



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

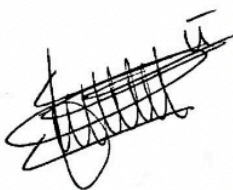
Autor: Juan Carlos Durante Beleña
Director: Isabel Catalina Figuerola Ferretti

Madrid
Julio 2023

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
"El hidrógeno como nuevo commodity"
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 22/23 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

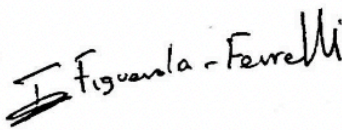
Fdo.: Juan Carlos Durante Beleña

Fecha: 21/ 7/ 2023



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Firma: 

Fecha: 21 - 7 - 2023



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

Autor: Juan Carlos Durante Beleña
Director: Isabel Catalina Figuerola Ferretti

Madrid
Julio 2023

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

Autor: Durante Beleña, Juan Carlos

Director: Figuerola Ferretti, Isabel Catalina

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto realizado estudia la situación actual que vive el hidrógeno, realizando especial énfasis en el hidrógeno verde por su transcendencia en el mundo de las energías renovables, así mismo, se explica el futuro a medio y largo plazo que existe en España y en Europa.

Para ver el posible comportamiento del hidrógeno como una nueva commodity se ha decidido estudiar y comparar con otras commodities de tipo combustible fósil y así poder observar de qué forma influían en el precio del hidrógeno.

1.Introducción

En este apartado se establecen los objetivos que se quieren lograr con la realización de este trabajo de fin de máster y también se explica la motivación por la cual se ha decidido realizar este proyecto con este tema concreto.

De manera resumida, el objetivo del proyecto es conseguir ver cómo influyen ciertas commodities en el hidrógeno pues en un futuro próximo el hidrógeno pasará a ser una commodity más ya que se está trabajando ya para la regulación y puesta en marcha de un mercado del hidrógeno internacional en el que el hidrógeno verde juega un papel trascendental.

La motivación de la realización del proyecto reside en la situación actual que se vive en el mundo y particularmente en Europa, a nivel global el hidrógeno puede ayudar a reducir las emisiones de carbono que tantos problemas crean al medio ambiente y en nuestro continente se ha acelerado todo lo que rodea al hidrógeno verde pues a raíz de la guerra de Ucrania y Rusia ha salido a la luz la crisis energética en las que nos encontramos y el hidrógeno verde es un camino con potencial al que atenerse en el futuro.

2. Estado del arte

Se explican ciertos puntos interesantes para comprender la motivación del proyecto y la situación actual que vive el planeta a nivel energético y en cuanto a emisiones de carbono.

Como es lógico hay que informar acerca de lo qué es el hidrógeno. Para ello se dará una definición estricta del mismo así como características del elemento químico para conocerlo más a fondo. No obstante, lo que resulta más interesante para el proyecto es el punto de vista en el que se relaciona con energías renovables por ello se explican otros conceptos como los tipos de hidrógeno, ventajas, desventajas aplicaciones del hidrógeno verde.

Es esencial comprender el proceso de hidrógeno verde para realmente saber lo qué es y por qué puede resultar tan interesante y beneficioso desde una perspectiva centrada en energías renovables como la que se planea en el futuro.

Adicionalmente, se exponen los planes de futuro que aguardan al hidrógeno verde en territorio nacional y en Europa.

En ambos casos, se explican las medidas previstas para dos horizontes distintos de tiempo, medio y largo plazo, concretamente 2030 y 2050.

A pesar de existir una hoja de ruta para el hidrógeno verde en España, las circunstancias han cambiado mucho desde que se realizó en el año 2020 por lo que se amplían ciertas expectativas allí establecidas.

España se sitúa como uno de los países con más potencial para el mundo del hidrógeno verde por la importancia que tiene la energía renovable en el país y se pronostican implementaciones atractivas relacionadas con el hidrógeno verde en industria, transporte y otros sectores importantes.

Por otro lado, desde el punto de vista europeo se busca, mediante planes como REPowerEU, reducir rápidamente la dependencia de combustibles fósiles rusos acelerando la transición hacia una energía limpia.

Hay que destacar la importancia de la European Hydrogen Backbone que es una iniciativa en la que participan numerosos países del continente que se basa en la creación de una red de gasoductos e infraestructuras que permitan y faciliten el transporte de hidrógeno por el continente para así posteriormente lograr la creación de un próspero mercado de hidrógeno renovable.

3. Fundamento teórico

Se divide en tres subapartados este apartado, cada epígrafe explica un concepto importante y necesario de comprender para el proyecto.

Debemos saber lo que es una commodity y lo que supone convertirse en ello ya que probablemente el hidrógeno será considerado así en los próximos años.

En segundo lugar, el concepto de vector energético es esencial para comprender el potencial del hidrógeno verde y entender todas las posibles vías de desarrollo que nos permite este concepto.

Para terminar esta parte teórica, tenemos un concepto algo más técnico que es el LCOH (Levelised Cost of Hydrogen) que básicamente es el coste normalizado de hidrogeno, es decir, cuánto cuesta un kilo de hidrógeno en euros, no obstante, este concepto está asociado a otros tipos de factores necesarios que también son explicados y se expone un ejemplo para facilitar su comprensión.

4. Metodología

En la metodología se establece la forma en la que se ha decidido realizar el análisis y estudio del proyecto. Se explica lo que es un análisis de regresión y un análisis de varianza (ANOVA) pues ambas han sido las herramientas estadísticas utilizadas para el estudio de datos de diversas commodities en comparación con los price assessments seleccionados de la plataforma S&P Platts.

Se ha decidido seleccionar las commodities: carbón, gas natural y petróleo, para utilizar su precio histórico como variables independientes en el análisis de regresión y se han realizado dos análisis distintos con distintas variables dependientes que han sido el precio del hidrógeno no renovable y el precio del hidrógeno verde.

5. Análisis de datos

Se seleccionan qué precio de las commodities seleccionadas son los que se van a utilizar para realizar el análisis de regresión y el ANOVA. Se seleccionan el barril Brent y el carbón Rotterdam pues ambas commodities tienen gran relación con Europa. El precio que se ha utilizado para la variable gas natural ha sido el del Henry Hub pues es una referencia para el precio de los contratos de futuros del gas natural a nivel europeo y global.

El primer análisis está realizado con el precio de hidrógeno producido por steam reforming y sin captura de emisiones como la variable respuesta y los precios de las tres commodities mencionadas como variables independientes.

El segundo análisis se ha configurado con las mismas variables independientes que el anterior y como variable dependiente se ha elegido el precio del hidrógeno verde generado por electrólisis de tipo alcalina.

De esta manera tenemos diferentes puntos de vista de cómo influyen los precios de carbón, gas natural y petróleo a dos tipos distintos de hidrógeno.

6. Análisis de resultados

Los resultados se interpretan con distintos conceptos estadísticos como son los coeficientes de determinación, errores típicos, F de Fischer... como por ejemplo el cuadro resumen que se expone a continuación.

RESUMEN	
<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,7607519
Coeficiente de determinación R ²	0,578743453
R ² ajustado	0,576230989
Error típico	3,867209348
Observaciones	507

También se exponen las matrices de correlaciones múltiples entre las variables para que influencia tiene una sobre otra.

Observando los resultados conseguidos se puede ver que el modelo generado con el análisis de regresión que tiene como variable respuesta el precio del hidrógeno generado por steam reforming se adapta mejor a las fluctuaciones de precio de los tres commodities que el precio del hidrógeno verde generado mediante tecnología de electrolizadores alcalinos.

Concretamente, el 68,094% de variaciones en el precio de hidrógeno producido por steam reforming puede explicarse debido a modificaciones en los precios de gas natural, petróleo y carbón frente al 57,874% que ocurre en el caso de análisis de regresión con variable dependiente el precio del hidrógeno verde.

7. Conclusiones

Con la realización de este proyecto se consigue explicar la importancia y el potencial que tiene el hidrógeno, especialmente el hidrógeno verde, que será un elemento clave en el desarrollo energético del futuro.

La influencia de la guerra de Ucrania y Rusia ha generado una aceleración en el ámbito del hidrógeno verde, esto ha influido en medio y largo plazo para los planes previstos en España y sobre todo en Europa.

A pesar de que hoy en día el LCOH del hidrógeno verde no pueda competir contra el hidrógeno no renovable, a medida que avance el tiempo se creará una economía de escala en torno al hidrógeno verde que provocará reducción de costes en el hidrógeno verde lo que ayudará a que sea más competitivo al mismo tiempo que aquel hidrógeno que produzca emisiones de carbono al producirse incrementará su precio por la importancia que tiene la reducción de la huella de carbono en el planeta.

Se ha logrado indicar qué influencia que tienen otras commodities sobre el hidrógeno lo cual ayuda para saber cómo pudiera comportarse el hidrógeno como nueva commodity.

El modelo de regresión de hidrógeno verde tiene peores resultados que el hidrógeno de steam reforming por diversos motivos como que los propios combustibles fósiles participan en el proceso de steam reforming no obstante, sí es importante remarcar que la fluctuación de petróleo, gas natural y carbón influyen en la variación del precio de hidrogeno verde.

Referencias

- [1] International Renewable Energy Agency, IRENA (2023). “Renewable capacity statistics 2023.”
- [2] Figuerola-Ferretti, I., McCrorie, J. R., & Paraskevopoulos, I. (2020). Mild explosivity in recent crude oil prices. *Energy Economics*, 87, 104387.
- [3] Deaton, A., & Laroque, G. (1992). On the behaviour of commodity prices. *The review of economic studies*, 59(1), 1-23.
- [4] International Energy Agency, IEA (2022). “Global hydrogen review 2022”

ABSTRACT

The project studies the current hydrogen situation, with special emphasis on green hydrogen due to its transcendence in the world of renewable energies, as well as explaining the medium- and long-term future in Spain and Europe.

To see the possible behaviour of hydrogen as a new commodity, it has been decided to study and compare it with other fossil fuel commodities in order to observe how they influence the price of hydrogen.

1. Introduction

This section sets out the objectives to be achieved with this master’s thesis and also explains the motivation for the decision to carry out this project on this specific topic.

In short, the aim of the project is to see how certain commodities influence hydrogen, since in the near future hydrogen will become another commodity, as work is already underway to regulate and set up an international hydrogen market in which green hydrogen plays a transcendental role.

The motivation for the project is the current situation in the world and particularly in Europe. On a global level, hydrogen can help to reduce carbon emissions that create so many problems for the environment, and on our continent, everything surrounding green hydrogen has accelerated as the Ukraine-Russia war has brought to light the energy crisis in which we find ourselves and green hydrogen is a potential way forward.

2. State of art

Some interesting points are explained to understand the motivation of the project and the current situation of the planet in terms of energy and carbon emissions.

Of course, it is necessary to inform about what hydrogen is. For this, a strict definition of hydrogen will be given, as well as characteristics of the chemical element in order to learn more about it. However, what is more interesting for the project is the point of view in which it is related to renewable energy, therefore other concepts such as types of hydrogen, advantages, disadvantages, and applications of green hydrogen are explained.

It is essential to understand the process of green hydrogen to really know what it is and why it can be so interesting and beneficial from a renewable energy perspective as planned in the future.

In addition, the future plans that await green hydrogen in Spain and in Europe are presented.

In both cases, the measures planned for two different time horizons, medium and long term, specifically 2030 and 2050, are explained.

Despite the existence of a roadmap for green hydrogen in Spain, circumstances have changed a great deal since it was drawn up in 2020 and, therefore, certain expectations established therein have been extended.

Spain is positioned as one of the countries with the greatest potential for the green hydrogen world due to the importance of renewable energy in the country and attractive implementations related to green hydrogen in industry, transport and other important sectors are forecast.

On the other hand, from the European point of view, plans such as REPowerEU aim to rapidly reduce Russia's dependence on fossil fuels by accelerating the transition to clean energy.

It is worth highlighting the importance of the European Hydrogen Backbone, an initiative in which numerous countries of the continent are participating, based on the creation of a network of gas pipelines and infrastructures that enable and facilitate the transport of hydrogen across the continent, in order to subsequently achieve the creation of a thriving renewable hydrogen market.

3. Theoretical background

This section is divided into three sub-sections, each of which explains a concept that is important and necessary to understand for the project.

We must know what a commodity is and what it means to become one, as hydrogen will probably be considered as such in the coming years.

Secondly, the concept of energy vector is essential to understand the potential of green hydrogen and to understand all the possible avenues of development that this concept allows us.

To finish this theoretical part, we have a more technical concept which is the LCOH (Levelised Cost of Hydrogen) which is basically the normalised cost of hydrogen, i.e. how much a kilo of hydrogen costs in euros, however, this concept is associated with other types of necessary factors which are also explained and an example is given to facilitate its understanding.

4. Methodology

The methodology sets out the way in which it has been decided to carry out the analysis and study of the project. It explains what a regression analysis and an analysis of variance (ANOVA) are, as both have been the statistical tools used to study the data of various commodities in comparison with the price assessments selected from the S&P Platts platform.

It was decided to select the commodities: coal, natural gas and oil, to use their historical price as independent variables in the regression analysis and two different analyses were carried out with different dependent variables, which were the price of non-renewable hydrogen and the price of green hydrogen.

5. Data analysis

The selected commodity prices are selected to be used for the regression analysis and ANOVA. The Brent barrel and Rotterdam coal were selected as both commodities are closely related to Europe. The price used for the natural gas variable was the Henry Hub price, as it is a reference for the price of natural gas futures contracts at European and global level.

The first analysis is carried out with the price of hydrogen produced by steam reforming and without emission capture as the response variable and the prices of the three commodities mentioned as independent variables.

The second analysis has been set up with the same independent variables as the previous one and the price of green hydrogen generated by alkaline-type electrolysis as the dependent variable.

In this way we have different views on how the prices of coal, natural gas and oil influence two different types of hydrogen.

6. Analysis of results

The results are interpreted with different statistical concepts such as coefficients of determination, standard errors, Fischer's F... as the following summary table.

RESUMEN	
<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,7607519
Coefficiente de determinación R^2	0,578743453
R^2 ajustado	0,576230989
Error típico	3,867209348
Observaciones	507

The multiple correlation matrices between the variables are also presented in order to determine the influence of one on the other.

Observing the results obtained, it can be seen that the model generated with the regression analysis that has the price of hydrogen generated by steam reforming as the response variable adapts better to the price fluctuations of the three commodities than the price of green hydrogen generated by alkaline electrolyser technology.

Specifically, 68.094% of variations in the price of hydrogen produced by steam reforming can be explained by changes in the prices of natural gas, oil and coal, compared to 57.874% in the case of regression analysis with the dependent variable being the price of green hydrogen.

7. Conclusions

With the completion of this project, it is possible to explain the importance and potential of hydrogen, especially green hydrogen, which will be a key element in the energy development of the future.

The influence of the war in Ukraine and Russia has generated an acceleration in the field of green hydrogen, which has influenced the medium and long term plans in Spain and above all in Europe.

Although today the LCOH of green hydrogen cannot compete with non-renewable hydrogen, as time progresses an economy of scale will be created around green hydrogen that will lead to a reduction in the cost of green hydrogen, which will help to make it more competitive, while hydrogen that produces carbon emissions will increase in price due to the importance of reducing the carbon footprint on the planet.

It has been possible to indicate what influence other commodities have on hydrogen, which helps to know how hydrogen could behave as a new commodity.

