes de energías sostenibles como la energía solar, eólica o nuclear a través de la electrólisis del agua, o a partir de gas natural mediante la implementación de infraestructuras para la captura y secuestro de carbono. El hidrógeno verde, es un combustible universal, ligero y muy reactivo que no emite CO₂ en su producción (Berry y Aceves, 2006). En el proceso de electrólisis se separa el H₂O en hidrógeno y oxígeno gracias a la electricidad (Santaolalla, 2021). Existen varios tipos de hidrógeno dependiendo de la forma en la que se obtienen y las emisiones generadas en el proceso, los más usados son el gris, azul y verde.

- Hidrógeno gris: se obtiene a través del gas natural e hidrocarburos ligeros como metano o gases licuados de petróleo. Mediante un proceso de vapor reformado el

gas se calienta a altas temperaturas y se combina con el vapor de agua para producir hidrógeno y dióxido de carbono (Enríquez, 2023). Este proceso genera cantidades altas de CO₂ que son contaminantes y resultan en una huella de carbono mayor. En la actualidad, representa el 99% del consumo de hidrógeno en España, debido a que su coste es menor que otras formas de hidrógeno (Gobierno de España, 2020).

- Hidrógeno azul: se obtiene de manera similar al hidrógeno gris mediante gas natural, pero se utilizan técnicas de captura y almacenamiento de CO₂, mediante tecnologías de CCUS, de esta manera se reduce el daño producido en la atmósfera (Gobierno de España, 2020).
- Hidrógeno verde o renovable, es producido mediante la electrólisis utilizando agua como materia prima. El hidrógeno verde se obtiene de fuentes de energía renovables por lo tanto no se producen emisiones de CO₂ en su proceso (Gobierno de España, 2020).

Figura 2: Los colores del hidrógeno



Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD)

2.4.2. Ventajas del hidrógeno verde

El creciente interés por el hidrógeno verde es debido a los numerosos beneficios que supone. En primer lugar, es una solución con bajas emisiones de CO₂, contribuye al cambio climático y puede ayudar a alcanzar los objetivos de descarbonización para alcanzar una economía neutra en carbono. Por otro lado, el coste de la electricidad renovable y de la producción de hidrógeno verde ha disminuido debido a la bajada de los precios de las energías renovables lo que hace su producción más accesible (Santoro et

al., 2022). Además, las tecnologías usadas durante el proceso son escalables por lo que los costes disminuirán según aumenten la cantidad de hidrógeno producido.

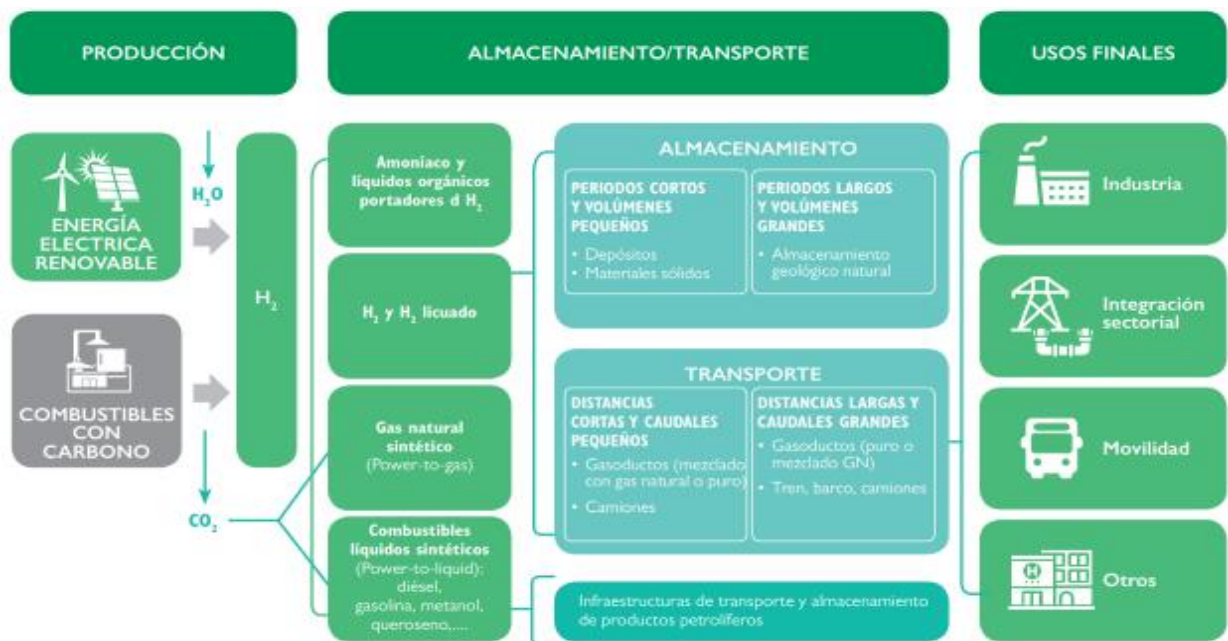
Por otro lado, el hidrógeno verde tiene un amplio abanico de aplicaciones en diversos sectores, que podría ayudar a reducir los costes y estimular la demanda. Otra de las aplicaciones es el almacenamiento de energía, ya que cuando hay un exceso de energía disponible, se puede producir hidrógeno y luego almacenarlo para su uso posterior (Gorji, 2023).

Finalmente, el hidrógeno verde tiene el potencial de generar oportunidades económicas mediante la creación de un nuevo mercado, lo que a su vez impulsa la creación de empleo a nivel global. Además, promovería la diversificación de las fuentes de energía en distintos países, disminuyendo así la dependencia de los combustibles fósiles.

2.5. Cadena de valor del hidrógeno verde

El hidrógeno verde es una de las alternativas para alcanzar un futuro más sostenible. La producción, el almacenamiento, la distribución y los usos del hidrógeno son etapas fundamentales en la cadena de valor (García-Navarro et al., 2023).

Figura 3. Etapas de la cadena de valor del hidrógeno verde



Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD)

2.5.1. Producción del hidrógeno verde

Para obtener el hidrógeno verde la materia prima usada es la electricidad renovable, se utiliza la electrólisis, un proceso que separa las moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno utilizando electricidad a través de dos electrodos. La electrólisis es un procedimiento se lleva a cabo en dispositivos conocidos como electrolizadores, que se clasifican en varios tipos según la tecnología que emplean y sus características específicas (Kumar y Lim, 2022):

- **Electrolizadores Alcalinos:** Los iones se transportan en una solución alcalina, generalmente hidróxido de potasio. Son los más populares debido a su rentabilidad y desarrollo tecnológico, aunque producen hidrógeno a baja densidad de corriente. Debido a la posible difusión de gases a través del diafragma, su capacidad de producción se limita entre el 20% y el 100% de su capacidad nominal (Gobierno de España, 2020).
- **Electrolizadores de Membrana de Intercambio de Protones (PEM):** el medio conductor es un polímero sólido, lo que reduce la corrosión en el sistema. Por otro lado, este electrolizador requiere el uso de metales preciosos lo que causa un incremento de los costes. Los PEM pueden operar a densidades de corriente más altas y adaptarse mejor a las variaciones de la energía renovable (Gobierno de España, 2020).
- **Electrolizadores de Membrana de Intercambio de Aniones (AEM):** Funcionan de manera similar a los alcalinos, pero usan una membrana de intercambio aniónico, lo que reduce los costes al no necesitar metales preciosos. Aunque es más económico y estable para producir hidrógeno con esta tecnología, aún se encuentra en fases de desarrollo (Gobierno de España, 2020).
- **Electrolizadores de Óxido Sólido (SOEC):** Utilizan un electrolito cerámico que les permite operar de manera muy eficiente energéticamente a altas temperaturas (más de 700°C). Aunque están menos desarrollados que los otros tipos, pueden convertir el hidrógeno de vuelta en electricidad, ofreciendo un equilibrio potencial a la red eléctrica (Gobierno de España, 2020).

Los consumidores pueden acceder al hidrógeno verde a través de las estaciones de repostaje de hidrógeno (ERH) que pueden ser centralizadas (hidrolineras) o descentralizadas (hidrogeneras). La producción centralizada implica la producción y compresión en tanques de alta presión que luego es transportado hasta las estaciones en un camión. Esta producción permite generar más hidrógeno que los electrolizadores integrados en estaciones. Por otro lado, la producción descentralizada es capaz de producir el hidrógeno in situ en las estaciones mediante electrolizadores y con energía renovable obtenida gracias a paneles solares o turbinas eólicas instaladas, los costes de transporte asociados (Cossent et al., 2023).

La selección de la ubicación de la producción de hidrógeno renovable es un proceso complejo que involucra múltiples factores cruciales, como la extensión del terreno, el impacto ambiental, la disponibilidad de recursos renovables, la infraestructura existente, el acceso al agua, la gestión del uso del suelo, la cercanía a vías de comunicación y consideraciones sociales (Cossent et al., 2023).

En primer lugar, es importante escoger terrenos de gran extensión y con bajo impacto ambiental, considerando factores como la orografía o el impacto en la flora y fauna local. En segundo lugar, la disponibilidad de fuentes de energía renovables determina la eficiencia en la producción de hidrógeno. La energía solar presenta una distribución más uniforme y predecible, en cambio otras fuentes como la energía eólica tiende a estar concentrada lejos de los centros industriales (Cossent et al., 2023).

Asimismo, resulta estratégico aprovechar los gaseoductos existentes o desarrollar nuevas infraestructuras para el transporte de hidrógeno cerca de la red de gas natural existente para una mayor efectividad. Es esencial establecer la producción en la proximidad de redes eléctricas y carreteras, que aseguran la eficacia logística, y la selección de fuentes de agua adecuadas para la electrólisis. Por último, se deben considerar aspectos sociales como la generación de empleo y el impacto que pueda tener en las comunidades locales (Cossent et al., 2023).

2.5.2. Transporte y distribución del hidrógeno verde

El transporte y la distribución del hidrógeno verde son cruciales en su cadena de valor y están influenciados por varios factores como la escala de producción, la demanda regional, la distancia entre la planta de producción y los puntos de consumo, así como la

compatibilidad con los usos finales en diferentes industrias (Tashie-Lewis y Nnabuife, 2021). Además, la logística del hidrógeno verde debe amoldarse a las necesidades de la infraestructura existente y las propiedades del entorno, permitiendo su transporte en formas líquidas o gaseosas.

Por un lado, el amoniaco y los Líquidos Orgánicos Portadores de Hidrógeno (LOHC), tales como el metilciclohexano o el N-etilcarbazol, se usan como portadores líquidos, aprovechando la infraestructura actual. El amoniaco, en particular, destaca por su ausencia de carbono y una red de distribución ya establecida. No obstante, aunque el hidrógeno líquido es una solución efectiva para almacenar grandes cantidades, se deben considerar alternativas más eficientes energéticamente para el almacenamiento a largo plazo. Por otro lado, aunque el transporte y almacenamiento del hidrógeno gaseoso a gran escala puede ser costoso, se puede comprimir para facilitar este proceso. Los gasoductos o hidroductos son opciones viables para su transporte, aunque la separación posterior de gases puede resultar complicada (Gobierno de España, 2020).

El modo de transporte del hidrógeno verde sea líquido o gaseoso, depende de la distancia y el volumen que hay que trasladar. Puede realizarse por carretera mediante camiones cisterna, por ferrocarril y por transporte marítimo en buques que permiten trasladar grandes volúmenes. Además, los gaseoductos facilitan el transporte de hidrógeno gaseoso o amoniaco, aunque requieren gran inversión y dependen del aumento en la demanda (Gobierno de España, 2020).

Finalmente, es necesario gestionar los excesos de hidrógeno mediante su almacenamiento hasta que son transportados para ser utilizados. Para almacenamientos menores y de corta duración, se emplean tanques de alta presión fabricados con materiales resistentes como el acero, que son adecuados para albergar hidrógeno gaseoso. Sin embargo, la limitación de volumen de estos contenedores está impulsando la investigación hacia tanques subterráneos con mayores capacidades. Alternativamente, los materiales sólidos que forman hidruros metálicos o químicos permiten almacenar cantidades considerables de hidrógeno, aunque se debe considerar su peso. Para el almacenamiento a largo plazo, se están estudiando opciones geológicas como acuíferos o cavernas salinas, que podrían proporcionar soluciones de almacenamiento (Gobierno de España, 2020). El almacenamiento de hidrógeno se realiza en tanques a altas presiones entre 350 y 700 bar, a mayor presión, mayor cantidad de hidrógeno se puede almacenar (Cossent et al., 2023).

2.5.3. Usos del hidrógeno verde

La última etapa de la cadena de valor del hidrógeno verde comprende sus diversos usos, ya sea como producto final o como componente en la producción de otros elementos.

En el sector de la movilidad, el hidrógeno verde emerge como una alternativa prometedora para reducir el impacto ambiental. Se utiliza como combustible para descarbonizar el transporte, sobre todo el aéreo, el transporte marítimo, ferroviario y terrestre de mercancías pesadas. Esta aplicación permite reemplazar los combustibles fósiles convencionales, disminuyendo así la emisión de gases de efecto invernadero (Hidrógeno Renovable (Verde) - ¿Qué Es y Qué Usos Tiene? | Repsol, 2024).

En la industria, el hidrógeno verde tiene un papel importante, particularmente en sectores como la química, la refinería y la metalurgia, ayudando a reducir la huella de carbono en las mismas. Se usa como materia prima en la fabricación de productos como el amoníaco o fertilizantes, reemplazando las fuentes de energía renovables que resultan muy contaminantes (Hidrógeno Renovable (Verde) - ¿Qué Es y Qué Usos Tiene? | Repsol, 2024).

El hidrógeno verde es crucial para el almacenamiento de energías renovables, ofreciendo una solución para almacenar a largo plazo y en volúmenes considerables. Este uso resulta muy valioso para gestionar la variabilidad en la producción de fuentes de energía renovable y garantizar un suministro constante a lo largo del año (Hidrógeno Renovable (Verde) - ¿Qué Es y Qué Usos Tiene? | Repsol, 2024).

Por último, en el ámbito del calentamiento de edificios, el hidrógeno verde puede usarse para generar electricidad y calefacción, ofreciendo una alternativa sostenible al gas natural y otros combustibles fósiles. El hidrógeno puede alcanzar ciertas temperaturas, para calentar hogares de manera sostenible (Hidrógeno Renovable (Verde) - ¿Qué Es y Qué Usos Tiene? | Repsol, 2024).

2.5.4. Barreras en la cadena de valor

La estrategia para combatir el cambio climático y avanzar hacia una economía baja en carbono requiere la implementación del hidrógeno verde como fuente de energía renovable y limpia. Sin embargo, su adopción en el corto plazo enfrenta desafíos debido

a una serie de barreras en su cadena de valor, siendo crucial comprender y analizar estas dificultades para buscar soluciones eficientes que nos permitan avanzar hacia un futuro más sostenible (IRENA, 2021).

Un reto importante es la falta de infraestructuras adecuadas para el transporte y almacenamiento del hidrógeno verde, ya que supone una gran inversión o adaptación de infraestructuras existentes. Además, los costes de producción son muy superiores comparados con las energías obtenidas mediante combustibles fósiles. Otro desafío considerable es la ineficiencia energética ya que se pierde una gran cantidad de energía a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno verde, como en la producción, electrolisis, almacenamiento y transporte entre otros. Es necesario hacer frente a estas pérdidas para mejorar su eficiencia global y satisfacer la demanda. Por último, la ausencia de un mercado establecido para el hidrógeno verde y la incertidumbre en la evolución futura de los precios de hidrógeno renovable supone una importante barrera (IRENA, 2021).

A continuación, se desglosan las barreras existentes en las etapas de la cadena de valor del hidrógeno verde y se proponen estrategias políticas para superar estos obstáculos.

Figura 4. Barreras en la cadena de valor y sus respectivas políticas



Fuente: Elaboración propia basado en ResearchGate

2.6. Barreras e hitos regulatorios

La adopción del hidrógeno verde como fuente de energía alternativa y su integración en una economía baja en carbono se enfrenta a diversos obstáculos normativos que requieren soluciones concretas para establecer un marco jurídico adecuado.

En primer lugar, las barreras regulatorias afectan a la trazabilidad y certificación del hidrógeno renovable, siendo necesario garantizar que se produzca únicamente con energía renovable. Para esto, es necesario desarrollar un marco normativo que establezca estándares uniformes para la certificación y el comercio, incluyendo las garantías de origen (GdO5) que proporcionan información transparente para garantizar que el hidrógeno verde ha seguido un proceso 100% sostenible (La electrificación indirecta con hidrógeno renovable, 2020).

En segundo lugar, actualmente la producción de hidrógeno se clasifica como actividad industrial, sujeta a numerosas evaluaciones de impacto ambiental y otras barreras regulatorias. Para fomentar la producción de hidrógeno verde, se sugiere redefinir esta clasificación, diferenciando el hidrógeno generado por procesos industriales del producido por métodos cuyo impacto en el medioambiente es mucho menor. Además, es crucial promover normativas que faciliten la creación de infraestructuras y estándares necesarios para la producción, almacenamiento y suministro, considerando la proximidad entre estos y la integración con infraestructuras existentes (Gobierno de España, 2020).

En tercer lugar, los elevados costes de producción del hidrógeno renovable constituyen una gran barrera para su competitividad. Es necesario abordar la falta de incentivos regulatorios y subsidios que favorezcan al hidrógeno verde frente a otras fuentes de energía más baratas y menos sostenibles (Gobierno de España, 2020). Además, debido a los riesgos medioambientales y de seguridad del hidrógeno verde, se requiere una normativa o regulación estricta, adaptada a sus propiedades y usos únicos (Scheibe y Poudineh, 2023).

Por último, la integración del hidrógeno verde con las fuentes de energía existentes también representa un desafío, dado que las regulaciones actuales no están adaptadas para favorecer su integración como vector energético emergente. La creación de un entorno normativo es fundamental para llevar a cabo esta integración.

Para superar estos obstáculos, los hitos normativos deben incluir la aplicación de nuevas leyes, la revocación de las antiguas y el inicio de iniciativas de asistencia. Los hitos son acontecimientos significativos que suponen ajustes en la política energética y avances hacia la eliminación de barreras y la creación de un camino para la integración del hidrógeno verde en la matriz energética.

Figura 5: Hitos regulatorios en Europa



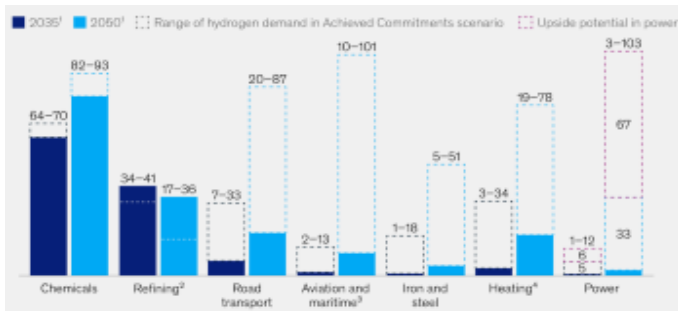
Fuente: Elaboración propia basado en el Informe de la Cátedra de Hidrógeno Verde

2.7. Dinámicas de oferta y demanda

El hidrógeno desarrolla un papel importante en la transición energética, especialmente en industrias donde la transición de los combustibles fósiles a soluciones basadas en la electricidad no es factible ni económica. La ausencia de un mercado establecido para el hidrógeno verde genera incertidumbre con respecto a la oferta, la demanda y los precios (Antoranz, 2021). No obstante, se anticipa que las iniciativas globales de descarbonización y las mejoras tecnológicas generen un crecimiento en la oferta y la demanda del hidrógeno verde (Gulli et al., 2024).

Se espera que tanto la demanda del hidrógeno verde, tanto directa como indirecta aumente, con proyecciones entre el 12% y el 20% de la demanda total de energía prevista para 2050 (La Demanda Mundial de Hidrógeno No Despegará Hasta 2035, 2022). Según un informe publicado por la asociación de gestores de redes de transporte, se prevé que la industria del amoníaco sea la principal fuente de demanda de hidrógeno verde en 2030, seguida de la demanda para generar calor en procesos industriales y fabricar acero (Carpenter, 2022).

Figura 6: Demanda de hidrógeno global por sector

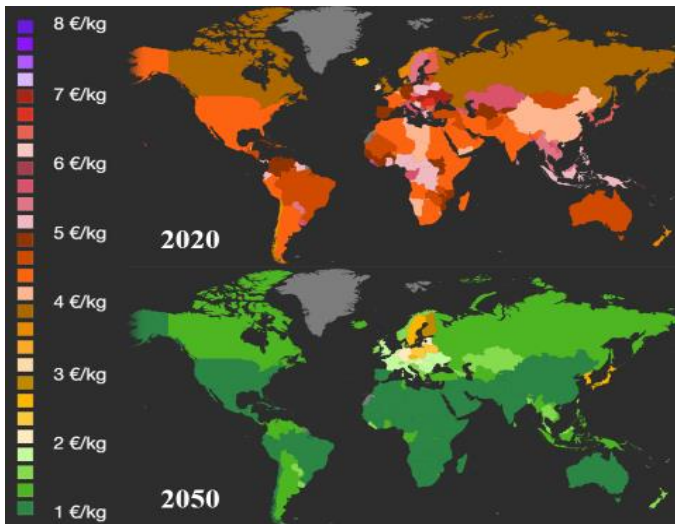


Fuente: Mckinsey & Company 2024

Por otro lado, las estaciones de repostaje de hidrógeno presentan grandes economías de escala, a mayor demanda de hidrógeno, menor será el coste por kilogramo suministrado. Existe una gran interdependencia ya que no hay estaciones porque no hay suficientes vehículos de hidrógeno y no hay vehículos de hidrógeno porque no hay suficientes estaciones donde abastecerse (Cossent et al., 2023).

En términos económicos, se proyecta que los costes de producción y distribución del hidrógeno verde se reducirán en aproximadamente un 50% hacia 2030. La tendencia de disminución de precios continuará hasta 2050 debido a las economías de escala, posicionando el precio del hidrógeno verde entre 1 y 1,5 euros. Sin embargo, es probable que las regiones con recursos renovables limitados o restricciones de espacio posiblemente necesiten importar hidrógeno verde para satisfacer sus necesidades (PricewaterhouseCoopers, s. f.).

Figura 7: Evolución coste del hidrógeno verde



Fuente: Price Waterhouse coopers

Finalmente, el hidrógeno verde desempeña un papel esencial en el equilibrio entre oferta y demanda en los sistemas de energías renovables, gracias a su capacidad para almacenar en el largo plazo la energía generada mediante electrólisis. Esta capacidad es esencial para gestionar la variabilidad de producción diaria y estacional, proporcionando una fuente constante de energía para satisfacer los picos de demanda y alcanzar una estabilidad energética sostenible de aquí al 2050 (Antoranz, 2021).

2.8. Mercado y precios de hidrógeno verde

Establecer un mercado sólido para el hidrógeno verde es crítico para la transición hacia una economía baja en carbono, especialmente en sectores donde las opciones de descarbonización son limitadas. En la actualidad, la creación de un mercado estructurado y funcional para el hidrógeno verde sigue siendo una iniciativa complicada, ya que continúa siendo una cadena de suministro. Para transitar de ser una cadena de suministro a un mercado establecido han de cumplirse las siguientes características:

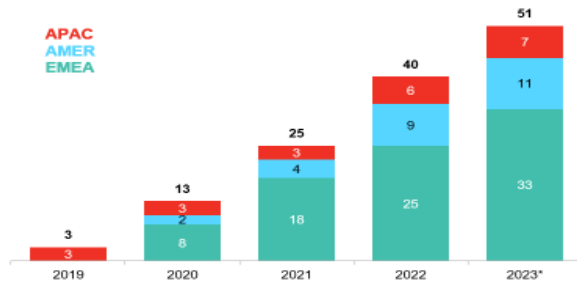
Figura 8: Comparativa cadena de suministro VS mercado

Característica	Cadena de suministro	Mercado
Contratos y relaciones	A largo plazo	A corto y a largo plazo
Confianza	En la contrapartida	En el operador ("exchange")
Número de participantes	Escaso	Alto
Transparencia	Baja	Alta y Price Discovery
Ajuste de precios	Desajuste entre oferta y demanda	Se ajustan a la oferta y demanda

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el número de países que han publicado estrategias específicas para el hidrógeno verde ha crecido exponencialmente, pasando de tres países en 2019 a 51 países con estrategias en la actualidad. Es decir, se ha observado un aumento dramático del 1600% en el número de naciones involucradas en esta iniciativa. Este incremento refleja un interés creciente y compromiso en auge por consolidar mercados de hidrógeno verde a nivel mundial.

Figura 9: Evolución del número de mercados con estrategias de hidrógeno verde



Fuente: S&P Global

A pesar del progreso en el desarrollo del mercado del hidrógeno verde, un desafío clave sigue siendo la ausencia de un mecanismo transparente de fijación de precios. Los precios actuales del hidrógeno renovable se basan en estimaciones de los costes de capital y operativos, que varían según el proyecto y su ubicación. Estas estimaciones son fundamentales para generar señales de precios, como lo hace Platts Global S&P para su referencia "Carbon Neutral Hydrogen" (CNH). Para que el hidrógeno renovable sea competitivo, es esencial desarrollar una estructura de precios transparente que refleje las reales condiciones de oferta y demanda.

En definitiva, el mercado del hidrógeno verde se encuentra en fases iniciales ya que aún se considera una cadena de suministro. La proliferación de estrategias de hidrógeno por parte de distintos países es una clara señal del progreso hacia un mercado maduro y establecido. Un objetivo prioritario de futuros análisis consistirá en establecer métodos precisos para determinar estos precios, lo que podría incluir la comparación con el coste de energías alternativas ya en el mercado.

2.9. Factores que influyen en los precios del gas natural, petróleo e hidrógeno verde

Para establecer un mercado eficiente para el hidrógeno renovable, es fundamental comprender su formación de precios, considerando aspectos como la oferta y demanda, los costes de producción y distribución, y las políticas gubernamentales. Un análisis detallado del precio del hidrógeno verde es crucial para evaluar su competitividad y orientar a los inversores. En el contexto de la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles, el hidrógeno verde tiene el potencial de reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y de carbono. Sin embargo, su adopción depende de varios factores, incluyendo la dinámica de precios en el mercado energético

global. Por lo tanto, para analizar la viabilidad del hidrógeno verde y evaluar su posición en el mercado energético es crucial examinar los factores que afectan los precios del gas natural, el petróleo e hidrógeno verde.

En primer lugar, los precios del gas natural influyen en las políticas energéticas y ambientales, y su fluctuación afecta la transición a energías más limpias. Factores como el equilibrio oferta-demanda, los costes de infraestructura y transporte, y factores geopolíticos son determinantes en su precio. Por ejemplo, conflictos bélicos afectan el precio del gas al interrumpir su suministro, como ocurrió con el cierre del gasoducto Nord Stream 1 por Rusia en 2022, elevando los precios debido a la reducción de suministro y la incertidumbre en el mercado (Cuesta et al., 2022). Grandes exportadores como Rusia, Qatar y Australia impactan significativamente en el mercado global del gas (Adm_Eleiaweb, 2024).