The regression model of green hydrogen has worse results than hydrogen from steam reforming for several reasons, such as the fact that fossil fuels themselves are involved in the steam reforming process. However, it is important to note that the fluctuation of oil, natural gas and coal influences the price variation of green hydrogen.

References

- [1] International Renewable Energy Agency, IRENA (2023). “Renewable capacity statistics 2023.”
- [2] Figuerola-Ferretti, I., McCrorie, J. R., & Paraskevopoulos, I. (2020). Mild explosivity in recent crude oil prices. *Energy Economics*, 87, 104387.
- [3] Deaton, A., & Laroque, G. (1992). On the behaviour of commodity prices. *The review of economic studies*, 59(1), 1-23.
- [4] International Energy Agency, IEA (2022). “Global hydrogen review 2022”

Índice

1. Introducción.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Motivación.....	2
2. Estado del arte	4
2.1 Emisiones de carbono	4
2.2 Energías: renovables y no renovables	7
2.3 Hidrógeno	12
2.4 Tipos de hidrógeno	16
2.5 Hidrógeno verde	19
2.5.1 Situación en España.....	28
2.5.2 Situación en Europa.....	31
3. Fundamento teórico	36
3.1 Commodity	36
3.2 Vector energético.....	37
3.3 LCOH	38
4. Metodología.....	43
4.1 Análisis de regresión	44
4.2 Análisis de varianza.....	47
5. Análisis de datos.....	48
5.1 Hidrógeno SMR.....	56
5.2 Hidrógeno verde	60
6.1 Hidrógeno SMR.....	64
6.2 Hidrógeno verde	65
6.3 Comparación de resultados.....	65
7. Conclusiones.....	68
8. Anexos.....	71
9. Bibliografía.....	73

Índice ilustraciones

Gráfico 1: Evolución de emisiones de carbono globales. Fuente: Global Carbon Atlas..	5
Gráfico 2: Clasificación por países según la cantidad de emisiones de CO2. Fuente: Global Carbon Atlas	6
Tabla 1: Energía eléctrica generada en el mundo en el año 2020. Fuente: Elaboración propia.....	7
Gráfico 3: Evolución de generación de energía eléctrica en el mundo desde 1990-2020. Fuente:IEA.....	8
Tabla 2: Energía eléctrica generada en Europa en el año 2020. Fuente: Elaboración propia.....	9
Gráfico 4: Energía generada en Europa desde 1990-2020. Fuente:IEA.....	10
Tabla 3: Energía eléctrica generada en España en el año 2021. Fuente: Elaboración propia.....	11
Gráfico 5: Energía generada en España desde 1990-2020. Fuente:IEA.....	11
Imagen 1: Símbolo químico del hidrógeno	13
Imagen 2: Molécula de agua H ₂ O.....	14
Imagen 3: Diagrama de flujo del proceso steam reforming	16
Imagen 4: Clasificación de hidrógeno por colores	19
Imagen 5: Electrólisis del agua.....	21
Imagen 6: Proceso completo de producción de H ₂ verde.....	22
Imagen 7: Pila de combustible.....	27
Imagen 8: Principales magnitudes de la ELP en 2050	30
Imagen 9: Resumen de REPowerEU.....	33
Imagen 10: Mapa previsto para la EHB en 2040.....	35
Gráfico 6: Evolución de precios de hidrógeno verde durante los próximos 30 años. Fuente: IRENA	41
Gráfico 7: Evolución de precios de hidrógeno por tecnologías de producción. Fuente: IRENA	41
Gráfico 8: Porcentajes totales de producción de hidrógeno en 2022. Fuente: Elaboración propia.....	48
Gráfico 9: Precio del barril brent durante los dos últimos años Fuente: Factset.....	49
Gráfico 10: Precio del gas natural durante los dos últimos años. Fuente: Factset	50

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

Gráfico 11: Precio del carbón Rotterdam durante los dos últimos años. Fuente: Factset	51
Gráfico 12: Precio del hidrógeno producido mediante steam reforming en Países Bajos. Fuente: S&P Platts	52
Gráfico 13: Precio del hidrógeno verde producido con electrolizadores alcalinos en Países bajos. Fuente: S&P Platts	54
Gráfico 14: Precio del hidrógeno verde producido con electrolizadores PEM en Países Bajos. Fuente: S&P Platts	55
Gráfico 15: Diagramas de dispersión simple entre la variable SMR y resto de variables independientes. Fuente: Elaboración propia	57
Imagen 11: Cuadro resumen de análisis de regresión de hidrógeno SMR. Fuente: Elaboración propia	57
Imagen 12: Análisis de varianza de hidrógeno SMR y las variables x1, x2, x3. Fuente: Elaboración propia	58
Imagen 13: Matriz de correlaciones entre SMR, x1, x2 y x3. Fuente: Elaboración propia	59
Gráfico 16: Diagramas de dispersión simple entre la variable HV y resto de variables independientes. Fuente: Elaboración propia	61
Imagen 14: Cuadro resumen de análisis de regresión de hidrógeno HV. Fuente: Elaboración propia	61
Imagen 15: Análisis de varianza de hidrógeno HV y las variables x1, x2, x3. Fuente: Elaboración propia	62
Imagen 16: Matriz de correlaciones entre HV, x1, x2 y x3. Fuente: Elaboración propia	63

1.Introducción

1.1 Objetivos

Este proyecto tiene como principal objetivo el análisis y estudio del hidrógeno como commodity.

Para conseguir este objetivo se estudiará qué precios tiene el hidrógeno según su tipo. Se realizará un análisis en el que se observará el grado de influencia de ciertas commodities tradicionales y establecidas en el mercado durante años como son gas natural petróleo o carbón; sobre distintos tipos de hidrógeno.

De igual manera, se esperan cumplir ciertos objetivos secundarios como transmitir el concepto de vector energético que es la principal razón por la que se ha postulado el hidrógeno como una nueva commodity. Del mismo modo, se observará las fluctuaciones de precio del hidrógeno y se apreciará la influencia de la tecnología presenta a la hora de generar hidrógeno para ver el precio resultante del mismo.

Se pretende transmitir la importancia del hidrógeno verde tanto en el presente como en el futuro ya que juega un papel esencial en el hecho que se pueda regular y crear un mercado del hidrógeno.

Durante la realización del proyecto se verá a que desafíos debe enfrentarse el hidrógeno, las posibles soluciones para afrontar los problemas que existan es por ello por lo que otro objetivo consiste en saber qué situación existe actualmente con el hidrógeno en España y también en Europa, ver qué distintas posibilidades existen para el hidrógeno y qué caminos han decidido tomarse, en un futuro a corto y largo plazo.

A su vez, con la lectura del proyecto se espera que se pueda realizar un pequeño aprendizaje acerca de la energía sin ser ningún experto en el mismo, puesto que es un tema cada vez más relevante en el ciudadano de a pie debido a su reciente aumento de notoriedad en la sociedad por su inestabilidad que genera alteraciones en la economía diaria.

1.2 Motivación

La motivación esencial de la realización de este proyecto es naturalmente debida a la situación energética actual que estamos viviendo en el mundo, en Europa y también lógicamente en España.

Con los recursos con los que se disponen actualmente, están existiendo problemas energéticos y nos hallamos sumidos en una crisis energética y el ser humano siempre destaca por tener una gran capacidad de adaptación, es por ello por lo que, quizás la forma de adaptarnos a estos problemas puede que sea por el camino del hidrógeno.

El hidrógeno es el elemento más común de la tierra por lo que hablar de él no debe resultar novedoso. En cambio, cuando hablamos de hidrógeno en proyectos de ingeniería actuales, en la mayoría de las ocasiones nos estamos refiriendo a hidrógeno verde, el cual sí es un tema relativamente innovador y por lo que en el título de este proyecto se habla de él como nuevo commodity.

La capacidad de ser vector energético sumado a la posibilidad de generar hidrógeno verde provoca un atractivo internacional en el mundo de la ingeniería y la energía, por ello cada vez son más las empresas energéticas involucradas en este segmento y que promueven el hidrógeno verde.

Se están comenzando a realizar cada vez más proyectos de energía renovables relacionados con hidrógeno verde, tanto a nivel nacional como a nivel mundial, pues gracias a él se consigue eliminar cierta parte de las emisiones de carbono que producen otros tipos de hidrógeno.

Durante la realización del proyecto ha incrementado mi interés personal hacia proyectos de hidrógeno verde que obviamente están relacionados con energía renovable y es por ello que, me gustaría comenzar mi carrera profesional por esta rama de la ingeniería ya que el hecho de trabajar en el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde que permiten mejorar la situación medioambiental del planeta es una de las cosas que me resultan valiosas y por las que merece la pena esforzarse.

Por todo esto, me resulta muy atractivo la realización de este trabajo de fin de máster que me permite investigar y conocer más a fondo el hidrógeno y lo que nos puede aportar o los retos que deberá enfrentar en el futuro.

2. Estado del arte

2.1 Emisiones de carbono

Es imprescindible saber el efecto de las emisiones de carbono sobre el planeta Tierra. Principalmente al hablar de emisiones de carbono nos referimos al dióxido de carbono, cuya fórmula química es CO_2 y se libera a la atmósfera como resultado de algunas actividades naturales, pero esencialmente la actividad humana es la causante de la mayoría de CO_2 presente en la atmósfera.

Los principales culpables señalados a la hora de hablar de este tema son los combustibles fósiles, si bien han servido al ser humano como fuente de energía para avanzar tecnológicamente hasta donde estamos hoy en día; también se ha observado sus consecuencias negativas que no pueden ser desatendidas pues eso tendría consecuencias fatales para el mundo.

Los efectos negativos que generan las emisiones de carbono son diversos y cada vez se hacen notar más en el planeta. El primero que se percibe es el calentamiento global, el cual es producido por los gases de efecto invernadero, en los que el CO_2 participa activamente, que genera un aumento de la temperatura global de la Tierra provocando impactos como el derretimiento de los casquetes polares, aumento del nivel del mar y cambios en patrones climáticos que acaban desembocando en climas extremos que afectan a humanos y naturaleza en distintos aspectos como agricultura, salud humana o ecosistemas.

Otro efecto negativo es la acidificación de los océanos ya que el CO_2 que se emite a la atmósfera también es absorbido por los océanos causando problemas en corales moluscos, ya que dificulta su capacidad para formar y mantener sus estructuras calcáreas. En general, no solo da problemas en los océanos, sino que estas emisiones de carbono pueden llevar a la pérdida de biodiversidad, extinciones de especies y desequilibrios en los ecosistemas.

Por último, existen los impactos en la salud humana calentamiento global y los cambios en los patrones climáticos relacionados con las emisiones de carbono tienen impactos directos e indirectos en la salud humana, se observa en problemas como la calidad del aire, la seguridad alimentaria y el acceso a agua potable.

Por supuesto, que no se ha llegado a esta situación de forma instantánea si no que ha sido debido a un largo proceso y uso de combustibles fósiles. Por esto observaremos a continuación un gráfico de la evolución de emisiones de carbono globales y veremos cómo en los últimos años se ha incrementado notablemente la cifra por lo que el ser humano está obligado a tomar medidas.

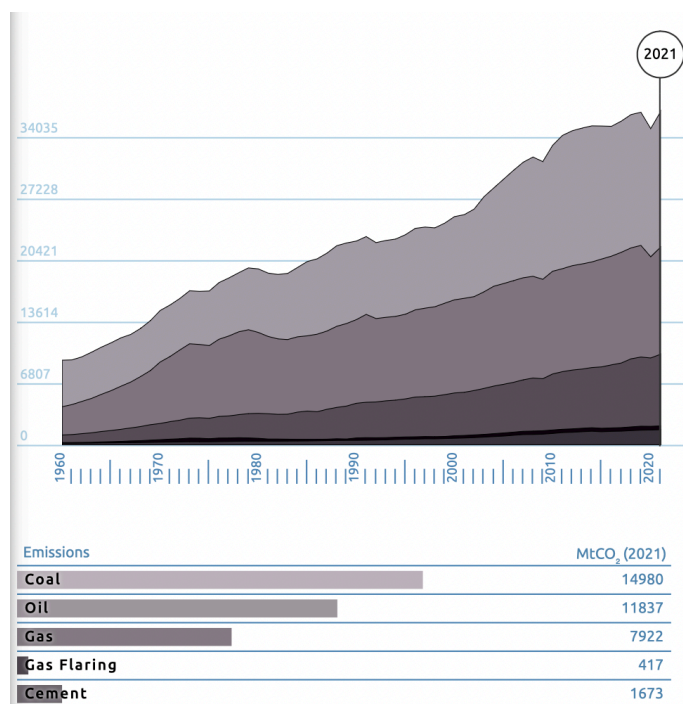


Gráfico 1: Evolución de emisiones de carbono globales. Fuente: Global Carbon Atlas

Se aprecia la evolución desde el año 1960 hasta la actualidad, podemos ver como con el paso del tiempo la pendiente de emisiones de carbono cada vez se está haciendo más pronunciada. De hecho, más del 50% de emisiones de carbono ocurrieron en los últimos 30 años.

En el gráfico se observa que en el año 2021 se superó la cifra de 34.000 millones de toneladas de CO₂ de las cuales la mayor parte procede debido al carbón seguido del petróleo y del gas natural.

Por otro lado, es interesante saber de dónde proceden estas emisiones, en otras palabras, qué países están contribuyen en mayor medida a la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera.

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

A continuación, se mostrará un gráfico de barras que nos desvelará este tipo de información con una clasificación de los 19 países que generan más emisiones de carbono.

Rank	Country	MtCO ₂
1	China	11472
2	United States of America	5007
3	India	2710
4	Russian Federation	1756
5	Japan	1067
6	Iran	749
7	Germany	675
8	Saudi Arabia	672
9	Indonesia	619
10	South Korea	616
11	Canada	546
12	Brazil	489
13	Turkey	446
14	South Africa	436
15	Mexico	407
16	Australia	391
17	United Kingdom	347
18	Italy	329
19	Poland	329

Gráfico 2: Clasificación por países según la cantidad de emisiones de CO₂. Fuente: Global Carbon Atlas

Es muy llamativo el hecho de que China lidera esta clasificación por mucha diferencia de hecho, emite más del doble que el segundo país que sería Estados Unidos. Se puede apreciar que las grandes potencias mundiales son los primeros en esta lista, tenemos también ciertos países de Europa como Alemania, Reino Unido, Italia o Polonia. Otro dato que debemos atender es que dentro del top 10, existen 5 países asiáticos señalados en color rosa en el gráfico.

Actualmente, aunque no se muestra en el gráfico, nuestro país, España, ocupa el puesto 27 en el ranking global de emisiones de carbono.

La mejor manera para combatir este problema de emisiones es la energía renovable. El ser humano ya se ha puesto a trabajar para revertir la situación y el término de energía renovable está inculcado en la sociedad por lo que no resulta novedoso para el ciudadano de a pie.

2.2 Energías: renovables y no renovables

Se entiende como energía renovable todo aquella energía que procede de fuentes naturales y son virtualmente inagotables y tienen un impacto mínimo en el medio ambiente en comparación con las fuentes de energía convencionales, como los combustibles fósiles. Se destacan tipos como energía solar, eólica, hidroeléctrica, e biomasa o geotérmica.

Puesto que uno de los caminos más importante que se han emprendido para reducir la emisión de carbono son las energías renovables, resulta interesante saber qué cantidades y magnitudes se manejan en el mundo, Europa o nuestro país.

A continuación, se mostrarán una tablas donde se desglosan la generación de energía eléctrica según la tecnología utilizada para su producción en el mundo, en Europa y en nuestro país. Del mismo modo, esta información también se acompañará de diversos gráficos que ayudan a apreciar cómo se han implementado las energías renovables en las últimas décadas.