Asimismo, las políticas gubernamentales, como regulaciones ambientales e impuestos al carbono, impactan los costes de producción del gas natural y, por ende, su precio al consumidor (Factores del Precio del Gas Natural, s. f.). El gas natural desempeña un papel importante en la generación de electricidad, por lo que cualquier cambio puede tener un impacto directo en los costes de producción afectando a su precio (Chuliá et al., 2024).

En segundo lugar, los precios del petróleo son influenciados por la oferta y demanda globales, la producción de la OPEP (La organización de Países exportadores de Petróleo) y de Estados Unidos, además de factores como conflictos y desastres naturales. Las decisiones de la OPEP, políticas ambientales, la especulación financiera y la transición hacia energías renovables afectan la demanda y precio a largo plazo (¿Qué Influye Sobre el Precio del Petróleo? | Plus500, s. f.).

Por último, los precios del hidrógeno verde están determinados por factores como el precio de la electricidad renovable usada en la electrólisis, la eficiencia de los electrolizadores, y las economías de escala que pueden reducir significativamente los costes. Además, la demanda creciente del hidrógeno para diversas aplicaciones impulsa la inversión en su producción y distribución, lo que también produce economías de escala. El almacenamiento y transporte del hidrógeno, que requieren infraestructura especializada, también contribuyen al aumento de los costes. Por otro lado, ciertas políticas gubernamentales como incentivos fiscales o regulaciones ambientales pueden fomentar el uso de hidrógeno verde y afectar su competitividad de precios (Mike, 2024).

3. Metodología del estudio

3.1. Selección y recopilación de datos

La selección y recopilación de los datos son etapas fundamentales ya que los datos son la base del conocimiento. La calidad de estos determina la veracidad y el valor del estudio. Por lo tanto, es crucial seleccionar fuentes de datos relevantes, reconocidas y de calidad. En este análisis las dos fuentes usadas son FactSet y S&P Global, que son plataformas que ofrecen información y datos financieros de actualidad y fiables. Hemos usado estas dos plataformas para recopilar seis bases de datos diferentes, correspondientes al gas natural, petróleo e hidrógeno verde, tanto en Europa como en Estados Unidos.

Factset es una plataforma que ofrece datos y análisis financieros informatizados. Combina datos sobre mercados internacionales, negocios abiertos y cerrados, y carteras de renta variable y renta fija (Chen, 2023). Esta fuente de datos ha sido usada para obtener los precios de contratos futuros a un mes de los combustibles fósiles (el gas natural y el petróleo), tanto de Europa como de Estados Unidos. La elección de commodities de Estados Unidos y de Europa sirve para comprender el mercado energético en continentes diferentes. En primer lugar, para el gas natural europeo usaremos como referencia el *Dutch TTF* y para los precios de gas natural de Estados Unidos usaremos el *Henry Hub Natural Gas*. Por otro lado, para el petróleo europeo usaremos como referencia el *Brent Crude Oil* y para Estados Unidos el *Crude Oil WTI*.

Por otro lado, S&P Global es una fuente de información y precios de referencia para los mercados de materias primas y energía. Esta plataforma realiza unas estimaciones de los precios del hidrógeno renovable, debido a la escasez de referencias de precios. Las aproximaciones realizadas por S&P Global está basada en los costes de producción, la demanda no está representada en estos precios por lo que solo representan una parte del mercado. Las estimaciones realizadas son las referencias de precios más fiables para el hidrógeno verde hasta el momento. En el análisis hemos usado las estimaciones obtenidas del paquete “Energy Transition” de S&P Global, para los precios de Estados Unidos *Carbon Neutral Hydrogen Ex Works US Gulf Coast (HYUSB00)* como para los precios de Europa *Carbon Neutral Hydrogen Ex Works NW Europe (HYNWB00)*, que nos van a permitir realizar un modelo para evaluar si alguno de los dos combustibles fósiles puede usarse para replicar los precios del hidrógeno verde.

3.2. Variables e indicadores clave del estudio

En este estudio analizamos la evolución a lo largo del tiempo de los precios diarios del gas natural, el petróleo y el hidrógeno verde. Las fechas muestran la evolución diaria de precios, permitiendo observar las fluctuaciones, patrones y tendencias del mercado energético. La muestra seleccionada es de datos diarios y cubre el periodo entre 09/12/2021 y 15/03/2024, siendo la fecha de inicio la primera estimación disponible para los datos del hidrógeno renovable realizada por S&P Global.

Por otra parte, los precios diarios del gas natural, petróleo e hidrógeno verde son la variable cuantitativa del estudio, los precios varían continuamente ya que son influenciados por factores externos. En cuanto a los precios del hidrógeno verde, como he mencionado antes, no reflejan la demanda, reflejan únicamente los costes de producción. Los precios del hidrógeno renovable son una aproximación realizada, esto habrá que tenerlo en cuenta en el estudio.

Los precios del gas natural y petróleo son contratos futuros a un mes, es decir es un acuerdo legal para comprar o vender un bien o activo a un precio predeterminado en un momento futuro (Jarrow y Oldfield, 1981). Los precios escogidos son el “settlement price”, el cual se utiliza para describir el precio al que cierra un activo o al que se diferenciará un contrato de derivados cuando venza. En la siguiente tabla mostramos las variables usadas en el estudio de manera más detallada.

Figura 10: Variables del estudio

Variable	Descripción	Unidad de Medida	Región	Variable en Python
Fecha	Fecha de registro del precio.	DD/MM/AAAA	Global	Date
Precio del Hidrógeno Verde Europeo	Precio del hidrógeno renovable en el mercado europeo.	€/MMBtu	Europa	HyEU
Precio del Hidrógeno Verde de EE. UU.	Precio del hidrógeno renovable en el mercado estadounidense.	\$/MMBtu	Estados Unidos	HyUS
Precio del Dutch TTF	Precio del gas natural en el mercado TTF (Title Transfer Facility) holandés.	€/MWh	Europa	NGEU
Precio del Henry Hub	Precio del gas natural en el punto de referencia Henry Hub.	\$/MWh	Estados Unidos	NGUS
Precio del Brent Crude Oil	Precio del petróleo Brent, un punto de referencia internacional.	€/Bbl	Europa	CruEU
Precio del Crude Oil WTI	Precio del petróleo crudo West Texas Intermediate, un punto de referencia en EE. UU.	\$/Bbl	Estados Unidos	CruUS

Fuente: Elaboración propia

Las unidades de medida usadas dependen de la variable, usaremos MMBtu para el hidrógeno verde, MWh para el gas natural y Bbl para el petróleo. Dependiendo de si la medida se usa para Europa o para EE. UU estará medida en euros o en dólares respectivamente.

- MMBtu o “million british thermal units” a veces sirve como unidad térmica de medida del gas natural, en este caso el hidrógeno verde se mide en MMBtu. Es una unidad de medida estándar en el sector de la energía para facilitar la comparación con otros combustibles fósiles (Natural Gas Intelligence, 2022).
- MWh o megavatio, es una medida que equivale a 1 millón de vatios. El vatio es una unidad de medida de potencia eléctrica recogida en el Sistema Internacional de Unidades (Escobar, 2021).
- Bbl o “barrel of crude oil”, es una unidad de volumen para barriles de crudo o petróleo (Barrel - Energy Education, 2020).

Figura 11: Conversión unidades de medida

Conversión
1 MMBtu \cong 0.293 MWh
1 MMBtu \cong 0.1725 bbl

Fuente: Elaboración propia

3.3. Procesamiento y limpieza de datos

El procesamiento y la limpieza de los datos es un paso fundamental en el análisis ya que la calidad de los datos es muy importante para obtener insights de valor. A primera vista los datos aparentan estar en buenas condiciones, considerando que provienen de fuentes fiables y la naturaleza del dataset es relativamente sencilla. No obstante, es imprescindible realizar una comprobación y procesamiento de los datos.

En primer lugar, se empleó Python para realizar una limpieza de datos con el propósito de identificar outliers o valores atípicos en los precios del gas natural, petróleo o hidrógeno verde. Los outliers identificados se conservaron para la visualización, en cambio para los análisis posteriores se eliminaron para mejorar la precisión.

En segundo lugar, se realizó una comprobación de las fechas para homogeneizarlas y garantizar que las fechas coincidieran entre los diferentes conjuntos de datos. Se llevó a cabo un análisis para armonizar las fechas comunes a todos los DataFrames, eliminando las fechas en las que no había datos disponibles para todos los productos analizados.

Como conclusión, el procesamiento y limpieza permite asegurar la fiabilidad y calidad de los datos. La homogeneización de las fechas permitirá analizar correlaciones y patrones consistentes y la preservación de los outliers para la visualización asegura la integridad de los datos.

3.4. Análisis estadísticos

En el estudio se han realizado una serie de análisis estadísticos para determinar la relación entre las series temporales de precios de gas natural, petróleo e hidrógeno renovable, con el objetivo de examinar si los cambios en los precios de los combustibles fósiles pueden predecir o replicar los precios del hidrógeno verde. Es importante mencionar que ciertos análisis requieren que las series sean estacionarias, por lo que los precios han sido diferenciados para realizar el análisis de correlación, análisis de causalidad y modelo de regresión lineal. Para estos análisis las series deben ser estacionarias, y mostrar propiedades constantes a lo largo del tiempo, como la media y la varianza, para mejorar la precisión de las predicciones realizadas.

3.4.1. Correlación de Pearson y mapas de calor

La correlación es una relación entre dos variables numéricas que evalúa la tendencia de los datos. Se dice que dos variables están relacionadas cuando una nos informa sobre otra, es decir, el aumento o la disminución de una variable afecta el comportamiento de la otra variable. En este estudio se ha escogido como medida de correlación el Coeficiente de correlación de Pearson, que tiene como propósito determinar la fuerza o la intensidad de la relación entre dos variables aleatorias cuantitativas con una distribución normal (Restrepo y González, 2007). Su fórmula estadística es la siguiente:

$$\rho = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad -1 \leq \rho \leq 1$$

p: representa el coeficiente de correlación de Pearson.
Cov(x, y): es la covarianza o el grado en que dos variables cambian conjuntamente.
 $\sigma_x \sigma_y$: La desviación estándar mide la cantidad de dispersión de un conjunto de valores.

En la mayoría de los casos, la correlación se puede resumir en un número que oscila entre -1 y 1.

- El valor -1 indica una correlación negativa perfecta.
- El valor 0 indica que no hay correlación.
- El valor 1 indica una correlación positiva perfecta.

Las correlaciones se van a representar de manera visual a través de mapas de calor. Un mapa de calor o heatmap son representaciones gráficas donde los valores se representan mediante colores. Generalmente, se usa unas gamas de colores que van desde colores más cálidos (rojo) a colores más fríos (azul). En el caso de nuestro análisis los colores rojos indican un valor mayor de la correlación (valores más cercanos a 1) y los valores azules menor correlación (valores cercanos a 0).

3.4.2. Análisis de cointegración

El análisis de cointegración es una técnica estadística que permite evaluar las relaciones a largo plazo entre series no estacionarias. El concepto de cointegración surge para comprobar si dos o más variables son espurias o están relacionadas de verdad, es decir que, aunque estadísticamente se visualiza una correlación puede deberse a una mera casualidad. El test de cointegración permite mejorar la robustez de los modelos predictivos, ya que, aunque los precios fluctúen en el corto plazo, se considera el equilibrio a largo plazo entre las series temporales (Granados, 2013).

- P-valor: La hipótesis nula se rechaza con un p-valor bajo (menor que 0.05), lo que sugiere que existe una relación de cointegración entre las series y hay una relación a largo plazo estadísticamente significativa.
- Test score de cointegración: este estadístico determina si existe una relación de equilibrio a largo plazo entre dos series temporales. Un valor más bajo indica que es menos probable que los resultados se deban al azar, lo que indica una relación más fuerte de cointegración entre las series.

3.4.3. Análisis de causalidad de Granger

El análisis de causalidad de Granger nos permite explorar la relación de causa y efecto entre distintas variables, es decir nos informa si los cambios en una variable pueden predecir los cambios en otra. Granger describió el concepto de manera sencilla: “Una variable (serie temporal) A causa a B si las predicciones de B basadas en sus propios valores históricos y los de A son mejores que las predicciones de B basadas solamente en sus propios valores históricos” (Maziarz, 2015).

Es esencial que las series temporales sean estacionarias para realizar el análisis de causalidad. Por ello, mediante el test de Dickey-Fuller Aumentado (ADF), se comprobó que las series eran estacionarias ya que previamente se había aplicado una técnica de diferenciación para estabilizar las propiedades estadísticas a lo largo del tiempo. Por otro lado, el análisis de causalidad de Granger requiere especificar el número de retardos para cada variable del modelo, se determinó el número óptimo utilizando el Criterio de Información de Akaike (AIC).

Las variables clave que se evalúan en una prueba de causalidad son:

- Estadístico F: Mide cuánto mejora un modelo no restringido en predecir los datos comparado con uno restringido. Un valor alto indica que el modelo con la variable adicional ajusta mejor, siendo esta útil para la predicción.
- P-valor: Determina la significancia estadística en pruebas de hipótesis. Un p-valor menor a 0.05 sugiere rechazar la hipótesis nula de que una serie de tiempo A no influye en B; un valor mayor indica lo contrario.