WORLD TOTAL	GWh
Coal	9.452.492
Oil	667.949
Natural gas	6.334.959
Biofuels	571.295
Waste	113.312
Nuclear	2.673.939
Hydro	4.453.011
Geothermal	94.944
Solar PV	823.782
Solar thermal	13.715
Wind	1.598.080
Tide	989
Other sources	34.178
Total	26.832.645

Tabla 1: Energía eléctrica generada en el mundo en el año 2020. Fuente: Elaboración propia

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

La generación de energía eléctrica en el año 2020 alcanzó 26.832.645 GWh de los cuales gran parte procede de fuentes de energía no renovable. Si sumamos la energía renovable generada se alcanzan 6.984.521GWh que viene a representar un 26,03% del total.

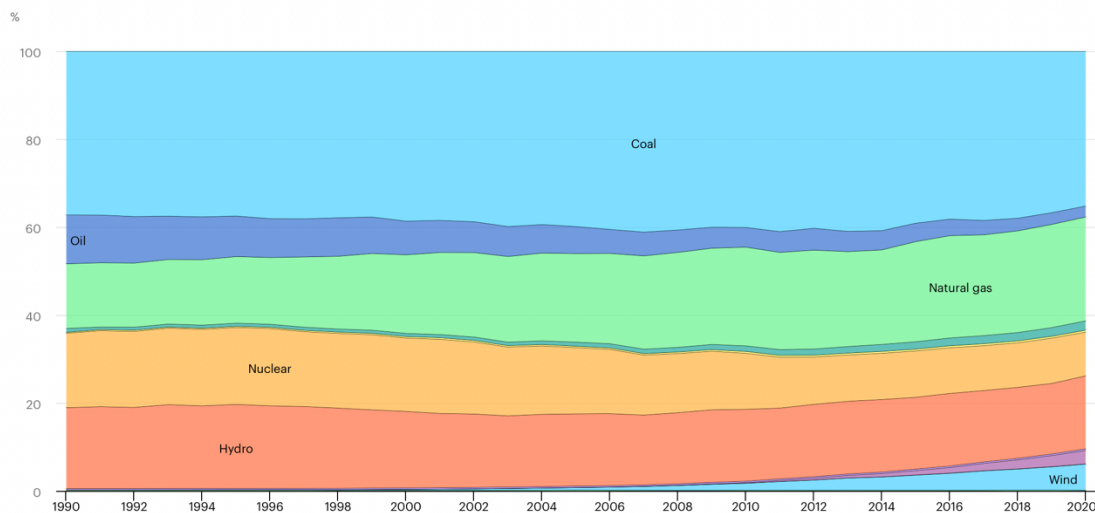


Gráfico 3: Evolución de generación de energía eléctrica en el mundo desde 1990-2020. Fuente:IEA

Este gráfico permite ver la progresión que han realizado las energías renovables, así como la variación porcentual de cada tipo de tecnología a lo largo de los últimos 30 años.

La presencia de la energía hidroeléctrica, representada por el color rojo en el gráfico, lleva instaurada en el sistema energético desde mucho tiempo, podría decirse que es la primera fuente de energía renovable que se utilizó a gran escala. No será hasta principios de los 2000 cuando comienzan a irrumpir nuevas energías renovables que ya están sólidamente implementadas en la actualidad como son la energía eólica representada en azul y la energía solar fotovoltaica o térmica que se representan con el color morado.

No obstante, a pesar del aumento de las renovables a nivel mundial, más del 60% de la generación de energía sigue recayendo en la participación de los combustibles fósiles principales como son el carbón, petróleo y gas natural.

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

EUROPE	GWh
Coal	603.377
Oil	52.581
Natural gas	849.708
Biofuels	185.625
Waste	52.696
Nuclear	834.356
Hydro	687.476
Geothermal	22.706
Solar PV	175.775
Wind	513.157
Tide	520
Other sources	6.601
Solar thermal	5.630
Total	3.990.208

Tabla 2: Energía eléctrica generada en Europa en el año 2020. Fuente: Elaboración propia

Entramos en nuestro continente, Europa y vemos la información que recoge la tabla superior. Con 3.990.208GWh de los 26.832.645 GWh que se generan en el mundo, quiere decir que Europa participa en un 14,87% en la generación de energía global.

Sumando toda la aportación de su energía renovable se alcanza unos 1.405.264GWh de generación de energía lo que constituye un 35,21% del toda la generación del continente europeo.

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

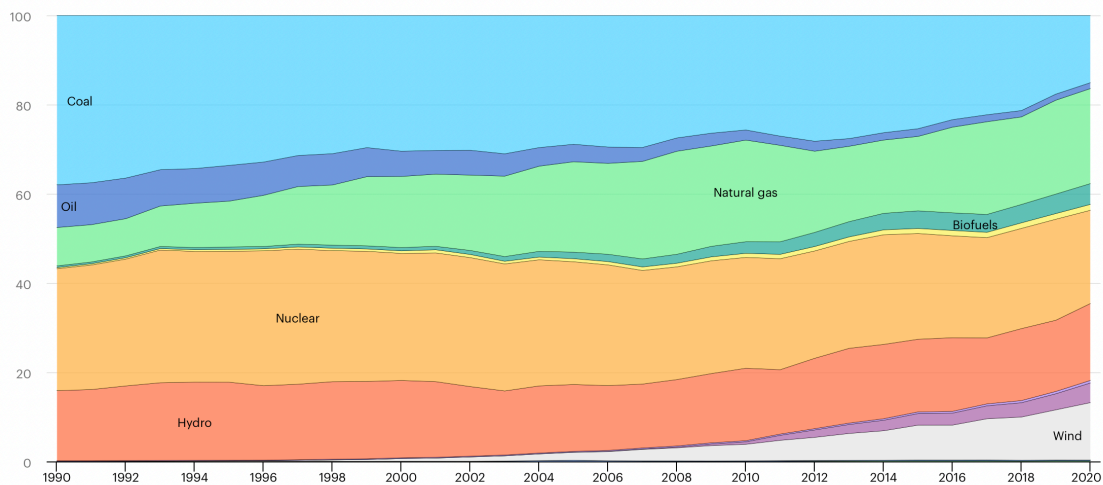


Gráfico 4: Energía generada en Europa desde 1990-2020. Fuente: IEA

Durante los últimos 30 años ha existido una gran presencia en Europa de combustibles fósiles al igual que en el resto del mundo, pero sí es verdad que en los últimos diez o quince años se aprecia como la pendiente de las energías renovables en el gráfico se hace cada vez más pronunciada en comparación con lo que veíamos en el gráfico mundial.

Actualmente se podría decir que los combustibles fósiles ocupan en torno un 40% de la generación, comparado con el 60% de generación que veíamos en el gráfico anterior se puede afirmar que Europa está trabajando a favor de las energías renovables para evitar los efectos perjudiciales de la emisión de carbono.

También existe un gran porcentaje generado mediante energía nuclear que en sus puntos fuertes hay que destacar la no misión de huella de carbono por lo que quizás se apueste en el futuro por esta energía por delante de los combustibles fósiles.

Para terminar este apartado, veremos las estadísticas de generación de energía en España en la tabla que se muestra acto seguido:

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

SPAIN TOTAL	GWh
Coal	6.013
Oil	10.029
Natural gas	71.625
Biofuels	6.068
Waste	1.797
Nuclear	56.564
Hydro	32.847
Solar PV	21.584
Wind	62.229
Other sources	184
Solar thermal	5.175
Tide	19
Total	274.134

Tabla 3: Energía eléctrica generada en España en el año 2021. Fuente: Elaboración propia

En 2021 se generaron 274.134GWh en el territorio nacional. Lo que representa un 6,87% de la generación en Europa y comparándolo con el mundo, representa un 1,02%.

Si sumamos todos los aportes de energía renovable que hay en nuestro país nos encontramos que en el año 2021 se generaron gracias 121854GWh a este tipo de energía.

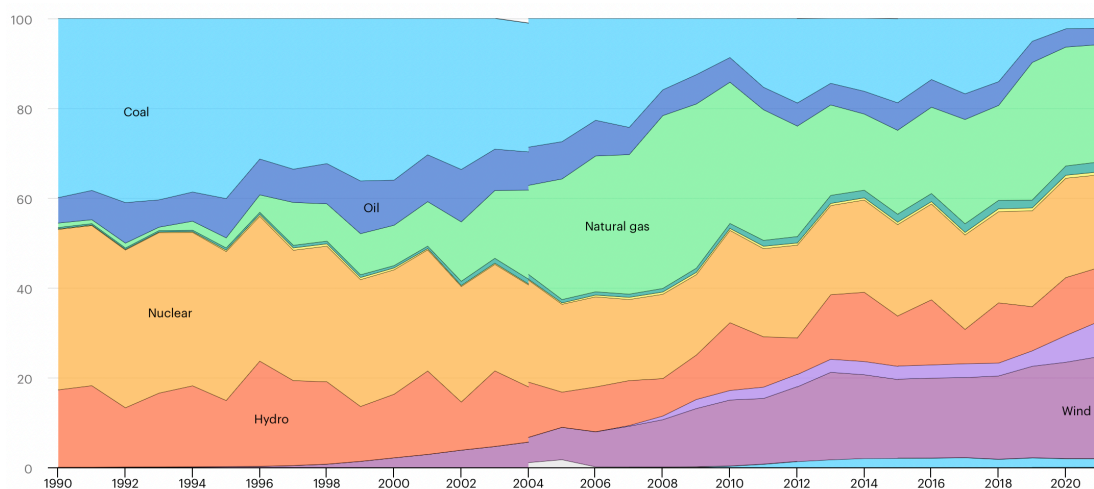


Gráfico 5: Energía generada en España desde 1990-2020. Fuente: IEA

En el gráfico se ve como al final de este se ha conseguido que la suma de las energías renovables esté por encima del 40%, concretamente han sido capaces de generar el 44,45% un dato esperanzador pues se acerca mucho a empezar a tener una mayoría de generación renovable en España.

El mundo se ha dado cuenta que, siguiendo el camino energético que llevamos, el planeta sufrirá duras consecuencias y, por ende, las futuras generaciones del ser humano también. Es por ello por lo que, al darnos cuenta de que no estábamos remando en la dirección correcta, decidimos cambiar el rumbo mediante diversas medidas, una de las más importantes es el uso de energías renovables.

Dentro del amplio ámbito de energía renovables destacan energía eólica, fotovoltaica, hidroeléctrica... este tipo de energías están bien establecidas en la actualidad y se ha apostado por ellas de forma clara en países preocupados por la transición energética. Aun así, los ingenieros continúan la búsqueda de nuevas formas de producir energía renovable, en esta búsqueda ha surgido el hidrógeno como un elemento más que interesante para poder convertirse en un pilar de la energía durante los años futuros.

2.3 Hidrógeno

Este elemento de la tabla periódica fue descubierto por el científico Henry Cavendish quién pasó toda su vida dedicado a la ciencia a la que aportó diversos hallazgos y uno de los más importantes fue el que está relacionado con este proyecto es el descubrimiento del hidrógeno en el año 1766. La forma en la que consiguió este descubrimiento fue la siguiente: tomó partículas del mineral zinc que posteriormente mezcló con ácido clórico dando lugar a un gas al que llamó gas inflamable que a día de hoy, conocemos como hidrógeno.

Se sitúa como el primer elemento de la tabla periódica debido a su masa atómica que es 1,008 g/mol siendo así el elemento químico más ligero y se representa de forma abreviada por la letra H.



Imagen 1: Símbolo químico del hidrógeno

Entre sus propiedades destaca que condiciones normales es un gas incoloro, inodoro, insípido e inflamable, de hecho es el elemento más inflamable conocido. Su punto de ebullición está en $-257,9^{\circ}\text{C}$ y su punto de fusión en $-259,2^{\circ}\text{C}$ y tiene una densidad de $0,071\text{g/ml}$

Toda esta información se conoce a día de hoy y está al alcance de cualquier persona, pero para conseguir sacar rendimiento energético del hidrógeno hemos tenido que pasar por diversos acontecimientos y descubrimientos que nos han llevado a la situación actual.

Tras el descubrimiento del elemento químico, llegamos a 1800 donde se descubre la electrolisis del agua de la mano de William Nicholson y sir Anthony Carlisle. Posteriormente se explicará este proceso con mayor profundidad en el proyecto, pero de forma resumida, sirve para separar el hidrógeno del agua.

De nuevo saltamos en el tiempo hasta 1839 donde el británico sir William Grove será capaz de montar la primera pila de combustible, aunque este término como tal no se utilizará hasta 1899. Básicamente, demostró que la combinación de hidrógeno y oxígeno generaba electricidad además de agua y calor.

Con la llegada de 1920, viene también la creación de los primeros motores de combustión interna de hidrógeno y posteriormente este tipo de motores desarrollaran un papel muy importante en la década de los 60 en la carrera espacial debido a la eficiencia derivada de su calor de combustión, llegando a ser tres veces superior al queroseno.

Años después, en 1968 un ingeniero alemán sugirió la idea de utilizar el hidrógeno como posible sustitutivo al gas natural, ya claramente establecido durante esta época, pero como el tiempo ha demostrado no prosperó de forma adecuada.

A pesar de ser uno de los elementos más abundantes en la Tierra, e incluso del Universo ya que constituye el 75% de la materia de este, en nuestro planeta tenemos el inconveniente de que se encuentra combinado con otros elementos como el oxígeno formando moléculas de agua o carbono para así formar compuestos orgánicos. Por ello necesitaremos diversos métodos para producirlo.

Concretamente, el agua destaca en un método para producir hidrógeno y es un elemento que abunda en el planeta Tierra y juega un papel muy importante que veremos con mayor profundidad durante el trabajo. Como es bien sabido por todos, dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno forma la molécula de agua también conocida como H_2O

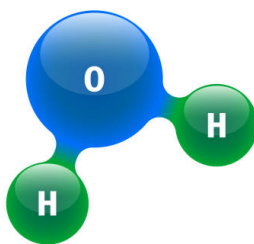


Imagen 2: Molécula de agua H_2O

En este proyecto se tratará de analizar la situación global del hidrógeno. Se estudiará la viabilidad que existe a la hora de realizar una transición hacia el hidrógeno verde. El hidrógeno verde puede ser utilizado como vector energético, por lo que si conseguimos desarrollar su potencial se multiplican sus posibilidades en el mundo de la energía como sustitutivo de grandes fuentes de energía.

A lo largo del proyecto se hablará en numerosas ocasiones del concepto vector energético, por lo que me gustaría aclararlo en esta introducción para que así sea más fácil la comprensión del proyecto.

Es trascendental comprender tanto la definición de hidrógeno como ciertos conceptos que lo rodean para ser capaz de profundizar en nuestro elemento. Cuando hablamos de hidrógeno en este trabajo y en el mundo energético no nos referimos simplemente al elemento H que sería un único átomo de hidrógeno, sino que estamos haciendo referencia a la molécula de hidrógeno, es decir, H₂, la cual es imposible de encontrar en la naturaleza por lo que es necesario producirla para poder sacar partido del potencial que engloba el hidrógeno. En condiciones normales, H₂ se encuentra en estado gaseoso.

Del mismo también resultan importantes conceptos como los distintos tipos de hidrógeno que hay, los problemas que le rodean o las formas de producción y utilización de hidrógeno que veremos a continuación.