3.4.4. Modelo de regresión lineal simple

El modelo de regresión lineal es una técnica estadística que consiste en generar una ecuación o modelo basándose en la correlación existente entre variables, de manera que se pueda predecir el valor de una en función de la otra. El modelo de regresión lineal trata de explicar la relación que existe entre una variable dependiente y una o más variables independientes o explicativas (Peláez, 2016).

El modelo de regresión lineal sigue esta fórmula:

$$\hat{Y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}X = a + bX$$

Y es la variable dependiente predicha o la respuesta del modelo.

α es el término de intercepción estimado, que representa el valor esperado de Y cuando la variable independiente X es cero.

β es el coeficiente de pendiente estimado, que mide el cambio esperado en Y por una unidad de cambio en X .

X es la variable independiente o predictor del modelo.

El Error Cuadrático Medio (MSE) y el coeficiente de determinación (R^2) son métricas utilizadas en regresión lineal para evaluar el rendimiento del modelo de regresión, cada una de ellas mide aspectos diferentes.

- El MSE mide la diferencia (el error cuadrático medio) entre valores estimados y reales; un MSE menor indica que las predicciones del modelo son más precisas

La fórmula del MSE es la siguiente:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

n : es el número de observaciones.
 y_i : el valor real de la observación.
 \hat{y}_i : el valor previsto para la observación.

- El R^2 establece el grado en que las predicciones de la regresión coinciden con los puntos de datos reales, es decir cuanto del cambio en la variable dependiente predice la regresión, variando de 0 (sin explicación) a 1 (explicación total). La fórmula que representa el R^2 es:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

n : es el número de observaciones.
 y_i : el valor real de la observación.
 \hat{y}_i : el valor previsto para la observación.
 \bar{y} : es la media de los valores reales (y).

4. Resultados

4.1. Análisis exploratorio y estadísticas descriptivas

Se han analizado las estadísticas descriptivas del hidrógeno verde, gas natural y petróleo entre Europa y Estados Unidos para discernir diferencias en precios. Se han evaluado la media, desviación estándar y valores máximos y mínimos de manera comparativa entre ambos lugares. El hidrógeno verde y el gas natural muestran precios significativamente más altos en Europa comparado con Estados Unidos. En cambio, los precios del petróleo son muy similares en ambos continentes, aunque ligeramente mayores en Estados Unidos.

Las diferencias en los precios del gas natural entre ambos continentes pueden atribuirse a varios factores. En Estados Unidos, la abundancia de producción y las nuevas técnicas de extracción han ayudado a mantener los precios más bajo. En cambio, Europa se enfrenta a una situación compleja debido a su alta dependencia de importaciones costosas, exacerbadas por la crisis energética actual y la parada de suministros rusos. Europa depende mucho de las importaciones, en mayor medida del gas natural licuado (GNL) procedente de Estados Unidos, que cuando llega a Europa es aproximadamente cuatro veces más caro (Hernandez, 2022).

En contraste, los precios del petróleo están más alineados globalmente. El crudo Brent actúa como una referencia mundial que ayuda a estabilizar los precios a pesar de factores geopolíticos, determinando aproximadamente el 75% del petróleo mundial (Brent: The World's Crude Benchmark, 2020). La Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) ejerce una influencia similar en Europa y en Estados Unidos, fijando objetivos de producción que tienen un gran impacto en los precios mundiales del petróleo (Oil Prices And Outlook - U.S. Energy Information Administration (EIA), 2023).

4.2. Volatilidad de los precios

Para ofrecer una comprensión más profunda de las dinámicas energéticas, se han elaborado gráficos que detallan y comparan la trayectoria de los precios del gas natural, petróleo e hidrogeno verde en Europa y Estados Unidos. Estas visualizaciones son esenciales no solo para discernir las tendencias predominantes en los mercados energéticos, sino también para apreciar la volatilidad de los precios a lo largo de un período, que abarca desde diciembre de 2021 hasta marzo de 2024.

Figura 12: Evolución de los precios del gas natural e hidrógeno verde en Europa

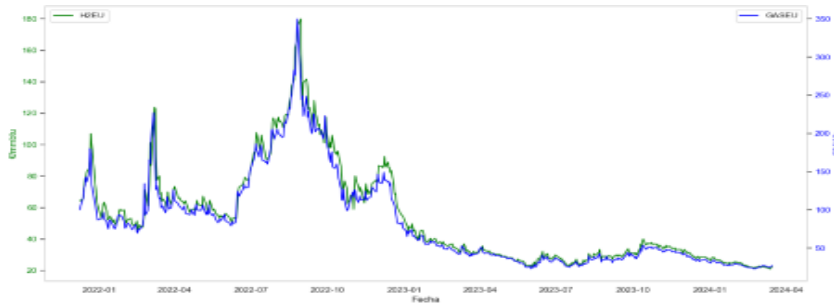


Figura 13: Evolución de los precios del petróleo e hidrógeno verde en Europa

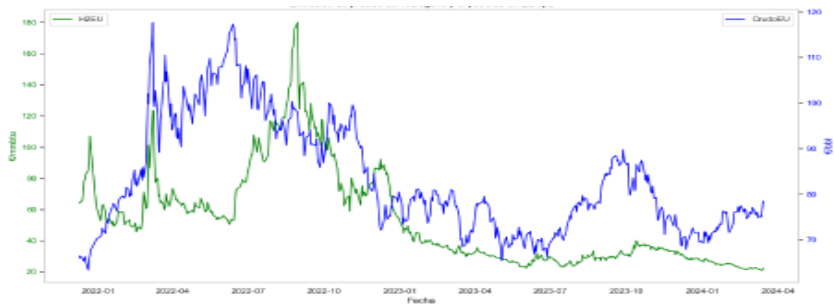


Figura 14: Evolución de los precios del gas natural e hidrógeno verde en Estados Unidos

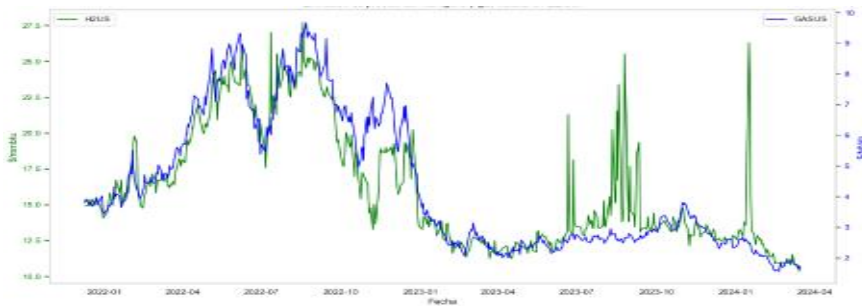
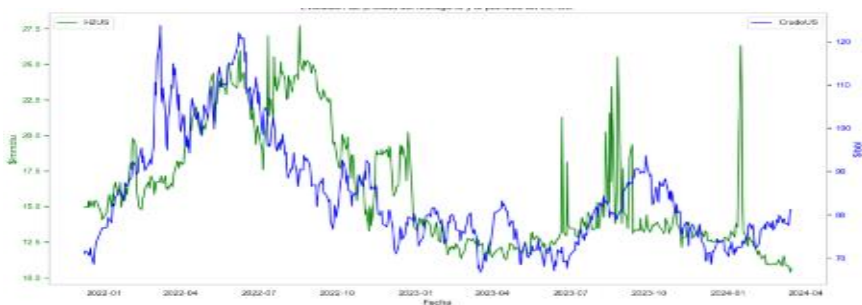


Figura 15: Evolución de los precios del petróleo e hidrógeno verde en Estados Unidos

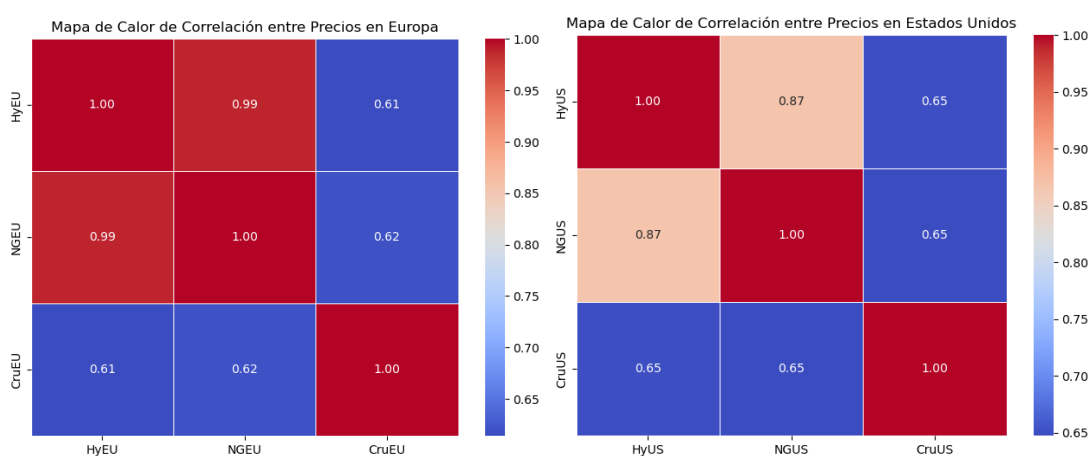


Estas gráficas facilitan la identificación inicial de patrones de comportamiento entre diferentes fuentes energéticas; se puede percibir que el gas natural y el hidrógeno verde tienen tendencias de precios paralelas. Esta observación preliminar se verá respaldada por un análisis cuantitativo detallado para verificar la validez de la hipótesis planteada.

4.3.Exploración de tendencias y correlaciones

En el contexto energético actual es crucial comprender las relaciones entre los distintos vectores o fuentes energéticas: el hidrógeno verde, el gas natural y el petróleo. El propósito principal es detectar correlaciones positivas y significativas entre sus precios para identificar el mejor sustituto del hidrógeno verde. Se han calculado las correlaciones de Pearson tanto para Europa como para Estados Unidos y se ha representado en mapas de calor para facilitar el análisis de resultados.

Figura 16: Mapas de calor de las correlaciones de los vectores energéticos



En el gráfico de la izquierda, las correlaciones de precios diferenciados en Europa muestran una asociación muy fuerte y positiva entre el gas natural (NGEU) y el hidrógeno verde (HyEU). Muestran una correlación de 0.99, lo que significa que cuando el precio de uno aumenta, el del otro también lo hace, y viceversa. La relación del petróleo (CrEU) con el hidrógeno verde es de 0.61 lo que indica una correlación moderada, sugiriendo que los precios están menos relacionados.

En el gráfico de la derecha, las correlaciones de precios en Estados Unidos exhiben un patrón similar al observado en Europa. El gas natural (NGUS) y el hidrógeno verde (HyUS) tienen una correlación muy positiva de 0.87. Por otra parte, el petróleo (CruUS) muestra una correlación de 0.65 con el hidrógeno verde indicando nuevamente una correlación moderada. En conclusión, tanto en Europa como en Estados Unidos, el gas natural y el hidrógeno verde muestran una fuerte correlación, evidenciando su interdependencia en términos de variaciones de precios. Por lo tanto, a partir de ahora se

descartará el petróleo y se continuará el análisis centrándose en el gas natural, ya que parece ser un mejor predictor para los precios del hidrógeno verde.

Es notable observar que las correlaciones entre el gas natural y el hidrógeno verde resultan menores en Estados Unidos respecto a Europa. Esta diferencia puede atribuirse a factores geográficos estratégicos relacionados con la localización de la producción de estas energías. En Europa, la producción está centralizada, ya que Holanda es el punto principal tanto del gas natural como de las instalaciones de producción de hidrógeno renovable. Debido a esta proximidad, cualquier impacto o variación del gas natural puede afectar directamente los costes de producción del hidrógeno verde.

Por otro lado, en Estados Unidos, la infraestructura energética está más dispersa. El Henry Hub está ubicado en Luisiana ya que es el principal punto de distribución de gas natural, mientras que las plantas de producción del hidrógeno verde se encuentran en zonas más dispersas con fácil acceso a fuentes de energía renovables, como Texas y California. Esta distribución más amplia puede ser el motivo de que las correlaciones entre el gas natural y el hidrógeno verde sean menores en Estados Unidos que en Europa.

Como conclusión, podemos establecer que las variaciones en las correlaciones entre Estados Unidos y Europa podrían ser explicadas por la geografía de las infraestructuras energéticas. A pesar de estas diferencias, se observa una correlación muy positiva entre el gas natural y el hidrógeno verde en ambos casos.

4.4. Análisis de cointegración

El análisis de cointegración se ha realizado entre las series temporales del gas natural y el hidrógeno verde en Estados Unidos y en Europa. Este método estadístico sirve para determinar si hay una relación lineal a largo plazo entre dos variables.

Figura 17: Cointegración entre gas natural e hidrógeno verde

Análisis de cointegración entre gas natural e hidrógeno verde Europa

Cointegration test score: -7.187389077863467

P-value: 3.051614627880556e-09

Análisis de cointegración entre gas natural e hidrógeno verde Estados Unidos

Cointegration test score: -4.292442717097032

P-value: 0.002630756802427903

En el caso de Europa, el valor p es un número muy pequeño cercano a 0, esto sugiere que hay que rechazar la hipótesis nula que establece que no existe análisis de cointegración. Por lo tanto, se sostiene con firme evidencia que existe cointegración entre el hidrógeno verde y el gas natural en Europa. Además, el estadístico de la prueba tiene un valor negativo de -7,18, reafirma la cointegración de las series de tiempo, sugiriendo una tendencia estocástica común a lo largo de tiempo.

Respecto a Estados Unidos el valor p de 0.026 también implica el rechazo de la hipótesis nula, afirmando que las series de tiempo del hidrógeno verde y el gas natural están cointegradas. Asimismo, un estadístico de la prueba negativo suele indicar que existe cointegración.