El proyecto quiere enfocarse en la importancia y el potencial que tiene el hidrógeno verde pues en una gran apuesta para el futuro energético del planeta, pero si nos ceñimos a la actualidad queda mucho camino por recorrer, ya que aproximadamente el 95% de hidrógeno producido a día de hoy se hace mediante un proceso conocido como “steam reforming”.

El proceso de reformado con vapor o “steam reforming” del gas natural para generar hidrógeno, también conocido como reformado de metano con vapor de agua, es una reacción química que se lleva a cabo a alta temperatura y en presencia de un catalizador de níquel. El metano (CH₄) del gas natural reacciona con el vapor de agua (H₂O) para producir hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO) a través de la siguiente reacción endotérmica.



Después de la reacción, los productos gaseosos, que contienen hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y trazas de otros componentes, se enfrían y se someten a un proceso de purificación para eliminar impurezas como el CO₂ y el CO. Esto se puede lograr a través de técnicas de absorción, adsorción o membranas selectivas.

Finalmente, el hidrógeno puro se recoge y se almacena para su uso en diversas aplicaciones industriales, como la producción de amoníaco, refinerías de petróleo y celdas de combustible

En algunos casos existirá captura del CO₂ emitido y en otros casos no, es un factor importante pues determinará el tipo de hidrógeno que estemos produciendo.

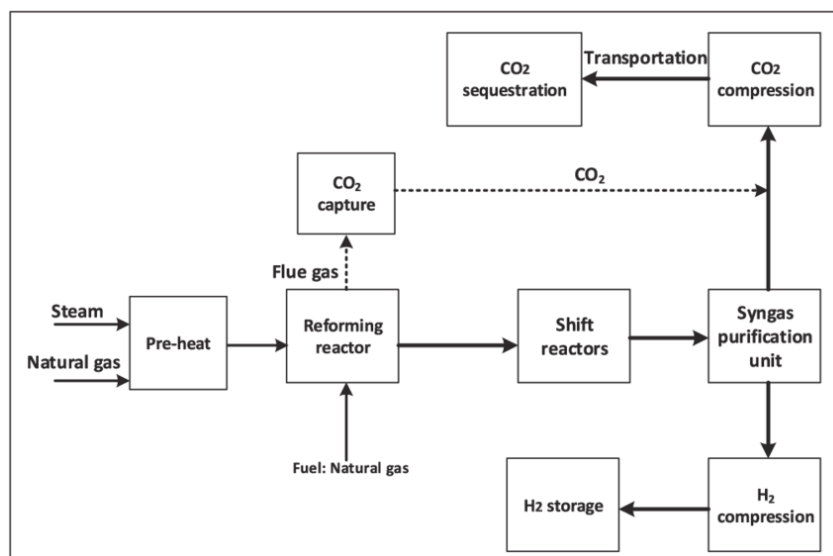


Imagen 3: Diagrama de flujo del proceso steam reforming

2.4 Tipos de hidrógeno

Existe una clasificación que depende de la forma que se haya producido el hidrógeno. A pesar de que el producto final, es decir, el hidrógeno es el mismo independientemente del proceso que se haya realizado para conseguirlo, es la gran diferencia que decanta la balanza del camino energético hacia un tipo u otro. Se diferencian hasta 9 tipos distintos de hidrógeno como vemos a continuación:

- **Con emisiones de dióxido de carbono:**

1. **Hidrógeno negro:** la fuente de energía que se utiliza para producir hidrógeno es carbón y el proceso generalmente es gasificación del carbón generando emisiones muy altas.

2. **Hidrógeno gris:** se produce mediante hidrocarburos, suele ser mediante gas natural y el proceso de fabricación que utilizamos para este hidrógeno es la extracción con vapor; al igual que en el color anterior también tenemos altas emisiones.
 3. **Hidrógeno marrón:** en esta ocasión el material que se utiliza principalmente es lignito y el proceso vuelve a ser la gasificación del carbón que por ende genera emisiones muy elevadas.
 4. **Hidrógeno naranja:** se encuentra en un proceso experimental por lo que todavía no se ha llevado a cabo de forma industrial y se produce utilizando como fuente de energía residuos y al terminar el proceso no se realiza ningún tipo de captura del CO₂ emitido, por ello se encuentra en este grupo.
- **Bajas emisiones de dióxido de carbono o generación de residuos:**
5. **Hidrógeno rosa:** para conseguir este tipo se realiza un proceso de electrólisis gracias a la energía nuclear, no resulta tan interesante como el hidrógeno verde para nuestro proyecto ya que genera cierta cantidad de residuos nucleares por la energía que utiliza, pero también destaca entre los tipos de hidrógeno interesantes a desarrollar en el medio plazo.
 6. **Hidrógeno azul:** se produce mediante el uso de gas natural en un proceso de extracción con vapor, pero a diferencia del hidrógeno gris las emisiones de CO₂ son menores pues se incluye un sistema de captura de este dióxido de carbono que diezma las emisiones en cierto modo.
 7. **Hidrógeno turquesa:** utiliza de nuevo el gas natural, aunque cambia el proceso respecto del color azul y en esta ocasión utiliza pirólisis de manera que las emisiones producidas son bajas y se componen de carbono sólido en vez de dióxido de carbono.
 8. **Hidrógeno ámbar:** como el hidrógeno naranja de momento se trata como algo experimental, utiliza residuos como fuente de energía sumado a que se realiza una captura de emisiones al final del proceso reduciendo estas en cierta medida.

- **Sin emisiones de dióxido de carbono:**

9. **Hidrógeno verde:** la piedra angular que determinará el futuro potencial de la tecnología e ingeniería que se desarrolle acerca del hidrógeno como vector energético. Para producir este tipo de hidrógeno se utiliza energía renovable y a diferencia de los hidrógenos anteriores no se generan ningún tipo de emisión
10. **Hidrógeno amarillo:** este color simplemente indica que la energía que se ha utilizado para producirlo ha sido fotovoltaica.
11. **Hidrógeno blanco:** se ha designado este color para el hidrógeno que se encuentra directamente en la naturaleza por lo que tampoco produciría emisiones. De momento esto no ha sido posible todavía, pero es un campo que se encuentra en exploración

A pesar de existir una amplia clasificación según la manera en la que haya sido producido el hidrógeno, la gran mayoría de hidrógeno se produce con procesos en los que interviene el gas natural, concretamente un 95% del hidrógeno global, esto indica que queda mucho camino que recorrer hacia el hidrógeno verde en este aspecto.

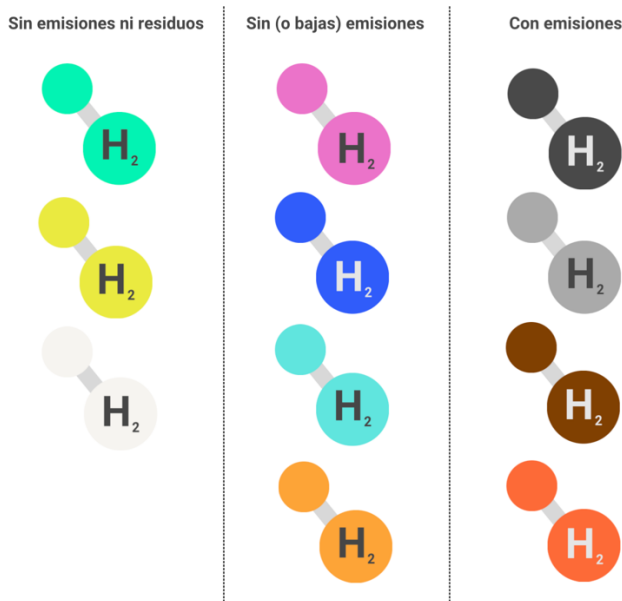


Imagen 4: Clasificación de hidrógeno por colores

2.5 Hidrógeno verde

La piedra angular este trabajo de fin de máster, por ello merece una explicación más extensa que el resto de los tipos de hidrógenos.

Se entiende como hidrógeno verde todo aquel hidrógeno que haya sido producido gracias a las energías renovables, generalmente se utiliza eólica o fotovoltaica, aunque cualquier energía renovable sería perfectamente válida. Al igual que esta energía renovable es indispensable para nuestro H₂ verde también lo es un proceso químico que se llama electrólisis en el que interviene tenemos un protagonista muy importante que es el agua también conocido por su fórmula química H₂O.

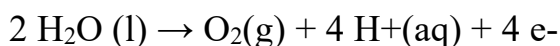
Electrólisis

La electrólisis puede realizarse en otros medios que no sean sólo agua, pero nos centraremos en electrólisis del agua que es la necesario para obtener nuestro H₂ verde.

Es un proceso en el cual se descompone el agua en sus componentes básicos, oxígeno e hidrógeno, mediante la aplicación de una corriente eléctrica que ha sido generada gracias a energías renovables.

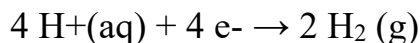
Durante la electrólisis del agua, se utilizan dos electrodos, un ánodo y un cátodo, que se sumergen en una solución de agua y se conectan a una fuente de energía eléctrica. En el ánodo, la reacción de oxidación del agua se produce y se libera oxígeno. Mientras tanto, en el cátodo, la reacción de reducción del agua se produce y se libera hidrógeno

La reacción de oxidación en el ánodo es:



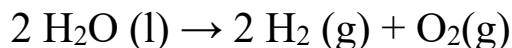
En esta reacción, dos moléculas de agua se descomponen en una molécula de gas oxígeno, cuatro protones (iones H^+) y cuatro electrones (e^-)

La reacción de reducción en el cátodo es:



En esta reacción, cuatro protones y cuatro electrones se combinan para formar dos moléculas de gas hidrógeno.

De forma que todo esto se resume con una reacción global en la que se consiguen separar el H_2 del O.



En esta reacción, dos moléculas de agua líquida (H_2O) se descomponen en dos moléculas de gas de hidrógeno (H_2) y una molécula de gas oxígeno (O_2).

Los procesos de generación de hidrógeno a partir del agua, mediante electrolisis, tienen una baja eficiencia energética, del orden del 50%, previéndose que pueda llegar, en el largo plazo, hasta el 80%, lo que supone una importante pérdida de energía

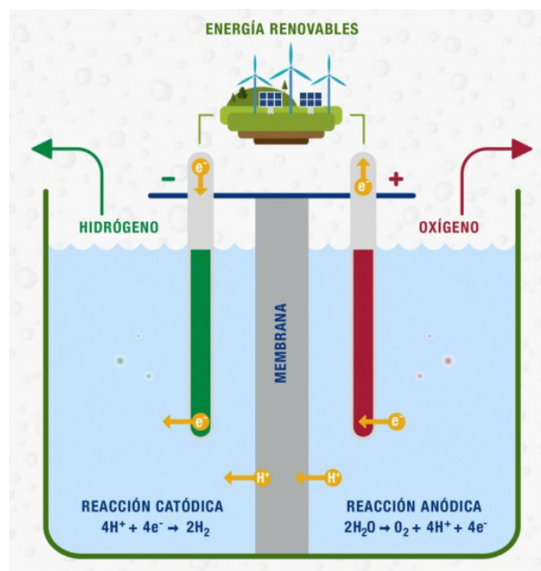


Imagen 5: Electrólisis del agua

Una vez explicado el proceso de electrólisis resulta más sencillo comprender el proceso global de creación de hidrógeno verde. Primero, necesitaremos grandes cantidades de agua para poder realizar el proceso de manera industrial, suele necesitarse en torno a 18 kg de agua para generar 1 kg de hidrógeno verde aunque también esto puede variar según la eficiencia del electrolizador o condiciones de operación, sumado a una capacidad de generar energía de forma renovable que se traducirá en la electricidad que haremos pasar por el agua para realizar una electrólisis de forma correcta. No hay que olvidar que después este proceso químico tenemos que conseguir almacenar los resultados obtenidos, el hidrógeno y el oxígeno separados.

Una vez almacenado es donde cobra sentido el término de vector energético que hemos relacionado con el hidrógeno verde pues tenemos depósitos de H_2 que permiten utilizar este hidrógeno en múltiples tareas, es decir, tenemos un portador de energía que se puede adaptar a unas necesidades energéticas u otras según cada circunstancia.

Obviamente, el hidrógeno no es válido para cualquier tipo de necesidad energética pero sí que tiene un amplia gama de industrias donde resulta útil y consigue reducir las emisiones de carbono que al fin y al cabo es el objetivo que perseguimos con el desarrollo de esta tecnología.

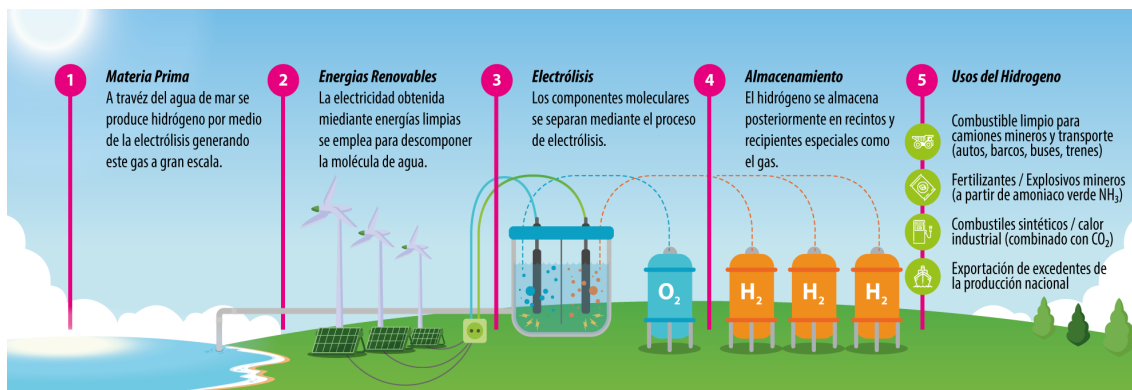


Imagen 6: Proceso completo de producción de H_2 verde

El proceso de electrólisis también puede variar pues encontramos distintos métodos que vamos a explicar a continuación:

- **Electrólisis alcalina convencional:** Actualmente es la tecnología más comercial y desarrollada que tenemos. Consiste en la inmersión de los dos electrodos en un electrolito líquido alcalino que conduce aniones OH^- y los electrodos están separados por un diafragma, a pesar de ser la más desarrollada hasta el momento sus principios son simples, es barata y no requiere de mantenimiento complejo así mismo no participan metales nobles por lo que es relativamente estable.

Las densidades de corrientes que se obtienen con este método son bajas pues trabaja dentro de unos límites de operación para que no se mezclen el hidrógeno y el oxígeno perdiéndose cierta energía.

Como parte negativa de este método se sabe que los electrodos se acaban corroyendo después de un número determinado de paradas y puestas en marcha y es necesario que se acoplen a una batería para utilizarse como acumuladores de energía.

Las cifras de potencia que se manejan en los electrolizadores alcalinos son hasta 40MW aproximadamente y las eficiencias oscilan entre 80 y 93 %

- **Electrolisis de membrana polimérica protónica (PEM):** Este tipo ya se comercializa, aunque a menor escala que el anterior, pues continua en fase de desarrollo. En esta electrolisis vemos que el electrolito es una membrana polimérica sólida que conduce H^+ . Se necesita agua pura y el hidrógeno generado es muy puro (99,999 %) y se presuriza directamente en el sistema.

A diferencia del método alcalina se observan densidades de corriente muy elevadas con respuesta rápida y dinámica que concretamente es lo que se necesita para poder acumular las energías renovables.

Como inconvenientes tenemos que los materiales de los electrodos están basados en metales nobles y en las placas bipolares se utiliza titanio lo que problema coste elevado por la escasez de este tipo de materiales.

La tecnología PEM se postula como tecnología idónea para acumular los excesos de energía renovable. Actualmente se manejan electrolizadores en torno a 6-10MW con una eficiencia que no supera el 80%

- **Electrólisis de membrana de intercambio aniónico (AEM):** es un proceso electroquímico que produce hidrógeno y oxígeno a partir del agua. Utiliza otro tipo de membrana diferente a nuestro anterior tipo de electrolisis, concretamente es una membrana de intercambio aniónico para permitir el transporte selectivo de iones hidroxilo mientras evita los iones de hidrógeno y oxígeno.

Tiene como ventaja la reducción de coste al evitar el uso de membranas costosas, así como la producción de hidrógeno de alta pureza debido a la separación selectiva de gases. Otro punto fuerte es que se mejora la seguridad al evitar el uso de membranas peligrosas y por último presenta una gran ventaja potencial por la cual se cree que merece la pena apostar por esta tecnología que es la mayor eficiencia energética en comparación con la electrólisis convencional.

En la parte de los inconvenientes encontramos que hay menor conductividad iónica de las membranas, la durabilidad limitada de estas membranas y que es una tecnología en vías de desarrollo por lo que se necesita todavía tiempo para optimizar eficiencia, selectividad y durabilidad de las membranas.

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

- **Electrolisis de estado sólido:** este tipo de tecnología no se comercializa por el momento. Se trata de un sistema sólido que trabaja a elevadas temperaturas donde el electrolito es conductor de iones de oxígeno O^{2-} . Se consigue una eficiencia elevadísima de casi el 100% y sin necesidad de metales nobles. Puede trabajar a alta presión y es reversible a una pila de combustible.

La parte negativa viene cuando se sabe que debido a las temperaturas elevadas entre 500°C y 1000°C existen problemas debido a la durabilidad de los componentes. Podría ser interesante si se consiguiera aprovechar todo ese calor liberado que actualmente genera más oposición que beneficio.

Puesto que no están tan avanzados como los anteriores, ni si quiera comercializados, se han conseguido desarrollar electrolizadores sólidos de tan solo 10kW lo que es mucho menor que en los otros tipos.

Ventajas y desventajas

Para conocer nuestro elemento base del proyecto resulta de vital importancia conocer los puntos fuertes y débiles del hidrógeno verde para poder aprovecharlo de la mejor forma posible y saber a qué desafíos se tendrá que enfrentar o en cosas debe mejorar. A continuación, se puede observar una enumeración de distintas ventajas y desventajas:

Ventajas:

- Reducción de la huella de carbono: no se emiten gases contaminantes ni durante la producción ni combustión de este tipo de hidrógeno
- Almacenamiento: este punto fuerte es el motivo por el cual hemos definido el hidrógeno verde como un vector energético y nos aporta una maniobrabilidad que resulta difícil de obtener en el plano energético

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

- Versatilidad: el hidrógeno puede utilizarse en diversos campos una vez producido y almacenado, ya sea como uso doméstico, industrial o de movilidad
- Transportable: Se puede inyectar en las redes de transporte y distribución de gas natural, pudiendo alcanzar un porcentaje de hasta el 2% sin excesivos problemas ni modificaciones en las instalaciones, y con inversiones en adaptación de la red se puede superar el 10%

Desventajas:

- Elevado coste de producción: a día de hoy, es mucho más caro producir hidrógeno verde que aquel que se produce gracias al gas natural, por ello el 95% de hidrógeno producido en el mundo se realiza mediante gas natural.
- Seguridad: el hidrógeno es un elemento altamente inflamable y muy volátil por lo que se precisan grandes medidas de seguridad para evitar fugas y explosiones. Además, la molécula de hidrógeno, al ser muy pequeña, tiende a fugarse de los depósitos y tuberías con gran facilidad, lo que provoca pérdidas que pueden alcanzar un 2 o 3% diario.
- Elevado coste de energía: producir el hidrógeno verde requiere grandes cantidades de energía. El hidrógeno tiene un carácter gaseoso, por lo que para tener una gran cantidad de energía disponible es necesario almacenarlo a altas presiones. Actualmente se está trabajando en depósitos a 750 bar, equivalente a unas 740 veces la presión atmosférica, o lo que es lo mismo, es la presión que se soporta estando sumergido en el mar a 7400 metros de profundidad, lo que es una presión muy elevada.

Por último, es necesario tener en cuenta que, para generar hidrógeno verde, además de electricidad y equipos, hace falta bastante agua, recurso que en nuestro país es bastante escaso.

Si pensamos en hidrógeno verde y los recursos que se necesitan para conseguirlo, automáticamente podremos relacionar que estos dos recursos actúan como cuellos de botella, lo que provoca que la gestión óptima de ambos recursos resulte decisiva en el avance o retraso de una industria alrededor del hidrógeno verde.

Aplicaciones

A la hora de hablar de aplicaciones nos referiremos a todos los tipos de hidrógeno, pues se diferencian en la manera en la que son producidos, pero una vez obtengamos el hidrógeno se pueden utilizar de la misma manera en diversas formas.

- Uso doméstico: se puede utilizar por raro que parezca para conseguir electricidad y calefacción para suministrar viviendas.
- Industria pesada: principalmente en industria química, industria de la metalurgia y en petroquímica. Se puede utilizar como materia prima para fabricar fertilizantes y amoníaco, también para el refinado del petróleo y en metalurgia para obtener acero. Actualmente, la utilización del hidrógeno en estas tres industrias produce una gran cantidad de emisiones de dióxido de carbono.

Por ejemplo, la fabricación de acero constituye entre el 6 y el 7% de las emisiones de CO₂ globales, entre 2 y 3 veces las emisiones de toda la aviación mundial. Podríamos emplear el hidrógeno verde como materia prima y producir acero sin emisiones, lo que sería un paso muy importante para la urgente descarbonización de estas industrias.

- Transporte y movilidad: una de las claves del hidrógeno es la posibilidad que existe de utilizarlo como combustible, y así ayudar a la descarbonización del transporte.

En el transporte marítimo normalmente se emplean combustibles muy baratos pero muy contaminantes, por lo que el hidrógeno verde podría verse como una alternativa decisiva para barcos de gran calado que recorren largas distancias. Por otro lado, en el ámbito de la aviación, el hidrógeno verde puede ser la base de combustibles sintéticos que

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

reduzcan de manera radical las emisiones de este sector. También será esencial para otros medios como el tren o el transporte de mercancías pesadas por carretera.

- Almacenamiento: del mismo modo que esto es una ventaja también en una aplicación en sí mismo pues el hidrógeno puede servir como sistema de almacenamiento de energía gracias a su gran volumen y a su larga duración de una manera similar a como usamos ahora las reservas estratégicas de gas natural o petróleo. De este modo, podríamos aprovisionar reservas de hidrógeno para dar soporte a la red eléctrica.

Para finalizar este subapartado me gustaría explicar que para conseguir electricidad a raíz del hidrógeno que se tenga almacenado es tan sencillo como realizar el proceso con el que hemos obtenido el H_2 a la inversa. Se hace reaccionar oxígeno con hidrógeno obteniendo electricidad y agua, al dispositivo encargado de realizar esta reacción se le conoce como pila de combustible.

A continuación, se muestra una imagen para poder entender el proceso con facilidad.

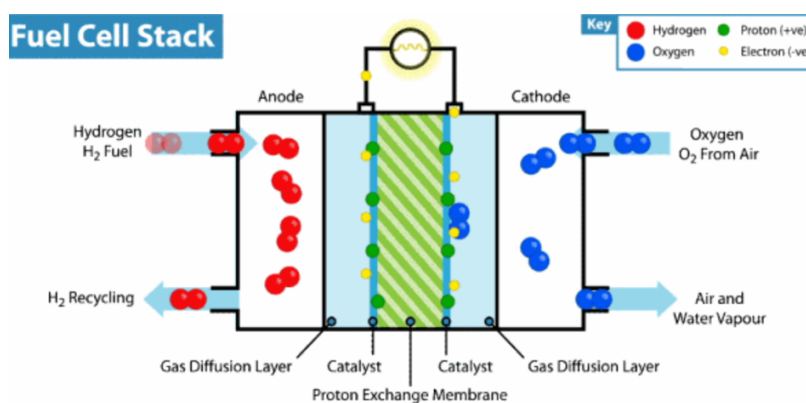


Imagen 7: Pila de combustible

2.5.1 Situación en España

La información que plasmaremos a continuación en este trabajo data del año 2020 en el mes de Octubre, momento en el que el gobierno español estableció una hoja de ruta acerca del hidrógeno verde. Actualmente, estamos en el año 2023 y han ocurrido numerosos acontecimientos en el ámbito energético que han podido modificar el interés o evolución del hidrógeno verde, aun así, no tenemos ningún documento oficial más actualizado por lo que destacaremos los puntos más trascendentes de este documento.

En esta Hoja de Ruta tenemos explicaciones acerca del hidrógeno verde sobre qué, cómo se obtiene, aplicaciones... puesto que ya están explicadas todas estas respuestas nos centraremos en las visiones a futuro que nos proporciona la hoja de ruta concretamente en 2030 y 2050.

2030

No es un horizonte tan lejano como parece, la realización de este proyecto se ha realizado durante 2023 y en apenas 3 años que han transcurrido desde la creación de la Hoja de Ruta ya se han visto progresos severos en el campo de tecnologías e ingeniería relacionada con hidrógeno.

- **Producción de hidrogeno renovable:** Se la instalación en España de al menos 4 GW de potencia de electrolizadores que idealmente se localizarán en las proximidades de los lugares de consumo con objetivo de reducir los costes de transporte y almacenamiento. Aunque esto ha sido modificado recientemente en el borrador del PNIEC donde la nueva estimación se sitúa en 11GW de potencia en electrolizadores debido a la aceleración que ha ocurrido en el ámbito del hidrógeno verde, situación muy distinta que la existente cuando se escribió la Hoja de Ruta.
- **Transporte:**
 - Flota de entre 150 y 200 autobuses de pila de combustible de hidrógeno renovable repartidos por el territorio nacional

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

- Entre 5000 y 7000 vehículos ligeros y pesados de pila de combustible destinados al transporte de mercancías
 - Red de entre 100 y 150 hidrogeneras de acceso público repartidas por España con una distancia máxima de 250km entre ellas
 - Trenes propulsados con hidrógeno en al menos dos líneas comerciales de media y larga distancia en vías actualmente no electrificadas
 - Presencia de maquinaria “handling” que utilice pilas de combustible de hidrógeno verde y de puntos de suministro en los cinco primeros puertos y aeropuertos en volumen de mercancías y pasajeros respectivamente
-
- **Industria:** se prevé que un 25% del total de hidrógeno consumido sea hidrógeno verde en todas las industrias que utilizan hidrógeno tanto como materia prima como fuente de energía como son las refinerías e industria química.
 - **Sector eléctrico/almacenamiento de energía:** se prevé la existencia de proyectos comerciales de hidrógeno operativos en 2030 para almacenamiento de electricidad y/o aprovechamiento de la energía renovable excedentaria.

El PNIEC de 2023 establece que para 2030 se espera reducir la dependencia energética hasta 51% y que se hayan conseguido reducir la emisión de gases de efecto invernadero en un 32% respecto de 1990.

2050

Es una horizonte mucho más lejano que el comentado anteriormente, por lo que de forma obvia, resulta más complicado realizar predicciones y estimaciones correctas que puedan cumplirse.

A partir de 2030 se prevé un incremento notable en la producción de hidrógeno renovable, a su vez los avances tecnológicos y las economías de escala permitirán una gran expansión del consumo de hidrógeno renovable en muchos sectores difíciles de descarbonizar: el sector de transporte y el industrial como pone de manifiesto la ELP 2050 (Estrategia a Largo Plazo).

La ELP pretende articular una respuesta coherente y integrada frente a la crisis climática, que aproveche las oportunidades para la modernización y competitividad de la economía y a su vez sea socialmente inclusiva y justa.

Esta estrategia se construye sobre la base de la neutralidad tecnológica. En principio, las diferentes tecnologías deben tener las mismas oportunidades de desarrollo para aportar las mejores soluciones coste-eficientes para la descarbonización de cada uno de los sectores de la economía, no obstante, hay que tener en cuenta el conjunto de externalidades negativas y positivas adjuntas a cada tipo de tecnología y su grado respectivo de madurez.

A continuación, se resaltan algunas de las principales magnitudes que se considerarán realidad en 2050:

- Gracias al trabajo en mitigación y sumideros de carbono se llegará a una neutralidad climática se habrá reducido en un 90% las emisiones que teníamos en 1990
- La electrificación de la economía superará el 50%. Se instalará para ello entorno a 250 GW de potencia renovable
- Se reduce en un 13% la dependencia energética del exterior lo que lleva consigo un ahorro de 344 millones de euros
- El sector eléctrico será renovable 100%, la garantía de suministro se ha estudiado junto a REE (Red Eléctrica de España).



Imagen 8: Principales magnitudes de la ELP en 2050

2.5.2 Situación en Europa

Para hacernos una idea de en qué situación se encuentra el hidrógeno en Europa nos ayudaremos de documentos oficiales como son la “estrategia del hidrógeno para una Europa climáticamente neutra” realizada en 2020 y el documento “REPowerEU” que se realizó dos años después que la estrategia principal.

En el primer documento se trazan una serie de planes a seguir a lo largo del tiempo y se establecen ciertos objetivos para ello se prioriza la producción de hidrógeno verde, no obstante, a medio y corto plazo se necesitan otras formas de hidrógeno con bajas emisiones de carbono pues se considera que el ecosistema de hidrógeno en Europa se desarrollará de manera gradual. Se divide en tres fases temporales.

2020-2024: el objetivo estratégico es instalar al menos 6GW de electrolizadores de hidrógeno renovable la Unión Europea, para lo que se centrarán en el desarrollo de electrolizadores de gran tamaño (hasta 100MW) y se espera obtener la producción de hasta un millón de toneladas de hidrógeno verde.

Desde el punto de vista político, se priorizará establecer el marco regulador de un mercado de hidrógeno líquido y operativo e incentivar tanto la oferta como la demanda de los mercados principales. Para ayudar a que esto sea posible la Alianza

Europea por un Hidrógeno Limpio contribuirá a crear una sólida cartera de inversiones.

2025-2030: en estos cinco años el hidrógeno debe convertirse en una parte intrínseca de un sistema energético integrado con el objetivo de instalar hasta 40GW de electrolizadores de hidrógeno a más tardar en 2030 y multiplicar por diez la producción de toneladas de hidrógeno que vimos en la anterior fase llegando a los diez millones de hidrógeno renovable en la UE.

Durante esta etapa, el hidrógeno verde pasará gradualmente a ser competitivo respecto de otras formas de hidrógeno y a su vez, el hidrógeno renovable empezará a desempeñar un papel fundamental para equilibrar un sistema de electricidad basado en las energías renovables transformando la electricidad en hidrógeno cuando esta sea barata y abundante, ofreciendo flexibilidad.

Por último, en esta fase se podrán crear lo que se conocerá como “valles de hidrógeno” que serán agrupaciones locales de hidrógeno, como zonas remotas o islas, dependientes de la producción local de hidrógeno basado en la generación descentralizada de energía renovable y la demanda local, transportado a distancias cortas.

2030-2050: la última fase en la que las tecnologías de hidrógeno renovable alcanzan su madurez y despliegan a gran escala para llegar a todos aquellos sectores de difícil descarbonización. Se estima que, en este período, una cuarta parte de la electricidad renovable que se genere irá destinada a la producción de hidrógeno verde.