En conclusión, los análisis de cointegración realizados muestran una relación a largo plazo significativa entre los precios del hidrógeno verde y el gas natural tanto en Europa como en los Estados Unidos.

4.5. Análisis de causalidad

Tras realizar el análisis de causalidad de Granger mediante el uso de herramientas de Python, se lograron determinados resultados. En este reporte, solo se presentarán los primeros de cada par de variables analizadas, aunque las conclusiones se han obtenido de manera conjunta considerando todos los retardos. Los aspectos clave a observar son el estadístico F y el p-valor, de manera que si es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula, la cual sostiene que el precio del gas natural no influye en la serie temporal del hidrógeno verde.

Figura 18: Análisis de causalidad Granger en Europa

Resultados para HyEU y NGEU

```
Granger Causality
number of lags (no zero) 1
ssr based F test:          F=135.4936, p=0.0000 , df_denom=428, df_num=1
ssr based chi2 test:      chi2=136.4433, p=0.0000 , df=1
likelihood ratio test:    chi2=118.5391, p=0.0000 , df=1
parameter F test:         F=135.4936, p=0.0000 , df_denom=428, df_num=1
```

En Europa, los análisis revelan una relación significativa entre el hidrógeno verde y el gas natural, donde un alto valor estadístico F sugiere que la inclusión de los precios del gas natural mejora la predicción de los precios del hidrógeno verde. Además, múltiples

retardos muestran valores de p menores a 0.05, indicando que los precios históricos del gas natural pueden pronosticar los precios del hidrógeno verde.

Figura 19: Análisis de causalidad Granger en Estados Unidos

Resultados para HyUS y NGUS

```
Granger Causality
number of lags (no zero) 1
ssr based F test:      F=14.7220 , p=0.0001 , df_denom=428, df_num=1
ssr based chi2 test:  chi2=14.8252 , p=0.0001 , df=1
likelihood ratio test: chi2=14.5759 , p=0.0001 , df=1
parameter F test:     F=14.7220 , p=0.0001 , df_denom=428, df_num=1
```

En el caso de Estados Unidos, aunque el valor de F es más bajo en comparación con Europa, los resultados son igualmente significativos. Los p-valores son considerablemente menores a 0.05, lo que confirma que los precios del gas natural predicen los precios del hidrógeno verde en el mercado estadounidense.

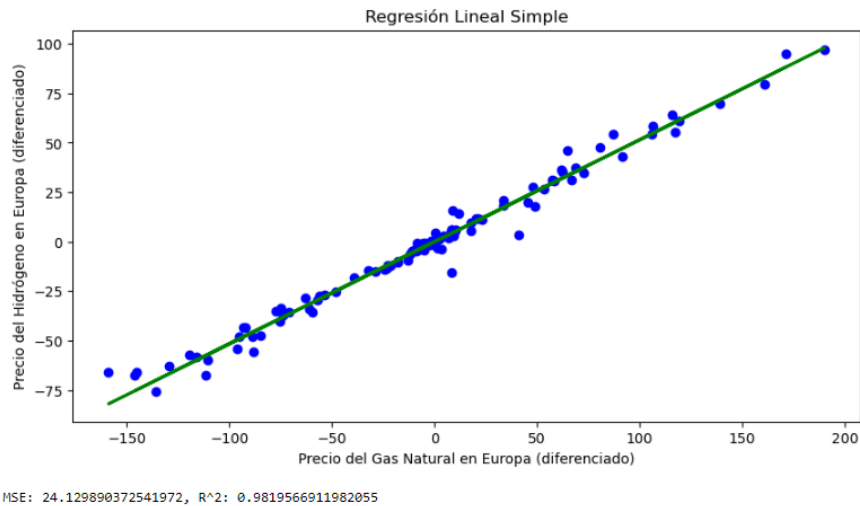
Por lo tanto, se concluye que la causalidad de Granger se cumple tanto en Europa como en Estados Unidos, evidenciando una relación causal en términos de predicción de precios. Los datos históricos del gas natural son un predictor eficaz para los precios del hidrógeno verde en ambos mercados.

4.6. Modelo de regresión lineal simple

Teniendo en cuenta los análisis previos realizados, en los que se han obtenido correlaciones positivas, cointegración y causalidad entre el gas natural y el hidrógeno verde, se ha decidido realizar un modelo de regresión lineal simple entre estas dos variables. Se ha decidido conservar únicamente el gas natural ya que los precios del petróleo tienen una relación menos significativa con el hidrógeno verde que es la variable en la cual se enfoca este análisis.

Debido a la alta relación entre el hidrógeno verde y el gas natural en Europa y en Estados Unidos, se plantea una asociación positiva y lineal. El modelo de regresión lineal va a permitir identificar la relación entre la variable dependiente (hidrógeno verde) y la variable independiente (gas natural), para comprobar si el gas natural tiene un efecto predictor en el hidrógeno verde.

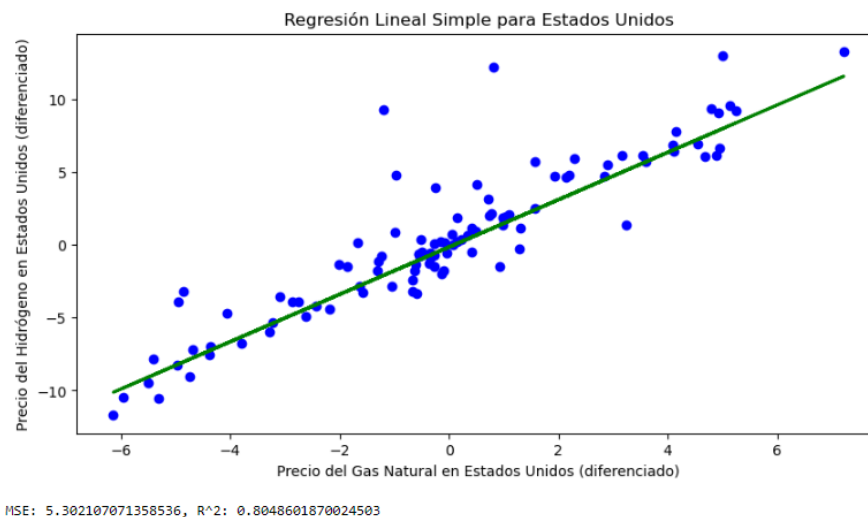
Figura 20: Regresión lineal simple en Europa



- El MSE o error cuadrático medio es de 24.12, que indica la diferencia cuadrática promedio entre los valores reales y estimados. Es preferible un MSE pequeño, aunque en este caso es algo elevado debido a la amplia gama de precios del hidrógeno, con máximos de hasta 179.96.
- El R² o coeficiente de determinación es de 0.98, lo cual indica que el modelo explica el 98% de la variabilidad de los precios del hidrógeno mediante los precios del gas natural. Cuanto más alto es el porcentaje, indica un mayor ajuste del modelo.

La visualización pone en evidencia la robusta relación lineal positiva entre ambas variables, confirmando que los precios del gas natural son un estimador fiable para los del hidrógeno verde en Europa.

Figura 21: Regresión lineal simple en Estados Unidos



- El MSE o error cuadrático medio de 5.3, indica un buen ajuste del modelo de regresión lineal, ya que un MSE bajo es indicativo de una estimación más precisa.
- El R^2 o coeficiente de determinación de 0.80, establece que el modelo es capaz de explicar el 80% de la variación en los precios del hidrógeno verde basándose en los precios del gas natural.

La visualización indica que hay una fuerte relación lineal entre los precios del gas natural y el hidrógeno verde en Estados Unidos, aunque en menor medida que en Europa.

En resumen, el análisis de programación ha permitido evaluar la relación entre los precios del hidrógeno verde y dos fuentes de energía convencionales, el petróleo y el gas natural. Mediante la realización de un análisis de correlación y mapas de calor, se ha identificado una fuerte correlación entre los precios del gas natural y el hidrógeno verde, lo que sugiere que las variaciones en los precios del gas natural pueden ser un buen predictor de los precios del hidrógeno verde. El petróleo se descartó debido a que las correlaciones eran menos evidentes. La robustez de las correlaciones se reforzó con un análisis de cointegración demostrando que existe una relación lineal a largo plazo entre ambos precios. Además, el análisis de causalidad de Granger corroboró que los precios del gas natural tienen una influencia predictiva sobre los precios del hidrógeno verde en Europa y en Estados Unidos. Por último, la implementación de modelos de regresión lineal demostró que los precios del gas natural explican una gran parte de la variabilidad en los precios del hidrógeno verde. Se ha comprobado que existe una dependencia del hidrógeno verde frente al gas natural tanto en Europa como en Estados Unidos, aunque en menor medida.

5. Conclusiones

5.1. Conclusiones generales

La conclusión principal del estudio enfatiza que el gas natural es la mejor opción como sustituto del hidrógeno verde, desempeñando un papel fundamental para establecer un índice de precios del hidrógeno. Este hallazgo es esencial para la creación de un mercado de hidrógeno verde sólido y confiable. Configurar un índice basado en el comportamiento del gas natural proporciona predictibilidad y estabilidad, lo que es fundamental para fomentar la inversión y facilitar la planificación a largo plazo. La estrecha relación entre el hidrógeno verde y el gas natural promueve una transición más fácil y menos arriesgada hacia el hidrógeno verde, particularmente en Europa donde la relación es más evidente.

Desde diversas perspectivas, se puede concluir que el gas natural, además de ser una fuente de energía complementaria, puede replicar las fluctuaciones de los precios del hidrógeno verde. Esta interdependencia entre ambos precios se puede explicar por el proceso de producción del hidrógeno verde, el cual se obtiene mediante la electrólisis del agua que necesita electricidad generada a partir de fuentes renovables. Los costes de la electricidad están influenciados por los precios del gas natural, ya que una parte significativa se produce a partir del gas natural. Por lo tanto, cualquier variación en los precios del gas natural impacta los costes de producción del hidrógeno verde. Las proyecciones de precios de S&P Global para el hidrógeno verde se basan en los costes de producción, por lo que cualquier cambio en los precios del gas natural tiene un impacto en los precios del hidrógeno verde.

Los hallazgos de la investigación demuestran que las correlaciones entre el gas natural y el hidrógeno verde son diferentes en los mercados energéticos de Europa y Estados Unidos. Esta variabilidad regional enfatiza la importancia de adaptar las estrategias y políticas energéticas a cada región, teniendo en cuenta las particularidades de sus respectivos mercados. En Europa, la conexión entre el gas natural y el hidrógeno verde es más evidente y predecible, ya que tanto la producción de gas natural como la de hidrógeno verde se concentran en Holanda. En cambio, en Estados Unidos la conexión es menos evidente, debido a que la producción de gas natural se lleva a cabo en Luisiana y la de hidrógeno verde se realiza principalmente en Texas y California. Esta observación destaca la relevancia de los factores locales y geopolíticos en la determinación de los precios.

Además, cabe destacar que tras analizar las estadísticas descriptivas de los precios se observó que el gas natural y el hidrógeno verde son más caros en Europa que en Estados Unidos. Esta diferencia puede atribuirse a la producción avanzada de gas natural en Estados Unidos y a la dependencia de Europa de importaciones costosas, especialmente de gas natural licuado (GNL). Por otro lado, los precios del petróleo son similares en ambos continentes, gracias a la referencia mundial establecida para el crudo (Brent) y las políticas de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP).

Es importante destacar que la emergente industria del hidrógeno verde puede aprender mucho del crecimiento y la maduración de la industria del gas natural, que consiguió crear un mercado globalmente conectado y una infraestructura de transporte y distribución eficiente. El gas natural evolucionó desde una cadena de suministro con necesidades de capital hasta un mercado maduro y desarrollado, con precios globales establecidos, una diversidad de participantes y negociaciones en mercados estructurados. De manera similar, la transición a un mercado maduro de hidrógeno renovable requerirá superar estos desafíos, aprovechando las experiencias previas del gas natural y ajustando las estrategias a las particularidades del hidrógeno verde. Implementando las estrategias que fueron efectivas en el mercado del gas natural, el mercado de hidrógeno tiene el potencial de convertirse en un entorno comercial dinámico y eficiente. Ciertas prácticas como la estandarización de procesos y la mejora de la logística podrían acelerar la implementación y aceptación del hidrógeno verde en la economía global. Asimismo, el hidrógeno verde podría aprovechar las infraestructuras y redes de gas natural ya existentes para su transporte y así reducir los costes y como consecuencia los precios del hidrógeno verde.

Por último, aunque el mercado del hidrógeno es relativamente nuevo, los resultados del estudio indican que representa el futuro de la energía limpia y sostenible. Con el aumento de la producción, la mejora de las tecnologías de almacenamiento y transporte y el fortalecimiento de las políticas de apoyo, el hidrógeno verde puede escalar y convertirse en un pilar central de la transición energética. Sin embargo, este potencial sólo puede ser alcanzado a través de inversiones significativas, colaboraciones internacionales y un enfoque cohesivo que aborde tanto los desafíos técnicos como los económicos. El hidrógeno verde se presenta como una de las alternativas más prometedoras para cumplir con los objetivos ambientales sin sacrificar las necesidades energéticas de la sociedad actual.

En resumen, la investigación ha demostrado que, a pesar de los retos y dificultades actuales, el hidrógeno verde tiene un gran potencial como fuente de energía limpia y renovable. La correlación con las fuentes de energía existentes, especialmente el gas natural, proporciona un marco para la predicción de precios y facilita la integración del hidrógeno en la infraestructura energética existente. Con el crecimiento de su producción y la optimización de su infraestructura, el hidrógeno verde está posicionado para jugar un rol significativo en el camino hacia una economía sostenible y con bajas emisiones de carbono.