Una vez explicadas las tres fases que prevé Europa sobre el hidrógeno, hay que indicar que la situación a la que se enfrentaba Europa en el momento que se trazaron estas estrategias no es la misma que tenemos ahora pues actualmente existe una guerra entre Ucrania y Rusia lo que ha provocado que Europa se haya dado cuenta la gran dependencia energética que tenía de Rusia por lo que ha decidido tomar cartas en el asunto y de ahí nace el documento REPowerEU, del mismo modo, la aparición de un conflicto de tal gravedad provocará cambios con más velocidad en el ámbito del hidrógeno pues la necesidad es mayor, a continuación explicaremos las medidas más resaltables de este documento emitido el 18 de Mayo de 2022.

REPowerEU trata de reducir rápidamente la dependencia de combustibles fósiles usos acelerando a transición hacia una energía limpia uniendo fuerzas para lograr un sistema energético más resiliente y una verdadera Unión de la Energía.

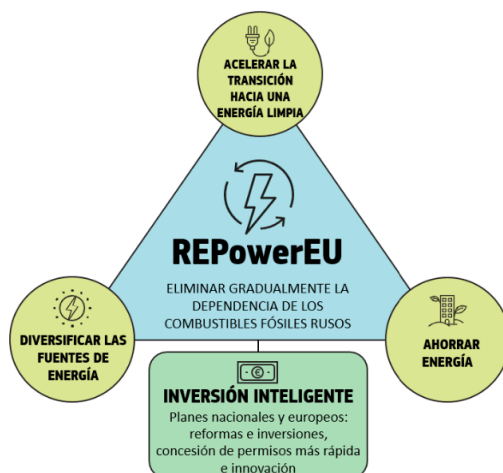


Imagen 9: Resumen de REPowerEU

Se indica en el documento que es necesaria una prioridad una aceleración en el campo del hidrógeno pues postula como pieza clave para sustituir el gas natural, el carbón y el petróleo en las industrias y el transporte difíciles de descarbonizar. Por ello REPowerEU establece una producción de 10 millones de toneladas de hidrógeno verde y también otros 10 millones de toneladas e importaciones de hidrógeno renovable para 2030.

Se pide a la industria que acelere el trabajo sobre las normas de hidrógeno que faltan, en particular, la producción de hidrógeno las infraestructuras y los aparatos de uso final. Para conseguir la importación de esos 10 millones de toneladas de hidrógeno verde se apoyará la apertura de tres grandes corredores de importación a través del Mediterráneo, el Mar del Norte y tan pronto como las circunstancias lo permitan Ucrania.

European Hydrogen Backbone

Al hablar de la situación que existe con el hidrógeno en Europa debemos hablar de la EHB (European Hydrogen Backbone) también conocida como European Hydrogen Highway que es una iniciativa que consiste en un grupo de 32 operadores de infraestructura energética unidos por una visión común de una Europa que involucrará a 28 países que buscan un continente climáticamente neutro y en el que pueda desarrollarse un próspero mercado de hidrógeno renovable.

Para ello, se centrarán en la creación de una red de gasoductos e infraestructuras que permitan y faciliten el transporte de hidrógeno por el continente. Principalmente, se basan en la reutilización de gasoductos de gas natural reutilizados, pero a medida que avancemos en el tiempo se pretende crear nuevos gasoductos y conseguir una gran red para el año 2040 que se ha establecido como meta del proyecto.

Un objetivo a corto plazo es el que se ha planificado para 2030 que ayudará a cumplir los objetivos establecidos en el documento ya explicado en este proyecto que se llama REPowerEU. Para este futuro 2030 se pretende tener cinco grandes vías que puedan sentar como base para conseguir los objetivos a largo plazo.

Las 5 vías se distinguen por regiones geográficas, de manera que se reparten alrededor de Europa. Una de ellas va desde Frankfurt hasta España y Portugal pasando por Francia, en el mismo sur de Alemania tenemos otra vía hasta África que recorre toda Italia y de nuevo desde la frontera de Alemania-Austria tenemos una vía que recorre el Este de Europa pasando por países como Eslovaquia, Hungría, Rumanía y llegando hasta Grecia. Las dos últimas vías cuentan con presencia marítima pues algunos de los viaductos que se encuentran en el mar; una de ellas sería la vía que ve desde el mar del Norte hasta Países Bajos y la otra sería la que vemos en el mar Báltico que involucra desde Finlandia y Suecia hasta Alemania pasando por Estonia Letonia, Lituania y Polonia.

Por tanto, se pretende que para 2040 se tenga una sólida infraestructura como la que veremos en el mapa a continuación:

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

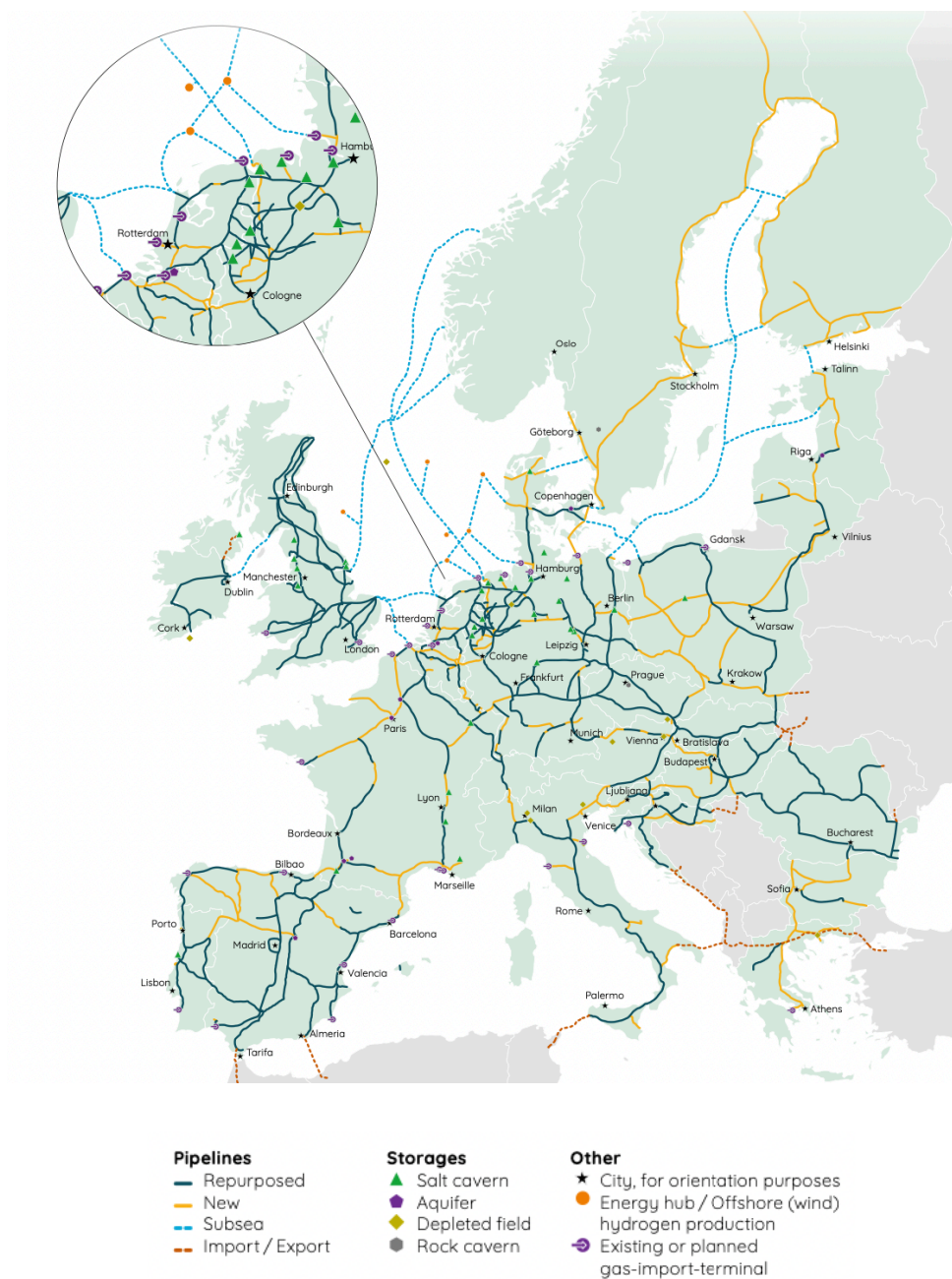


Imagen 10: Mapa previsto para la EHB en 2040

Como se puede apreciar en el mapa, aparte de las 5 vías comentadas anteriormente, se ve una red de gasoductos completa que llega a numerosos países europeos e incluso se comunica con el continente africano por países del sur de Europa como España o Italia. Del mismo modo, puesto que la política de Europa quiere conseguir independencia energética de Rusia, se observa como en aquellos países fronterizos con Rusia, se termina la red de gasoductos.

3. Fundamento teórico

En este apartado se explicarán ciertos conceptos teóricos que resultan notablemente importantes para el correcto entendimiento del proyecto. Commodity, vector energético y LCOH son los conceptos esenciales para el correcto entendimiento del proyecto.

3.1 Commodity

El título de este proyecto incluye la palabra “commodity” de manera que la estamos incorporando a nuestro lenguaje como un anglicismo, pero merece una explicación de qué es un commodity y qué tipo de relación guarda este concepto con el hidrógeno.

Un commodity se refiere a un recurso que se comercializa e intercambia en el mercado global, para que esto pueda ser posible debe tratarse de un producto homogéneo y transportable por lo general en su mayoría son materias primas y existen múltiples tipos: granos (arroz, avena, maíz), soft (algodón, café, azúcar), metales (oro, plata, aluminio) o energéticos como pueden ser el petróleo, gas natural, carbón, uranio etc.

Este último tipo es el de mayor relevancia para nuestro proyecto. Los commodities energéticos son aquellos recursos que se utilizan como fuentes de energía, ya sea para la generación de electricidad, el transporte, la calefacción, la refrigeración, entre otros. Estos recursos se caracterizan por tener un precio que fluctúa en el mercado en función de diversas variables en las que encontramos las más que obvias oferta y demanda, pero también influyen otras más complejas como la geopolítica, las condiciones climáticas u otros factores.

La ingeniería desempeña un papel clave en la producción, transformación y distribución de los commodities energéticos, luego cuando hablamos de un commodity por supuesto que sabemos que existe un mercado detrás del mismo, pero también debemos conocer que existe un completo mundo alrededor de ese recurso.

Por ejemplo, en el caso del petróleo, los ingenieros de petróleo son los encargados de explorar y perforar los yacimientos de petróleo, diseñar y operar las plantas de procesamiento, y transportar el petróleo a través de oleoductos y barcos.

Otro caso que sirve para comprender estos commodities sería el de la electricidad donde los ingenieros eléctricos son los encargados de diseñar y operar las centrales eléctricas, las redes de transmisión y distribución, y los sistemas de almacenamiento de energía.

En el caso del hidrógeno, no está completamente asentado como commodity, no obstante, su futuro apunta en ese sentido, queda mucho camino en términos de ingeniería y energía para poder aprovechar todo el potencial que presenta actualmente y del mismo modo no tiene como tal un mercado como el resto de commodities mencionados anteriormente y esto es uno de los motivos por los cuales se realiza este proyecto de fin de máster de ingeniería industrial.

Se sabe que hay países trabajando para establecer unas políticas y regulaciones necesarias para implementar un mercado de hidrógeno que podría ser similar a otros ya existentes.

3.2 Vector energético

Se considera vector energético a todo aquello, que sea capaz de almacenar energía para posteriormente liberarla de forma controlada y en un momento determinado. Aplicando esta definición a nuestro elemento clave en el proyecto, que es el hidrógeno, sabemos que no estamos hablando de una fuente primaria de energía por sí mismo si no un medio para transportar energía, un portador de energía.

De esta forma, se puede utilizar energía para almacenar hidrógeno y por ende estaríamos almacenando energía ya que ese hidrógeno finalmente será utilizado ya sea como combustible, para generar electricidad o cualquier otro tipo de finalidad.

Resulta muy interesante la aplicación de hidrógeno como vector energético ya que el almacenamiento de energía puede resultar complicado en algunos casos como por ejemplo la electricidad y de este modo se ofrece una variante para este problema al que nos enfrentamos en el ámbito energético.

3.3 LCOH

El LCOH por sus siglas en inglés significa “Levelised Cost of Hydrogen” que viene a ser el coste normalizado de hidrógeno, es decir, cuánto cuesta un kilo de hidrógeno en euros.

Es uno de los conceptos más importantes a entender cuando se habla de hidrógeno, influye para todo tipos de hidrógeno, pero según el tipo de hidrógeno que tengamos tendremos un LCOH u otro.

Antes de entrar más en profundidad en la explicación del LCOH me gustaría mencionar otro par de costes como son el LCOE y LCOS que están estrechamente relacionado con el LCOH.

LCOE significa “Levelised Cost of Energy” que mide el coste medio de generación de electricidad de una central a lo largo de su vida útil. Se mide en €/MWh y según el tipo de tecnología que se utilice para generar energía tiene un precio u otro.

LCOS significa “Levelised Cost of Storage” y mide el coste medio de almacenar energía durante la vida útil de un sistema de almacenamiento de energía. Se mide en €/MWh al igual que LCOE.

El hecho de que se considere al hidrógeno vector energético es clave para el LCOS ya que, si en el futuro se consigue optimizar y potenciar el almacenamiento de hidrógeno, el almacenamiento de energía y electricidad cambiaría tal y como lo conocemos pues siempre ha sido uno de los grandes problemas con los que han tenido que lidiar los ingenieros a lo largo de la humanidad.

Para calcular el LCOH hay que tener en cuenta distintas variables que afectan a este coste del hidrógeno.

La primera variable que tendremos en cuenta será el CAPEX que se refiere a aquellos gastos o inversiones que se hayan realizado para conseguir activos que se utilizarán en la fabricación del hidrógeno, si hablamos de hidrógeno verde, por ejemplo, en este tipo de gastos entrarían las inversiones necesarias para los electrolizadores.

Del mismo modo, debemos tener en cuenta el OPEX que se refiere a todos los gastos necesarios para el correcto funcionamiento de nuestra producción de hidrógeno como costes de operaciones y mantenimiento.

Más variables a tener en cuenta son la vida útil y el tiempo de operación. Cuánto más larga sea la vida útil y más tiempo opere nuestro sistema de producción de hidrógeno más rápidamente podrá recuperarse la inversión realizada.

No se debe olvidar que también influye como variable la tasa de descuento que se utiliza para calcular el valor actual neto de los flujos de efectivo futuro. Esta tasa refleja el costo de oportunidad de invertir en el proyecto de producción de hidrógeno en lugar de en otras alternativas de inversión.

Para terminar, se indica un factor de capacidad/planta f que es el cociente entre el consumo eléctrico real y el máximo posible.

Este factor varía mucho dependiendo del tipo de hidrógeno pues por ejemplo si hablamos de hidrógeno verde con un electrolizador acoplado a una fuente de energía fotovoltaica, este factor rondará el 20-25% para plantas fotovoltaicas que operen un número de horas equivalentes de 1800-2200 al año debido a la falta de sol durante buena parte del año.

La f realmente indica el porcentaje equivalente del año durante el que, de forma hipotética, la planta opera a pleno rendimiento.