5.2.Limitaciones y futuras líneas de investigación

El estudio sobre el hidrógeno verde se encuentra sujeto a diversas limitaciones que han de ser identificadas para interpretar de la mejor manera posible las conclusiones y orientar posibles investigaciones futuras.

Es crucial destacar la novedad del hidrógeno renovable como vector energético por lo que existe una cantidad limitada de datos históricos disponibles para el análisis. Resulta complicado realizar evaluaciones en el largo plazo que capturen los ciclos económicos completos y las tendencias de mercado ya que los datos están disponibles desde un periodo corto de tiempo y las estimaciones del precio son el único indicador disponible. En consecuencia, es posible que los modelos de análisis de tendencias y correlaciones no tengan una representación completamente precisa del comportamiento del mercado del hidrógeno verde en el futuro. En segundo lugar, resulta importante destacar que el estudio solo abarca la información de Europa y Estados Unidos. Por lo tanto, los resultados del estudio no reflejan las complejidades y especificidades de otros mercados globales.

Por otro lado, existe una limitación importante del estudio comentada previamente con respecto a las estimaciones usadas del precio del hidrógeno verde obtenidas de S&P Global. Estas estimaciones se basan únicamente en los costes de producción, sin reflejar adecuadamente la dinámica de la demanda del mercado. Por lo tanto, las conclusiones establecidas en cuanto a la economía del hidrógeno no representan toda la realidad del mercado, ya que los precios vienen determinados tanto por la oferta como por la demanda.

Al interpretar los resultados y conclusiones de este estudio, se deben tener en cuenta estas restricciones. Por otro lado, como consecuencia de las limitaciones y posibles ampliaciones del estudio emergen diferentes líneas de investigación:

- Realizar un análisis multirregional, incorporando países que no fueron considerados en la investigación previa. Este enfoque resulta atractivo porque facilita una comprensión integral del hidrógeno verde a nivel mundial.
- Realizar un estudio en profundidad la cadena de valor del hidrógeno renovable para evaluar las cifras necesarias de inversión para el hidrógeno en los próximos años y optimizar los costes.
- Evaluar el impacto ambiental y social del hidrógeno verde, incorporando métricas sobre la disminución de emisiones, así como sus ventajas para la sociedad y el medioambiente.
- Proyectar tendencias futuras al integrar datos sobre la demanda de hidrógeno, siempre que existan fundamentos de información robustos. Así, se proporcionará una perspectiva más precisa del mercado del hidrógeno renovable en el sector energético.

6. Declaración de Uso de Herramientas de Inteligencia Artificial Generativa en Trabajos Fin de Grado

ADVERTENCIA: Desde la Universidad consideramos que ChatGPT u otras herramientas similares son herramientas muy útiles en la vida académica, aunque su uso queda siempre bajo la responsabilidad del alumno, puesto que las respuestas que proporciona pueden no ser veraces. En este sentido, NO está permitido su uso en la elaboración del Trabajo fin de Grado para generar código porque estas herramientas no son fiables en esa tarea. Aunque el código funcione, no hay garantías de que metodológicamente sea correcto, y es altamente probable que no lo sea.

Por la presente, yo, Claudia Agullo Lara, estudiante de E2 Analytics de la Universidad Pontificia Comillas al presentar mi Trabajo Fin de Grado titulado " Transición Energética e Hidrógeno Renovable: Análisis de Precios y Competitividad ", 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. **Crítico:** Para encontrar contra-argumentos a una tesis específica que pretendo defender.
3. **Referencias:** Usado conjuntamente con otras herramientas, como Science, para identificar referencias preliminares que luego he contrastado y validado.
4. **Interpretador de código:** Para realizar análisis de datos preliminares.
5. **Constructor de plantillas:** Para diseñar formatos específicos para secciones del trabajo.
6. **Corrector de estilo literario y de lenguaje:** Para mejorar la calidad lingüística y estilística del texto.
7. **Sintetizador y divulgador de libros complicados:** Para resumir y comprender literatura compleja.
8. **Revisor:** Para recibir sugerencias sobre cómo mejorar y perfeccionar el trabajo con diferentes niveles de exigencia.

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: 22/04/2024

Firma: *Claudia Agullo Lara*

7. Bibliografía

¿Qué es la transición energética y cómo impulsarla? | Repsol. (2024, 29 enero). REPSOL. <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/que-es-la-transicion-energetica/index.cshtml#:~:text=La%20transici%C3%B3n%20energ%C3%A1tica%20es%20el,clim%C3%A1tico%20es%20el%20efecto%20invernadero> .

¿Qué influye sobre el precio del petróleo? | Plus500. (s. f.). <https://www.plus500.com/es-es/instruments/cl/what-influences-the-price-of-oil~1>

Adm_Eleiaweb. (2024, 22 enero). ¿Qué factores influyen en el precio del gas? Eleia. <https://eleiaenergia.com/que-factores-influyen-en-el-precio-del-gas/>

Antoranz, J. L. (2021). El hidrógeno verde en la Unión Europea: una vía necesaria para la transición energética. *Revista Española de Desarrollo y Cooperación*, (48), 13-33.

Ap, B. C. T. V. (2024, January 17). El tiempo atmosférico y el clima no son lo mismo, y eso significa que podemos esperar inviernos más duros en un mundo con calentamiento. National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2019/01/porque-el-tiempo-frio-no-significa-que-el-cambio-climatico-sea-falso>

Barrel - Energy education. (2020). <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Barrel>

Berry, G. D., & Aceves, S. M. (2006). La economía del hidrógeno como solución al problema de la estabilización del clima mundial. *Acta universitaria*, 16(1), 5-14.

Brent: the world's crude benchmark. (2020). ICE. <https://www.ice.com/insights/market-pulse/brent-the-worlds-crude-benchmark>

Canogar, R. (2006). ¿ Se acaba el petróleo?. Dpto. Matemáticas, UNED, Madrid, 1-13.

Cantarero, M. M. V. (2020). Of renewable energy, energy democracy, and sustainable development: A roadmap to accelerate the energy transition in developing countries. *Energy Research & Social Science*, 70, 101716.

Carpenter, C. (2022, 15 enero). S&P Global Commodity Insights. S&P Global. Recuperado 15 de enero de 2022, de <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy->

transition/011522-hydrogen-demand-set-to-take-off-in-mid-2030s-with-supply-more-than-enough-irena

Chen (2023, 29 diciembre). FactSet: What it is, How it Works, Company Structure. Investopedia. <https://www.investopedia.com/terms/f/factset.asp>

Chuliá, H., Klein, T., Mendoza, J. A. M., & Uribe, J. M. (2024). Vulnerability of European electricity markets: A quantile connectedness approach. *Energy Policy*, 184, 113862.

Claves de la nueva Ley de Cambio Climático y Transición Energética. (2023, 17 marzo). Pacto Mundial. <https://www.pactomundial.org/noticia/claves-de-la-nueva-ley-de-cambio-climatico-y-transicion-energetica/#:~:text=Seg%C3%BAAn%20Naciones%20Unidas%2C%20los%20combustibles,las%20emisiones%20globales%20de%20CO2.>

Collection, J. B. N. G. I. (2024, January 18). Los gases de efecto invernadero tienen un impacto cada vez mayor en el día a día del mundo entero. Hacemos un recorrido por la ciencia para explicar qué es exactamente el calentamiento global que provoca el cambio climático y cuáles son sus consecuencias. National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-es-el-calentamiento-global>

Comité Económico y Social Europeo. (2023). Impacto de la crisis energética en la economía europea [Dictamen de iniciativa] TEN/800.

Communications. (2023, December 7). ¿Qué es el calentamiento global y cuáles son las causas? BBVA NOTICIAS. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-el-calentamiento-global/>

Cossent, R., Figuerola-Ferretti, I., Gerres, T., Sanz, F. J., Segarra, I., & Serna, S. (2023). De la planificación a la ejecución: Examinando los factores de éxito para el desarrollo del hidrógeno en España. Informe Anual 2022-2023. Cátedra de Estudios sobre el Hidrógeno, Universidad Pontificia Comillas.

Cuesta, J. G., Gómez, M. V., Cuesta, J. G., Gómez, M. V., Cuesta, J. G., & Gómez, M. V. (2022, 2 septiembre). Rusia corta el gas a Europa a través del Nord Stream de forma

indefinida. El País. <https://elpais.com/internacional/2022-09-02/rusia-cierra-indefinidamente-el-gasoducto-nord-stream.html>

Doe, J., & Smith, J. (2021). The Global Natural Gas Market: New Trends and Challenges. *Energy Economics*.

Dormido, L., Garrido, I., L'Hotellerie-Fallois, P., & Santillán Fraile, J. (2022). El cambio climático y la sostenibilidad del crecimiento: iniciativas internacionales y políticas europeas. Documentos Ocasionales/Banco de España, 2213.

Energías no renovables, ¿qué son? características y tipos. (2023, 11 octubre). DKV Seguros. <https://dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/contaminacion/energias-no-renovables-que-son-caracteristicas-y-tipos>

Enríquez, D. G. (2023, 21 diciembre). ¿Qué es y cómo se genera el Hidrógeno Gris? Canal Gestión Integrada. <https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/hidrogeno-gris/>

Escobar, A. (2021, 14 octubre). ¿Qué es un megavatio hora (MWh)? CHC Energía. <https://chcenergia.es/blog/que-es-un-megavatio-hora-mwh/>

Fabra, N. (2023). Reforming European electricity markets: Lessons from the energy crisis. *Energy Economics*, 126

Factores del precio del gas natural. (s. f.). <https://justmarkets.com/es/education/forex-articles/natural-gas-pricing-factors>

Fell, H., Holland, S. P., & Yates, A. J. (2023). Optimal Subsidies for Green Hydrogen Production (No. w31902). National Bureau of Economic Research.

Fernández, J. A. M., Mendoza, W. A. B., & Consuegra, H. D. (2022). Análisis del potencial del uso de hidrógeno verde para reducción de emisiones de carbono en Colombia. Fuentes: *El reventón energético*, 20(1), 57-72.

García, M., & Martínez, J. (2020). Medidas para abordar la crisis energética: Promoviendo la transición hacia fuentes renovables y sostenibles. *Revista de Energías Renovables*, 15(2), 45-58.

García-Navarro, J., Isaacs, M. A., Favaro, M., Ren, D., Ong, W. J., Grätzel, M., & Jiménez-Calvo, P. (2023). Updates on hydrogen value chain: A strategic roadmap. *Global Challenges*, 2300073.

Gobierno de España (2020). Hoja de ruta del hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), Madrid.

González Besa, Y. (2016). Producción de hidrógeno a partir de energía solar fotovoltaica. Análisis de sensibilidad de parámetros de diseño.

Gorji, S. A. (2023). Challenges and opportunities in green hydrogen supply chain through metaheuristic optimization. *Journal of Computational Design and Engineering*, 10(3), 1143-1157.

Granados, R. M. (2013). Variables no estacionarias y cointegración. Universidad de Granada, 6-7.

Gulli, C., Heid, B., Noffsinger, J., Waardenburg, M., & Wilthner, M. (2024, 10 enero). *Global Energy Perspective 2023: Hydrogen outlook*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-hydrogen-outlook>

Hernandez, A. (2022, 23 noviembre). Why cheap US gas costs a fortune in Europe. *POLITICO*. <https://www.politico.eu/article/cheap-us-gas-cost-fortune-europe-russia-ukraine-energy/>

Hernández, A., & Gómez, M. (2020). Impacto de la crisis energética en la economía global: un análisis integral. *Revista de Economía Energética*, 15(2), 45-63.

Herrera Herbert, J. (2020). Ingeniería de la perforación de pozos de petróleo y gas. Vol. I: Origen y características de los hidrocarburos.

Hidrógeno renovable (verde) - ¿Qué es y qué usos tiene? | Repsol. (2024, 7 febrero). *REPSOL*. <https://www.repsol.com/es/tecnologia-digitalizacion/technology-lab/reduccion-emisiones/hidrogeno-renovable/index.cshtml>

International Energy Agency. (2022). World energy outlook 2022. International Energy Agency.

IRENA. (2021). Making the Breakthrough: Green Hydrogen Policies and Technology Costs.

Irusta, M. (2017). Energía hidroeléctrica.

Jarrow, R. A., & Oldfield, G. S. (1981). Forward contracts and futures contracts. Journal of Financial Economics, 9(4), 373-382.

Kumar, S. S., & Lim, H. (2022). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. Energy reports, 8, 13793-13813.

La demanda mundial de hidrógeno no despegará hasta 2035. (2022). revistas.eleconomista.es. <https://revistas.eleconomista.es/energia/2022/febrero/la-demanda-mundial-de-hidrogeno-no-despegara-hasta-2035-AM10496161>

La electrificación indirecta con hidrógeno renovable. (2020). <https://aeeolica.org/wp-content/uploads/2020/06/Documento-Posicin-Hidrgeno-AEE-03062020.pdf>

La energía renovable | Fichas temáticas sobre la Unión Europea | Parlamento Europeo. (s. f.). <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/70/la-energia-renovable>

La Organización Meteorológica Mundial confirma que en 2023 la temperatura mundial batió todos los récords. (2024, January 16). Organización Meteorológica Mundial. [https://wmo.int/es/news/media-centre/la-organizacion-meteorologica-mundial-confirma-que-en-2023-la-temperatura-mundial-batio-todos-los#:~:text=La%20OMM%20ha%20tomado%20los,preindustriales%20\(1850%2D1900\)](https://wmo.int/es/news/media-centre/la-organizacion-meteorologica-mundial-confirma-que-en-2023-la-temperatura-mundial-batio-todos-los#:~:text=La%20OMM%20ha%20tomado%20los,preindustriales%20(1850%2D1900))).

Linares Llamas, P. (2018). La transición energética.

Lograr la neutralidad de carbono para 2050 no es misión imposible, asegura Guterres. (2021, 24 octubre). Noticias ONU. <https://news.un.org/es/story/2020/12/1485422>

López Jimeno, C. (2002a). El Gas Natural, el recorrido de la Energía.

López Jimeno, C (2002b). Energía eólica: El recorrido de la energía. Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid.

Maradin, D. (2021). Advantages and disadvantages of renewable energy sources utilization. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11(3), 176-183.

Martínez, A. C., & Caro, R. (2010). Fuentes energéticas. In *La Nueva Geopolítica de la Energía* (pp. 21-34). Instituto Español de Estudios Estratégicos.

Maziarz, M. (2015). A review of the Granger-causality fallacy. *The journal of philosophical economics: Reflections on economic and social issues*, 8(2), 86-105.

Mike. (2024, 23 febrero). *Green hydrogen price index*. Businessanalytiq. <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/green-hydrogen-price-index/#:~:text=The%20cost%20of%20green%20hydrogen,tends%20to%20decrease%20as%20well>.

Mohanna, L. A. (2022). Las consecuencias energéticas de la Guerra en Ucrania. *Anuario en Relaciones Internacionales del IRI*, 2022.

MUNDIAL, D. G. (2017). LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.

Natural gas commodity prices U.S. and Europe 2024 | Statista. (2023, 25 agosto). Statista. <https://www.statista.com/statistics/252791/natural-gas-prices/>

Natural Gas Intelligence. (2022, 10 febrero). What is an MMBtu? - Natural Gas Intelligence. <https://www.naturalgasintel.com/mmbtu/>

Navarro, J. J. (2023, 15 enero). Europa ha conseguido lo imposible, abandonar el gas ruso y poner en problemas a Putin. *El Blog Salmón*. <https://www.elblogsalmon.com/entorno/europa-ha-conseguido-imposible-abandonar-gas-ruso-poner-problemas-a-putin>

Novelec, E. G. (2023, 26 septiembre). Fuentes de energía no renovables, tipos y características | Blog Grupo Novelec. Grupo Novelec. https://blog.gruponovelec.com/blog/fuentes-de-energia-no-renovables-tipos-y-caracteristicas/#%C2%BFQue_son_las_fuentes_de_energia_no_renovables

Oil prices and outlook - U.S. Energy Information Administration (EIA). (2023). <https://www.eia.gov/energyexplained/oil-and-petroleum-products/prices-and-outlook.php%5C>

Ozili, P. K., & Ozen, E. (2023). Global energy crisis: impact on the global economy. *The Impact of Climate Change and Sustainability Standards on the Insurance Market*, 439-454.

Pablo Dávila, F. D., Micand, F., Rivas Soriano, L., & Sánchez LLorente, J. M. (2012). *Contaminación atmosférica en Canarias: 2007-2009*.

Peláez, I. M. (2016). Modelos de regresión: lineal simple y regresión logística. *Revista Seden*, 14, 195-214.

Peralta Rodríguez, A. (2020). *Deshielo: el calentamiento global como proceso gráfico*.

PricewaterhouseCoopers. (s. f.). *Green hydrogen economy - predicted development of tomorrow*. PwC. <https://www.pwc.com/gx/en/industries/energy-utilities-resources/future-energy/green-hydrogen-cost.html>

Quiñonez, D. F. M. (2023). *PERSPECTIVAS DEL HIDRÓGENO VERDE COMO UN VECTOR ENERGÉTICO DE FUTURO*.

Redondo, Ó. C., & Vega, J. N. (2021). Transición energética y escenarios postcrecimiento. *Papeles de relaciones ecosociales y cambio global*, (156), 93-106.

Repsol, Y. P. F. (2002). *El petróleo: el recorrido de la energía*. Madrid: Madridinnova. Retrieved Marzo, 19, 2019.

Restrepo, L. F., & González, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 183-192.

Rivas, L. R. N. (2012). El aprovechamiento de las energías renovables marinas como opción tecnológica de futuro. *Economía industrial*, (386), 99-108.

S&P Global. (2020). <https://www.spglobal.com/en/research-insights/articles/what-is-energy-transition>

Santaolalla, J. (2021, 18 febrero). ¿Cómo descomponer agua en hidrógeno y oxígeno? - Fundación Aequae. Fundación Aequae. <https://www.fundacionaqua.org/h2ocomo-separar-la-h-de-la-o/>

Santoro, C., Lavacchi, A., Mustarelli, P., Di Noto, V., Elbaz, L., Dekel, D. R., & Jaouen, F. (2022). What is next in anion-exchange membrane water electrolyzers? Bottlenecks, benefits, and future. *ChemSusChem*, 15(8), e202200027.

Scheibe, A., & Poudineh, R. (2023). Regulating the future European hydrogen supply industry: A balancing act between liberalization, sustainability, and security of supply? (No. 26). OIES Paper: ET.

Sidagis Galli, C., Seiji Abe, D., González Piana, M., De Giacomi Juri, S., Piccardo Antúnez, A., Cuevas, J., & Chalar Marquisá, G. (2022). Implementación de la técnica de medición y primer registro de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄ y N₂O) en la interfase sedimento-agua en el embalse Rincón del Bonete, Uruguay. *INNOTEC*, 2022, 23: e582.

SveaSolar. (2023, 14 junio). Fuentes de energía no renovables. Svea Solar. <https://sveasolar.es/es-es/blog/fuentes-de-energia-no-renovables>

Tashie-Lewis, B. C., & Nnabuife, S. G. (2021). Hydrogen production, distribution, storage and power conversion in a hydrogen economy-a technology review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 8, 100172.

Times/Redux, L. S. N. Y. (2023, 1 junio). Gran parte de la energía del mundo procede de materiales formados hace cientos de millones de años, y ello tiene consecuencias medioambientales. *National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/explicacion-que-son-combustibles-fosiles>

Tipos de energía no renovable y su impacto medioambiental. (2023, 15 diciembre). Santander Open Academy. <https://www.santandernoveopenacademy.com/es/blog/tipos-de-energia-no-renovable.html>

Tognoli, J. (2017). Los Estados y la producción de energía nuclear: el debate sobre los riesgos y beneficios vinculados a esta práctica. *Anuario en Relaciones Internacionales del IRI*, 2017.

United Nations. (s. f.-c). ¿Qué son las energías renovables? | Naciones Unidas.
<https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy>

Wang, G., Liao, Q., Li, Z., Zhang, H., Liang, Y., & Wei, X. (2022). How does soaring natural gas prices impact renewable energy: A case study in China.

World Health Organization: WHO. (2018, 2 mayo). Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado. Organizacion Mundial de la Salud.
<https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>

8. Anexos

8.1. Código de programación en Python

```
import pandas as pd

import matplotlib.pyplot as plt

import seaborn as sns

import openpyxl

# Leer los datos del archivo de Excel

Hy1= r'C:\Users\claudiaagullo\OneDrive - KPMG\Documents\Claudia\TFG\TFG
Analytics\factset\Precios bien\HYNWB00.xlsx'

HyEU = pd.ExcelFile(Hy1)

Hy2= r'C:\Users\claudiaagullo\OneDrive - KPMG\Documents\Claudia\TFG\TFG
Analytics\factset\Precios bien\HYUSB00.xlsx'

HyUS = pd.ExcelFile(Hy2)

NG1= r'C:\Users\claudiaagullo\OneDrive - KPMG\Documents\Claudia\TFG\TFG
Analytics\factset\Precios bien\DutchTTF.xlsx'

NGEU = pd.ExcelFile(NG1)

NG2= r'C:\Users\claudiaagullo\OneDrive - KPMG\Documents\Claudia\TFG\TFG
Analytics\factset\Precios bien\Henryhub.xlsx'

NGUS = pd.ExcelFile(NG2)

Cru1= r'C:\Users\claudiaagullo\OneDrive - KPMG\Documents\Claudia\TFG\TFG
Analytics\factset\Precios bien\Brentcrude.xlsx'

CruEU = pd.ExcelFile(Cru1)

Cru2= r'C:\Users\claudiaagullo\OneDrive - KPMG\Documents\Claudia\TFG\TFG
Analytics\factset\Precios bien\CrudeWTI.xlsx'

CruUS = pd.ExcelFile(Cru2)

# Convertir cada archivo Excel en un DataFrame
```

```

HyEU = pd.read_excel(Hy1)
HyUS = pd.read_excel(Hy2)
NGEU = pd.read_excel(NG1)
NGUS = pd.read_excel(NG2)
CruEU = pd.read_excel(Cru1)
CruUS = pd.read_excel(Cru2)

# Ahora, HyEU, HyUS, NGEU, NGUS, CruEU, y CruUS son DataFrames

#conversión de las fechas a tipo datetime
HyEU['Date'] = pd.to_datetime(HyEU['Date'])
HyEU.set_index('Date', inplace=True)
HyUS['Date'] = pd.to_datetime(HyUS['Date'])
HyUS.set_index('Date', inplace=True)
NGEU['Date'] = pd.to_datetime(NGEU['Date'])
NGEU.set_index('Date', inplace=True)
NGUS['Date'] = pd.to_datetime(NGUS['Date'])
NGUS.set_index('Date', inplace=True)
CruEU['Date'] = pd.to_datetime(CruEU['Date'])
CruEU.set_index('Date', inplace=True)
CruUS['Date'] = pd.to_datetime(CruUS['Date'])
CruUS.set_index('Date', inplace=True)

#Evaluar Rangos de Fechas y Frecuencia
dataframes = [HyEU, HyUS, NGEU, NGUS, CruEU, CruUS]
nombres = ['HyEU', 'HyUS', 'NGEU', 'NGUS', 'CruEU', 'CruUS']
for df, nombre in zip(dataframes, nombres):

```

```

print(f"{nombre}:")

print(f"Inicio: {df.index.min()}, Fin: {df.index.max()}, Frecuencia:
{pd.infer_freq(df.index)}\n")

#Identificar los valores faltantes

for df, nombre in zip(dataframes, nombres):

    num_valores_faltantes = df['Price'].isnull().sum()

    print(f"{nombre} valores faltantes en la columna de precios:
{num_valores_faltantes}\n")

# Crear un conjunto de todas las fechas únicas en todos los DataFrames

fechas_totales = set()

for df in dataframes:

    fechas_totales = fechas_totales.union(set(df.index))

# Identificar fechas faltantes

fechas_faltantes = {nombre: list(fechas_totales.difference(set(df.index))) for df, nombre
in zip(dataframes, nombres)}

for nombre, fechas in fechas_faltantes.items():

    print(f"{nombre} fechas faltantes: {fechas}\n")

# Encontrar las fechas comunes

fechas_comunes = set(dataframes[0].index)

for df in dataframes[1:]:

    fechas_comunes = fechas_comunes.intersection(set(df.index))

# Convertir fechas_comunes a una lista para su uso como índice

fechas_comunes_lista = sorted(list(fechas_comunes))

# Filtrar cada DataFrame para incluir solo fechas comunes

dataframes_filtrados = [df.loc[fechas_comunes_lista] for df in dataframes]

```



```

HyEU, HyUS, NGEU, NGUS, CruEU, CruUS = dataframes_filtrados

# Verificar que todos los DataFrames ahora tienen el mismo número de filas
for df, nombre in zip([HyEU, HyUS, NGEU, NGUS, CruEU, CruUS], nombres):

    print(f"{nombre} número de filas después de la limpieza: {df.shape[0]}")

import pandas as pd

# Visualizando los outliers que no van a ser eliminados para la visualización

import seaborn as sns

import matplotlib.pyplot as plt

# Establecer un tema de Seaborn para mejorar la estética de los gráficos

sns.set_theme(style="whitegrid")

# Definir una paleta de colores

colores = sns.color_palette('pastel') # Puedes cambiar 'pastel' por otro nombre de paleta

for df, nombre, color in zip(dataframes, nombres, colores):

    # Crear el boxplot con un color específico de la paleta

    sns.boxplot(data=df['Price'], color=color)

    # Añadir título y etiquetas con información clara

    plt.title(f"Outliers en {nombre} (Precio)", fontsize=14)

    plt.ylabel('Precio', fontsize=12)

    plt.xlabel('Distribución', fontsize=12) # Ajusta según necesidad

    plt.xticks(fontsize=10)

    plt.yticks(fontsize=10)

    plt.show()

# Calculando las estadísticas para HyEU, HyUS, NGEU, NGUS, CruEU, CruUS

for df, nombre in zip(dataframes, nombres):

```

```

print(f"{nombre} Estadísticas Descriptivas:")

print(df['Price'].describe(), "\n")

#Visualización de HyEU y NGEU

import matplotlib.pyplot as plt

fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(14, 7))

ax2 = ax1.twinx()

ax1.plot(HyEU.index, HyEU['Price'], color='green', label='H2EU')

ax1.set_xlabel('Fecha')

ax1.set_ylabel('€/mmbtu', color='green')

ax1.tick_params(axis='y', labelcolor='green')

ax1.grid(False) # Eliminar las gridlines

ax2.plot(NGEU.index, NGEU['Price'], color='blue', label='GASEU')

ax2.set_ylabel('€/MWh', color='blue')

ax2.tick_params(axis='y', labelcolor='blue')

ax2.grid(False) # Eliminar las gridlines

plt.title('Evolución de precios del hidrógeno y gas natural en Europa')

fig.tight_layout()

ax1.legend(loc='upper left')

ax2.legend(loc='upper right')

plt.show()

#Visualización de HyEU y CruEU

import matplotlib.pyplot as plt

fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(14, 7))

ax2 = ax1.twinx()