Teniendo en cuenta todas estas variables podría calcularse el LCOH (€/kg) con la siguiente fórmula:

$$LCOH = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n \left(\frac{\text{coste anual de la electricidad}}{(1+r)^t} \right)}{\sum_{t=1}^n \left(\frac{\text{cantidad de H}_2 \text{ generada al año}}{(1+r)^t} \right)};$$

Se explicará un ejemplo con datos concretos para generación de hidrógeno verde por medio un electrolizador que nos ayude a entender el cálculo:

Supongamos un electrolizador de 20MW que ha costado 16 millones de euros, que es lo mismo que 800€/kW. Su eficiencia es de 50 kWh/kg H₂ luego a pleno rendimiento generará en un año 20.000/50 es 400kg/h es decir 3.504.000 kg al año.

Supongamos un coste de electricidad de 50€/MWh luego el consumo del electrolizador a pleno rendimiento será 20*50 que son 1000€/h por lo que en un año sería 8,76 millones €

Suponemos f = 25%, r=8% y vida útil (n) de 25 años.

$$LCOH = \frac{16.000.000€ + (0,25 * 8.760.000€) \sum_{t=1}^{25} \left(\frac{1}{(1+0,08)^t} \right)}{(0,25 * 3.504.000 \text{ kg de H}_2) \sum_{t=1}^{25} \left(\frac{1}{(1+0,08)^t} \right)};$$

$$LCOH = 4,211€/kg$$

El LCOH ha fluctuado notablemente en los dos últimos años pues la guerra de Ucrania ha afectado notablemente al continente provocando una crisis energética con diversos impactos en la economía europea.

Se espera que su precio descienda progresivamente con el paso del tiempo hasta un punto en el que sí sea rentable la generación del hidrógeno verde por delante de otros tipos de hidrógeno que necesitan combustibles fósiles para ser generados como el negro, gris...

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

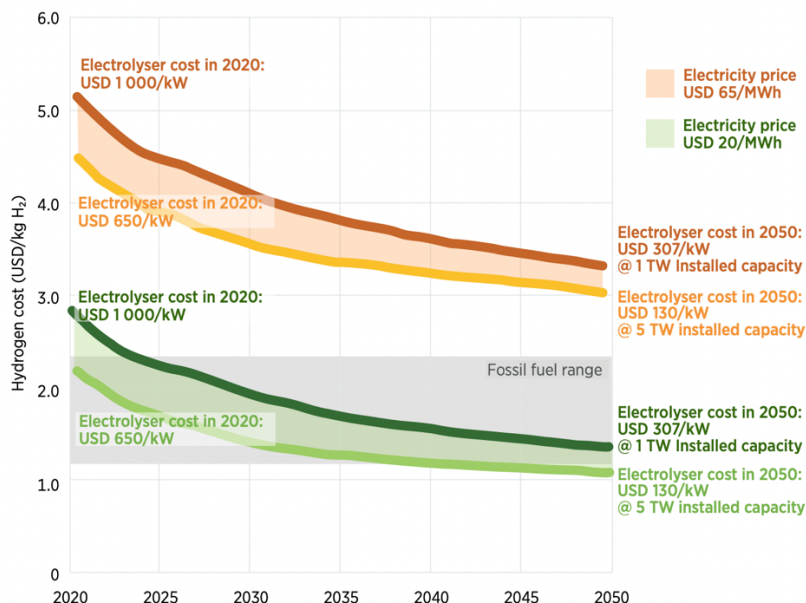


Gráfico 6: Evolución de precios de hidrógeno verde durante los próximos 30 años. Fuente: IRENA

Como vemos en la imagen anterior se presentan dos escenarios distintos dependiendo del precio de la electricidad, lo que sí se puede observar es que en ambos escenarios el precio evoluciona de forma que se reduce dos dólares por cada kilogramo de hidrógeno verde generado.

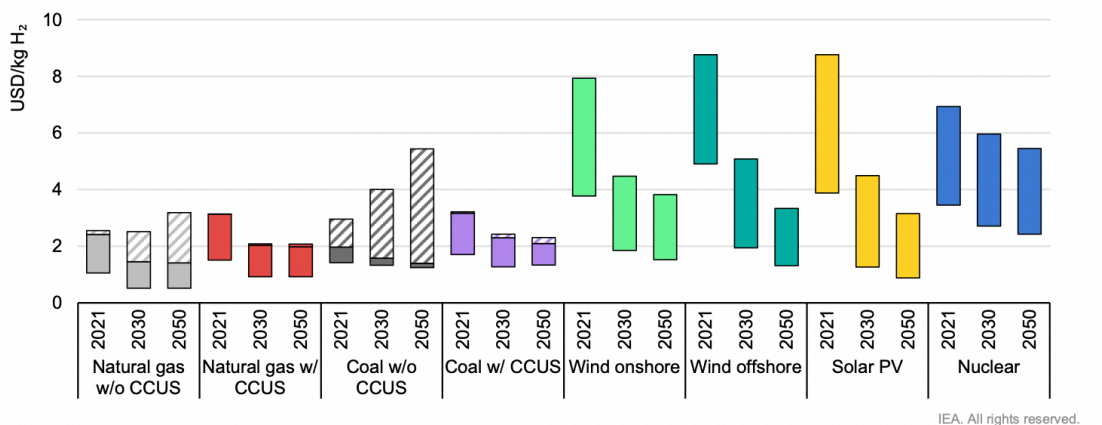


Gráfico 7: Evolución de precios de hidrógeno por tecnologías de producción. Fuente: IRENA

En este gráfico donde se ve la evolución del LCOH según las tecnologías que se hayan usado se observa como la mayor reducción de precio está en las tecnologías de energía renovable, energía eólica y fotovoltaica y además se puede afirmar que todos los tipos de hidrógeno reducen su LCOH a excepción de dos.

Los tipos de hidrógeno que aumentan su LCOH respecto a la actualidad son aquellos que utilizan combustibles fósiles, gas natural y carbón; en el proceso de generación y además no realizan captura de las emisiones de carbono que existan en el proceso.

4. Metodología

La metodología nos explica de qué forma se ha decidido realizar el estudio de los datos en el proyecto.

Para ver qué influencia tienen distintas commodities sobre el hidrógeno se ha decidido realizar una técnica denominada análisis de regresión acompañada de un análisis de varianza que se explicarán a continuación.

A la hora de estudiar y analizar datos se puede realizar de múltiples formas, para este estudio se ha decidido utilizar las dos técnicas ya comentadas mediante la herramienta de Excel con los datos que se han obtenido de distintas commodities.

Las commodities que más pueden haber influido en el precio del hidrógeno son aquellas procedentes de combustibles fósiles que debido a la guerra de Rusia, han tenido abruptas fluctuaciones a lo largo de 2022 y 2023.

Las commodities que se han seleccionado para realizar el análisis de datos son el gas natural, el petróleo y el carbón. Todas ellas son importantes en relación con el hidrógeno pues gracias a ellas se fabrica la mayoría de hidrógeno a día de hoy.

Gracias al estudio que se va a realizar se permitirá cuantificar el grado de influencia de estas commodities sobre nuestro precio de hidrógeno y se podrá saber hasta qué punto son importantes o no, si sus fluctuaciones de precios deben ser tomadas en cuenta o son más irrelevantes de lo que parece.

Por norma general, cada commodity tiene un mercado desarrollado durante años que da soporte y fiabilidad a los datos con los que se trabaja. En nuestro caso es distinto pues estamos hablando de que el hidrógeno se está presentando como nueva commodity por lo que no tenemos una gran base de datos con la que trabajar.

Es por ello que, debido al bajo volumen de datos se ha decidido trabajar en formato diario, ya que se tienen datos de apenas pocos años, a diferencia de otras commodities bien establecidas y sedimentadas a nivel global en muchos mercados con las que se podría trabajar semanal o mensualmente durante un largo número de años.

Se han obtenido datos de distintas plataformas como son Factset y S&P Platts, son plataforma ampliamente conocidas en las cuales se pueden obtener “price assessments” de diversas commodities y partir de ahí trabajar con los datos. Actualmente no existen muchos países o regiones geográficas de las cuales puedan extraerse este tipo de datos pues todo lo que rodea al hidrógeno es nuevo. Existen datos muy interesantes con los que vamos a trabajar en la plataforma S&P Platts donde tenemos price assessments de varios años.

Los price assessments son datos que consisten en la estimación del precio de ciertos bienes o servicios y son utilizados para determinar el precio que debe cobrarse por esos bienes o servicios. El objetivo principal de los price assessments es encontrar un precio justo que satisfaga las necesidades del clientes y del mismo modo genere beneficio a la empresa que los vende.

Por otro lado, puesto que en el proyecto se ha explicado la situación europea con relación al hidrógeno, se trabajará con datos europeos, concretamente aquellos relacionados con el hidrógeno son de Países Bajos ya que este país se sitúa a la cabeza del continente en términos de establecer una regulación y la creación de un mercado de hidrógeno.

Se seleccionarán los datos de forma diaria durante los dos últimos años, exactamente desde Mayo de 2021 hasta Mayo de 2023 ya que no existe mayor registro histórico acerca este tipo de datos de hidrógeno que se quieren estudiar.

4.1 Análisis de regresión

El método de análisis de regresión sirve en nuestro trabajo para ver la relación que tienen los precios de hidrógeno con el resto de precios de distintas commodities.

El análisis de regresión es una técnica estadística utilizada para investigar la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes. Su objetivo es encontrar una relación funcional que describa cómo los cambios en las variables independientes se relacionan con los cambios en la variable dependiente.

Se realizará un análisis de regresión lineal, se asume que la relación entre las variables independientes y la variable dependiente es lineal. Esto significa que se busca una línea recta que mejor se ajuste a los datos. La regresión lineal puede ser realizada con una sola variable independiente o más de una de ellas.

La forma más común de representar esta relación es mediante la siguiente ecuación:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + \varepsilon ;$$

- y es la variable dependiente que queremos predecir o explicar.
 - $x_1, x_2 \dots, x_n$ son las variables independientes
- $b_0, b_1, b_2 \dots, b_n$ son los coeficientes de regresión, que representan el efecto de cada variable independiente sobre la variable dependiente
- ε es el término de error, que captura la variabilidad no explicada por el modelo

Además, el análisis de regresión proporciona métricas de evaluación del modelo, como el coeficiente de correlación R o el coeficiente de determinación R^2 .

El coeficiente de correlación, representado como R, mide la fuerza y la dirección de la relación lineal entre dos variables. Es una medida de la asociación entre las variables, pero no implica causalidad. El coeficiente de correlación puede oscilar entre -1 y 1.

Un valor de R cercano a -1 indica una correlación negativa perfecta, lo que significa que a medida que una variable aumenta, la otra disminuye de manera perfectamente predecible.

Un valor de R cercano a 1 indica una correlación positiva perfecta, lo que significa que a medida que una variable aumenta, la otra también aumenta de manera perfectamente predecible.

Un valor de R cercano a 0 indica una correlación débil o nula, lo que significa que no hay una relación lineal aparente entre las variables.

El coeficiente de determinación R^2 representa la proporción de la variabilidad de la variable dependiente que es explicada por la variable independiente en un modelo de regresión simple.

En caso de realizar un análisis de regresión múltiple, la matriz de correlaciones nos indica que variables están influenciando en mayor o menor medida a nuestra variable dependiente, del mismo modo se indica que correlación tienen entre sí esas variables independientes.

Como hemos podido apreciar anteriormente, aunque los precios del hidrógeno verde sean distintos según la tecnología electrolizadora que se esté utilizando, las fluctuaciones ocurren en los mismos puntos de la gráfica por lo que la variación se debe exactamente al mismo factor, es decir la incidencia de las variables independientes sobre nuestra variable dependiente que sería el precio del hidrógeno verde, es casi exactamente la misma en ambos casos.

Por este motivo, a la hora de realizar el análisis de regresión con hidrógeno verde se obtienen resultados muy parecidos entre el hidrógeno verde de electrólisis alcalina y el hidrógeno verde de electrólisis PEM.

Para la información que se quiere transmitir resulta más eficiente mostrar sólo uno de ellos en este proyecto, se ha decidido optar por el hidrógeno verde que procede de electrólisis alcalina.

Se utilizarán los datos recogidos para realizar dos análisis de regresión distintos. Uno donde nuestra variable dependiente es el precio del hidrógeno verde de electrólisis alcalina y las variables independientes serán el precio del carbón, gas natural y el petróleo. Y el segundo tendrá las mismas variables independientes a diferencia que la variable dependiente será en esta ocasión el hidrógeno generado gracias al proceso conocido como steam reforming, es decir, un hidrógeno no renovable.

Los datos aportados son los precios diarios recogidos durante dos años, concretamente desde Mayo 2021 hasta Mayo de 2023, en el formato diario en el que se han recogido los datos no se consideraban los fines de semana por lo que cada variable supone alrededor de 500 datos sobre sí misma.

La notación que se ha utilizado para realizar el análisis ha sido la siguiente:

- SMR: precio hidrógeno producido por steam reforming sin captura de emisiones de carbono (variable dependiente o respuesta) €/kg
- HV: precio del hidrógeno verde producido por electrolizadores de tipo alcalino (variable dependiente o respuesta) €/kg
- x1: precio del petróleo en €/barril de crudo (barril brent)
- x2: precio del gas natural en €/MMBtu (Henry Hub)
- x3: precio del carbón en €/tonelada (Rotterdam coal)

x1, x2, x3 son las variables independientes en el análisis de regresión múltiple

4.2 Análisis de varianza

El análisis de varianza es ampliamente utilizado en diversos campos, como la investigación científica, la psicología, la economía, la sociología y muchos otros, donde se necesita analizar las diferencias entre grupos. Esta técnica proporciona una forma estadística rigurosa para determinar si las diferencias observadas son más que simplemente el resultado de la variabilidad aleatoria.

El análisis de varianza, también conocido como ANOVA por sus siglas en inglés es una técnica estadística que compara las medidas de dos o más grupos para determinar si existen diferencias entre ellos.

El objetivo concreto de ANOVA es determinar si las diferencias observadas en las medias de los grupos son estadísticamente significativas o si simplemente se deben a la variabilidad aleatoria, es decir, el ANOVA puede ayudarme a identificar qué factores o variables están influyendo en un proceso o sistema y cómo contribuyen a las diferencias en los resultados observados, por lo que puede aportar complementariamente al análisis de regresión.

5. Análisis de datos

Tras la explicación teórica que se ha realizado previamente en este proyecto, debemos entrar en la parte cuantitativa para saber cómo se está comportando el hidrógeno como nueva “commodity”.

Los datos del hidrógeno recogidos durante dos años se compararán en un análisis de regresión con diversas commodities como son el carbón, el petróleo o el gas natural pues actualmente son los recursos más utilizados para la producción del hidrógeno que no sea verde por lo que de esta comparación se obtendrán resultados muy interesantes para el proyecto.

En 2022 se podría afirmar que el 4% de producción total de hidrógeno en el planeta era verde, el restante 96% se dividía entre producciones realizadas gracias a carbón, petróleo y gas natural. Para ser más específicos, el 18% provenía del proceso de gasificación del carbón, el 30% se generaba gracias al reformado de petróleo y por último el restante 48% se generaba con el proceso reformado de gas natural.