```

```

ax1.plot(HyEU.index, HyEU.iloc[:, 0], color='green', label='H2EU')
ax1.set_xlabel('Fecha')
ax1.set_ylabel('€/ mmbt', color='green')
ax1.tick_params(axis='y', labelcolor='green')
ax2.plot(CruEU.index, CruEU.iloc[:, 0], color='blue', label='CrudoEU')
ax2.set_ylabel('€/bbl', color='blue')
ax2.tick_params(axis='y', labelcolor='blue')
plt.title('Evolución de precios del hidrógeno y el petróleo en Europa')
fig.tight_layout() # Para un mejor layout
ax1.legend(loc='upper left')
ax2.legend(loc='upper right')
plt.show()

#Visualización de HyUS y NGUS
import matplotlib.pyplot as plt
fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(14, 7))
ax2 = ax1.twinx()
ax1.plot(HyUS.index, HyUS.iloc[:, 0], color='green', label='H2US')
ax1.set_xlabel('Fecha')
ax1.set_ylabel('$/ mmbt', color='green')
ax1.tick_params(axis='y', labelcolor='green')
ax2.plot(NGUS.index, NGUS.iloc[:, 0], color='blue', label='GASUS')
ax2.set_ylabel('$/MWh', color='blue')
ax2.tick_params(axis='y', labelcolor='blue')

```

```

plt.title('Evolución de precios del hidrógeno y gas natural en EEUU')

fig.tight_layout() # Para un mejor layout

ax1.legend(loc='upper left')

ax2.legend(loc='upper right')

plt.show()

#Visualización de HyUS y CruUS

import matplotlib.pyplot as plt

fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(14, 7))

ax2 = ax1.twinx()

ax1.plot(HyUS.index, HyUS.iloc[:, 0], color='green', label='H2US')

ax1.set_xlabel('Fecha')

ax1.set_ylabel('$/ mmbt', color='green')

ax1.tick_params(axis='y', labelcolor='green')

ax2.plot(CruUS.index, CruUS.iloc[:, 0], color='blue', label='CrudoUS')

ax2.set_ylabel('$/bbl', color='blue')

ax2.tick_params(axis='y', labelcolor='blue')

plt.title('Evolución de precios del hidrógeno y el petróleo en EEUU')

fig.tight_layout() # Para un mejor layout

ax1.legend(loc='upper left')

ax2.legend(loc='upper right')

plt.show()

```

#Para los análisis de correlación, causalidad y modelo de regresión lineal se realiza con precios diferenciados:

```
import pandas as pd
```

```

# Función para remover outliers usando el método IQR

def remove_outliers(df, column):

    Q1 = df[column].quantile(0.25)

    Q3 = df[column].quantile(0.75)

    IQR = Q3 - Q1

    lower_bound = Q1 - 1.5 * IQR

    upper_bound = Q3 + 1.5 * IQR

    df_filtered = df[(df[column] >= lower_bound) & (df[column] <= upper_bound)]

    return df_filtered

dataframes = [HyEU, HyUS, NGEU, NGUS, CruEU, CruUS]

nombres = ['HyEU', 'HyUS', 'NGEU', 'NGUS', 'CruEU', 'CruUS']

dataframes_clean = {}

for df, nombre in zip(dataframes, nombres):

    df_clean = remove_outliers(df, 'Price')

    dataframes_clean[nombre] = df_clean

    print(f"{nombre}: antes {len(df)} filas, después {len(df_clean)} filas")

#Volver a limpiar las fechas

fechas_comunes = set(dataframes_clean[nombres[0]].index) # Inicia con las fechas del
primer DataFrame

for nombre in nombres[1:]: # Iterar sobre los nombres de los demás DataFrames

    fechas_comunes.intersection_update(dataframes_clean[nombre].index) # Intersectar
con el índice de cada DataFrame

fechas_comunes_list = list(fechas_comunes)

for nombre in nombres:

```

```

dataframes_clean[nombre] =
dataframes_clean[nombre].loc[fechas_comunes_list].dropna()

for nombre in nombres:

    print(f"{nombre}: {len(dataframes_clean[nombre])} filas después de sincronizar
fechas")

from statsmodels.tsa.stattools import adfuller

import matplotlib.pyplot as plt

def test_estacionariedad(serie):

    resultado = adfuller(serie.dropna()) # Se elimina cualquier NaN que pueda haber
surgido por la diferenciación

    print('Estadístico ADF :', resultado[0])

    print('p-valor :', resultado[1])

    print('Valores Críticos :')

    for key, value in resultado[4].items():

        print(f'\t{key}: {value:.3f}')

    if resultado[1] <= 0.05:

        print("La serie es estacionaria.")

    else:

        print("La serie no es estacionaria y podría necesitar más diferenciación o
transformaciones.")

dataframes_diff = {}

for nombre, df in dataframes_clean.items(): # Cambio aquí de dataframes_sync a
dataframes_clean

    df_diff = df.diff().dropna() # Realizar la primera diferenciación y eliminar NaN

    dataframes_diff[nombre] = df_diff

```

```

    print(f"\nPrueba de estacionariedad para {nombre} después de la primera
diferenciación:")

    test_estacionariedad(df_diff['Price'])

#Correlaciones para Europa

import seaborn as sns

import matplotlib.pyplot as plt

precio_europa = pd.DataFrame()

for nombre, df in dataframes_diff.items():

    if nombre in ['HyEU', 'NGEU', 'CruEU']:

        precio_europa[nombre] = df['Price']

matriz_correlacion_europa = precio_europa.corr()

print("Matriz de Correlación entre las series de tiempo en Europa:")

print(matriz_correlacion_europa)

plt.figure(figsize=(8, 6))

sns.heatmap(matriz_correlacion_europa, annot=True, cmap='coolwarm', fmt=".2f",
linewidths=.5)

plt.title('Mapa de Calor de Correlación entre Precios en Europa')

plt.show()

# Correlaciones para Estados Unidos

precio_usa = pd.DataFrame()

for nombre, df in dataframes_diff.items():

    if nombre in ['HyUS', 'NGUS', 'CruUS']:

        precio_usa[nombre] = df['Price']

matriz_correlacion_usa = precio_usa.corr()

print("Matriz de Correlación entre las series de tiempo en Estados Unidos:")

```

```

print(matriz_correlacion_usa)

plt.figure(figsize=(8, 6))

sns.heatmap(matriz_correlacion_usa, annot=True, cmap='coolwarm', fmt=".2f",
linewidths=.5)

plt.title('Mapa de Calor de Correlación entre Precios en Estados Unidos')

plt.show()

#Análisis de cointegración para Europa

import pandas as pd

prices_HyEU = HyEU['Price']

prices_NGEU = NGEU['Price']

from statsmodels.tsa.stattools import coint

score, p_value, _ = coint(prices_HyEU, prices_NGEU)

print('Análisis de cointegración entre gas natural e hidrógeno verde Europa')

print(' ')

print(f'Cointegration test score: {score}')

print(f'P-value: {p_value}')

#Análisis de cointegración para Estados Unidos

import pandas as pd

prices_HyUS = HyUS['Price']

prices_NGUS = NGUS['Price']

from statsmodels.tsa.stattools import coint

score, p_value, _ = coint(prices_HyUS, prices_NGUS)

print('Análisis de cointegración entre gas natural e hidrógeno verde Estados Unidos')

print(' ')

print(f'Cointegration test score: {score}')

```



```

print(f'P-value: {p_value}')

#Análisis AIC Y BIC par obtener el número de retardos

#Para Europa

from statsmodels.tsa.api import VAR

def calculate_aic_bic_var(data, max_lag):

    results = pd.DataFrame(index=range(1, max_lag + 1), columns=['AIC', 'BIC'])

    for lag in range(1, max_lag + 1):

        model = VAR(data)

        model_fitted = model.fit(maxlags=lag, ic=None)

        results.loc[lag, 'AIC'] = model_fitted.aic

        results.loc[lag, 'BIC'] = model_fitted.bic

        min_aic_lag = results['AIC'].astype(float).idxmin()

        min_bic_lag = results['BIC'].astype(float).idxmin()

    return results, min_aic_lag, min_bic_lag

data = pd.DataFrame({

    'NGEU': dataframes_diff['NGEU']['Price'],

    'HyEU': dataframes_diff['HyEU']['Price']

})

aic_bic_var, min_aic_lag, min_bic_lag = calculate_aic_bic_var(data, max_lag=50)

print("AIC and BIC for VAR model:")

print(aic_bic_var)

print(f"Minimum AIC is at lag {min_aic_lag}")

print(f"Minimum BIC is at lag {min_bic_lag}")

```

```

#Para Estados Unidos

from statsmodels.tsa.api import VAR

def calculate_aic_bic_var(data, max_lag):

    results = pd.DataFrame(index=range(1, max_lag + 1), columns=['AIC', 'BIC'])

    for lag in range(1, max_lag + 1):

        model = VAR(data)

        model_fitted = model.fit(maxlags=lag, ic=None)

        results.loc[lag, 'AIC'] = model_fitted.aic

        results.loc[lag, 'BIC'] = model_fitted.bic

        min_aic_lag = results['AIC'].astype(float).idxmin()

        min_bic_lag = results['BIC'].astype(float).idxmin()

    return results, min_aic_lag, min_bic_lag

data = pd.DataFrame({

    'NGUS': dataframes_diff['NGUS']['Price'],

    'HyUS': dataframes_diff['HyUS']['Price']

})

aic_bic_var, min_aic_lag, min_bic_lag = calculate_aic_bic_var(data, max_lag=50)

print("AIC and BIC for VAR model:")

print(aic_bic_var)

print(f"Minimum AIC is at lag {min_aic_lag}")

print(f"Minimum BIC is at lag {min_bic_lag}")

#Con los retardos, ahora se hace el análisis de causalidad

#Para Europa

data = pd.DataFrame({

```

```

    'NGEU': dataframes_diff['NGEU']['Price'],
    'HyEU': dataframes_diff['HyEU']['Price']
})

# Realizar el test de causalidad de Granger

maxlag = 15

test_result = grangercausalitytests(data[['HyEU', 'NGEU']], maxlag=maxlag,
verbose=True)

print("Granger Causality Test Results:")

for lag in range(1, maxlag + 1):

    ftest_pvalue = test_result[lag][0]['ssr_ftest'][1] # Obtener el p-value del F-test

    print(f"Lag {lag}: F-test p-value = {ftest_pvalue:.4f}")

#Para Estados Unidos

data = pd.DataFrame({

    'NGUS': dataframes_diff['NGUS']['Price'],

    'HyUS': dataframes_diff['HyUS']['Price']

})

# Realizar el test de causalidad de Granger

maxlag = 16

test_result = grangercausalitytests(data[['HyUS', 'NGUS']], maxlag=maxlag,
verbose=True)

print("Granger Causality Test Results:")

for lag in range(1, maxlag + 1):

    ftest_pvalue = test_result[lag][0]['ssr_ftest'][1] # Obtener el p-value del F-test

    print(f"Lag {lag}: F-test p-value = {ftest_pvalue:.4f}")

#Modelo de regression lineal para Europa

```

```

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

import seaborn as sns

from sklearn.model_selection import train_test_split

from sklearn.linear_model import LinearRegression

from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score

from statsmodels.stats.diagnostic import het_breuschpagan

from statsmodels.stats.stattools import durbin_watson

from scipy.stats import shapiro

X = dataframes_diff['NGEU']['Price'].values.reshape(-1, 1) # Variable independiente
y = dataframes_diff['HyEU']['Price'].values.reshape(-1, 1) # Variable dependiente
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

model = LinearRegression()

model.fit(X_train, y_train)

y_pred = model.predict(X_test)

mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)

r2 = r2_score(y_test, y_pred)

# Visualización de la regresión

plt.figure(figsize=(10, 5))

plt.scatter(X_test, y_test, color='blue')

plt.plot(X_test, y_pred, color='green', linewidth=2)

plt.title('Regresión Lineal Simple')

plt.xlabel('Precio del Gas Natural en Europa (diferenciado)')

plt.ylabel('Precio del Hidrógeno en Europa (diferenciado)')

```

```

plt.show()

print(f"MSE: {mse}, R^2: {r2}")

#Modelo de regression lineal para Estados Unidos

X_us = dataframes_diff['NGUS']['Price'].values.reshape(-1, 1) # Variable
independiente

y_us = dataframes_diff['HyUS']['Price'].values.reshape(-1, 1) # Variable dependiente

X_us_const = add_constant(X_us)

X_train_us, X_test_us, y_train_us, y_test_us = train_test_split(X_us_const, y_us,
test_size=0.2, random_state=42)

model_us = LinearRegression(fit_intercept=False)

model_us.fit(X_train_us, y_train_us)

y_pred_us = model_us.predict(X_test_us)

mse_us = mean_squared_error(y_test_us, y_pred_us)

r2_us = r2_score(y_test_us, y_pred_us)

# Visualización de la regresión

plt.figure(figsize=(10, 5))

plt.scatter(X_test_us[:, 1], y_test_us, color='blue') # Ignorar la columna de la constante

plt.plot(X_test_us[:, 1], y_pred_us, color='green', linewidth=2)

plt.title('Regresión Lineal Simple para Estados Unidos')

plt.xlabel('Precio del Gas Natural en Estados Unidos (diferenciado)')

plt.ylabel('Precio del Hidrógeno en Estados Unidos (diferenciado)')

plt.show()

print(f"MSE: {mse_us}, R^2: {r2_us}")

```