Producción de hidrógeno en 2022

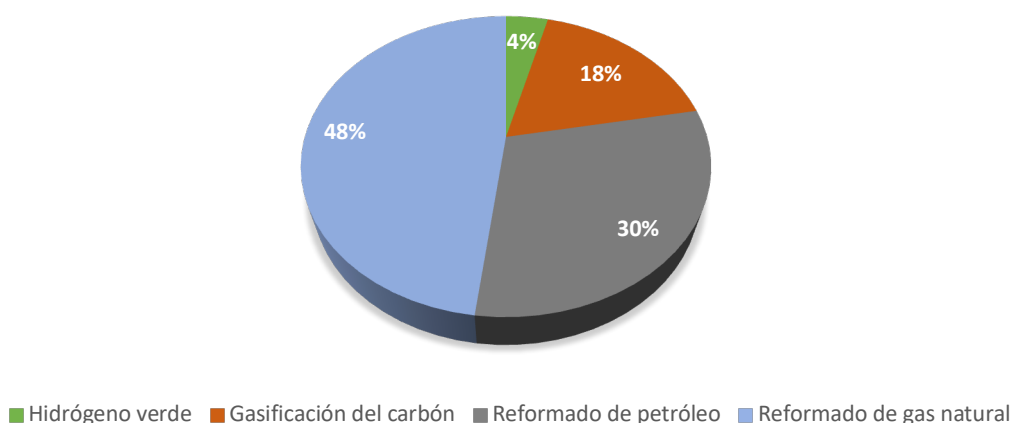


Gráfico 8: Porcentajes totales de producción de hidrógeno en 2022. Fuente: Elaboración propia

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

Debido a la influencia del petróleo se han escogido datos del barril brent en formato €/bbl que significa euros por cada “barrel of crude oil” y a la vez que los datos de hidrógeno se han seleccionado datos diarios durante 2 años para realizar el análisis.

Existen distintos tipos de petróleos procedentes de distintas partes del mundo, pero se ha seleccionado el brent debido a su procedencia europea, concretamente el Mar del Norte y junto al barril West Texas forman la referencia mundial de petróleo.

A continuación, se mostrará un gráfico para observar la fluctuación de los datos del barril brent con los que vamos a trabajar.



Gráfico 9: Precio del barril brent durante los dos últimos años Fuente: Factset

A la hora de hablar del gas natural, no es tan sencillo seleccionar un gas natural de procedencia europea ya que en Europa los mercados de gaseoductos no están unificados y los precios se ven más influenciados por lo que marca el petróleo, lo mismo que ocurre en Asia. Las principales plazas europeas serían Holanda y el Reino Unido, pero todas ellas carecen del peso suficiente como para poder establecer un precio válido fuera de sus fronteras.

Por este motivo se han elegido datos de Henry Hub que es un centro de distribución de gas natural situado en Luisiana, Estados Unidos. El motivo por el que se eligen datos de esta procedencia es porque el Henry Hub como concepto de referencia de precios es muy importante porque se elabora con los precios de oferta y demanda de esa materia prima y sólo de esa materia prima, no ligados al del petróleo.

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

La cuestión es que los productores de gas natural necesitan referencias que desvinculen el precio del gas del precio del petróleo, sobre todo cuando el petróleo está a la baja. Su gran volumen de negocio, sumado a la transparencia de precios y la

elevada liquidez hace que se utilice Henry Hub como referencia para el precio de los contratos de futuros del gas natural a nivel europeo y global.

Los datos serán escogidos en formato diario en €/MMbtu. MMBtu es igual a un millón de Btu (British Thermal Unit). La Btu es la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua. 1 MMBtu es equivalente a 27,8 metros cúbicos de gas; a 0,048 metros cúbicos de gas natural licuado o a 0,0192 toneladas de gas natural licuado.

A continuación, se mostrará un gráfico para evaluar las variaciones de precios del gas natural desde Abril de 2021 hasta la actualidad.



Gráfico 10: Precio del gas natural durante los dos últimos años. Fuente: Factset

Para terminar este apartado, seleccionaremos datos de carbón durante el mismo período de tiempo que los datos de hidrógeno, es decir, 2 años y en el mismo formato diario. El carbón tiene los datos en formato de €/mt, mt significa metric tonne que viene a ser lo mismo que 1000kg o 1 tonelada.

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

Puesto que estamos analizando la situación europea se ha decidido elegir un carbón más relacionado con nuestro continente como es el Rotterdam Coal, aun así, en este mercado destaca la relevancia del Newcastle Coal, de procedencia australiana, que domina el mercado en Asia y Pacífico e influye globalmente sobre el resto de los mercados de carbón.

Por último, pondremos un gráfico de los datos de carbón para ver la evolución que ha llevado al igual que las dos commodities anteriores



Gráfico 11: Precio del carbón Rotterdam durante los dos últimos años. Fuente: Factset

Al igual que hemos explicado los datos de petróleo, carbón y gas natural con los que vamos a trabajar, también debemos explicar los distintos datos de hidrógeno que se han tomado.

Se han seleccionado distintos tipos de hidrógeno de origen neerlandés para realizar el estudio. Tenemos datos de hidrógeno verde con dos tipos distintos de tecnologías: hidrógeno generado con electrolizadores alcalinos e hidrógeno producido con electrolizadores que utilizan tecnología PEM. También se ha seleccionado hidrógeno no renovable generado mediante el proceso de “steam reforming” para ver la diferencia que existe con el hidrógeno verde en la actualidad.

A la hora de seleccionar los gráficos se ha decidido observar la influencia del CAPEX (Capital Expenditures) que viene a ser todo tipo de inversiones realizadas para obtener los medios materiales para la producción de ese tipo de hidrógeno en concreto.

Según la tecnología que estemos utilizando para la producción de hidrógeno existen diferencias notables pues al ser un mundo relativamente nuevo, el CAPEX tiene grandes márgenes de mejora en algunas tecnologías por lo que esto puede influenciar en mayor o menor medida a la hora de decidir qué tipo de hidrógeno se va a producir.

A continuación, veremos diversos gráficos obtenidos de la plataforma S&P Platts en el que podremos ver las fluctuaciones del precio hidrógeno.

Se establece que el color azul es el gráfico con el CAPEX incluido por lo que en todos los casos será ligeramente mayor que el naranja que se corresponde con el precio del hidrógeno sin contar con el CAPEX.

En primer lugar, tenemos el hidrógeno no renovable generado mediante el famoso proceso de steam reforming y sin captura de las emisiones que se producen en el proceso de producción del hidrógeno.

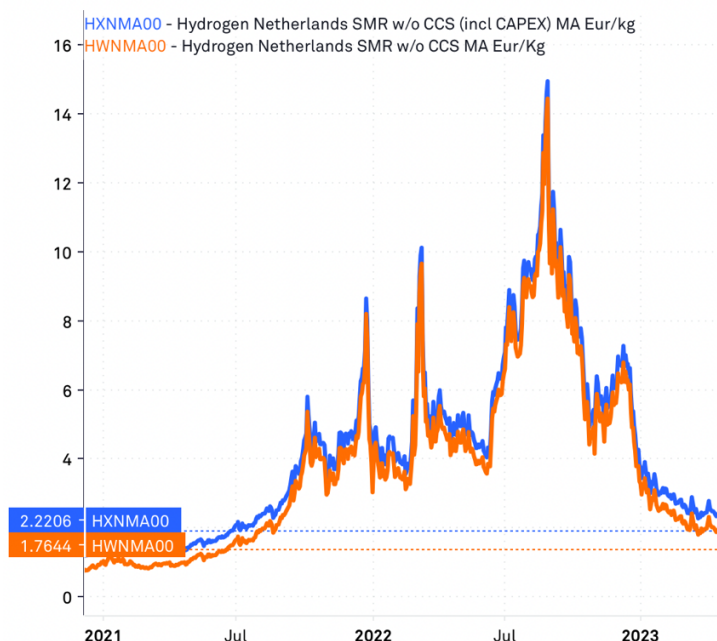


Gráfico 12: Precio del hidrógeno producido mediante steam reforming en Países Bajos. Fuente: S&P Platts

Como se puede apreciar a simple vista existen grandes picos de precios con subidas y bajadas elevadas, no sólo lo veremos en este tipo de hidrógeno si no también en el hidrógeno verde. Esto se debe principalmente a la subida de precios de commodities como son el petróleo, gas natural o el carbón. Posteriormente, se verá que relación existen entre unos datos y otros mediante la realización del correspondiente análisis de regresión.

Por otro lado, se puede afirmar que el precio medio para este tipo de hidrógeno durante este período de tiempo de dos años ha sido 4,3105€/kg sin incluir las inversiones necesarias para fabricar el producto y 4,7717€/kg incluyendo CAPEX.

Estos datos promedios nos sirven para confirmar que la inversión necesaria que se refiere al CAPEX supone un 10,7% más sobre el precio sin CAPEX, o lo que es lo mismo una diferencia de 0,4612€/kg. Este dato resulta relevante ya que dependiendo de la tecnología que se vaya a utilizar a la hora de producir el hidrógeno tendremos mayores o menores diferencias.

Podemos observar que los precios más bajos se dan antes del comienzo de la guerra de Ucrania y Rusia y se alcanzan unos precios máximos el día 26 de Agosto de 2022 con 14,4421€/kg y 14,9469€/kg sin y con CAPEX respectivamente. Del mismo modo, se puede observar que tras más de un año de guerra actualmente el precio está volviendo a los datos más bajos desde 2021.

En segundo lugar, veremos los gráficos que corresponden con la generación de hidrógeno verde. Tienen la diferencia del tipo de electrolizador que utilizan, este gráfico justo a continuación utiliza electrolizadores alcalinos y el siguiente utilizan electrolizadores PEM o de membrana polimérica protónica.

A pesar de sus distintas tecnologías, al ser ambos hidrógeno verde, la estructura que sigue el gráfico a la hora de variar el precio es prácticamente la misma. No obstante, los precios de una tecnología y otra sí tienen diferencia sustanciales.

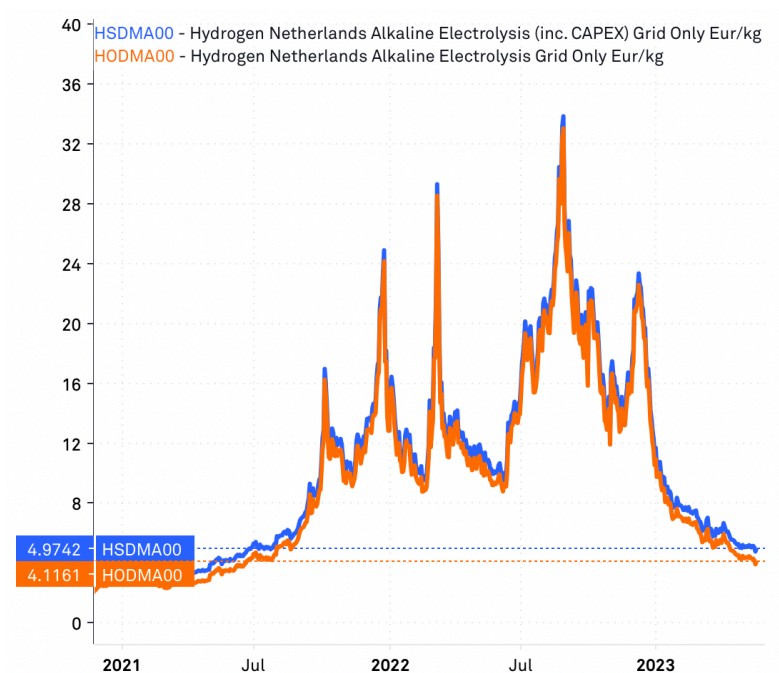


Gráfico 13: Precio del hidrógeno verde producido con electrolizadores alcalinos en Países bajos. Fuente: S&P Platts

En la tecnología alcalina se observa un precio promedio de 11,2474€/kg y 11,9694€/kg entre precio sin y con CAPEX respectivamente, lo que supone una diferencia de 0,722€/kg, es decir, teniendo en cuenta la inversión necesaria se produce un aumento del 6,41% en el precio.

El precio máximo se alcanzó el día 26 de Agosto de 2022 al igual que el anterior tipo de hidrógeno y fue un valor de 33,0249€/kg sin CAPEX y 33,8291€/kg con CAPEX incluido.

Estos valores son extremadamente altos frente a los que vemos en la actualidad que se sitúan en torno a 4€/kg y 5€/kg por lo que el máximo durante este período se situaba en torno a seis veces los valores actuales y de aproximadamente tres veces el valor promedio del precio del hidrógeno verde con electrolizadores alcalinos.

Para terminar, veremos el gráfico de electrólisis PEM y observamos que datos e información nos puede aportar.

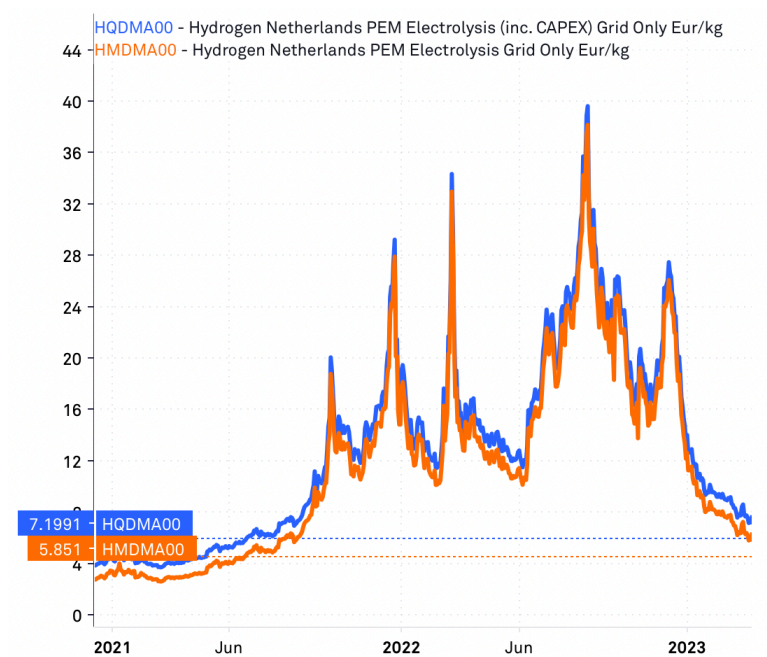


Gráfico 14: Precio del hidrógeno verde producido con electrolizadores PEM en Países Bajos. Fuente: S&P Platts

Para empezar, esta tecnología PEM tiene precios más elevados que los electrolizadores alcalinos, pues en el momento en el que se está redactando este documento se aprecia un dato de 5,851€/kg frente a los 4,1161€/kg sin incluir CAPEX que teníamos anteriormente siendo ambos tipos de hidrógeno verde.

A la hora de calcular los precios promedios de electrolizadores PEM sin y con CAPEX los datos calculados son los siguientes 13,0114€/kg y 14,4062€/kg. Tenemos en esta ocasión las mayores diferencias pues hay 1,3448€/kg de diferencia o un incremento de 10,73% a la hora de contar la inversión de material necesario.

Para finalizar este apartado es interesante centrarse en las diferencias que se pueden observar a la hora de ver los precios con y sin CAPEX.

En el proceso de “steam reforming” vemos una diferencia ligeramente superior al 10%, puesto que es la forma más común de fabricar hidrógeno resulta difícil reducir esta diferencia, ya que este tipo de producción está bien explotado y lleva tiempo instaurado por la industria, así mismo, al ser más barato que el hidrógeno verde la reducción de este porcentaje no supondría tanto beneficio económico como en otros casos.

A la hora de hablar de hidrógeno verde cambia por completo pues existe mayor margen de mejora que en otros tipos de hidrógeno. Los electrolizadores alcalinos no tienen un campo de mejora tan amplio como los electrolizadores PEM, la inversión necesaria para potencias iguales de electrolizadores es menor en el caso alcalino y la diferencia entre el precio con y sin CAPEX también lo es.

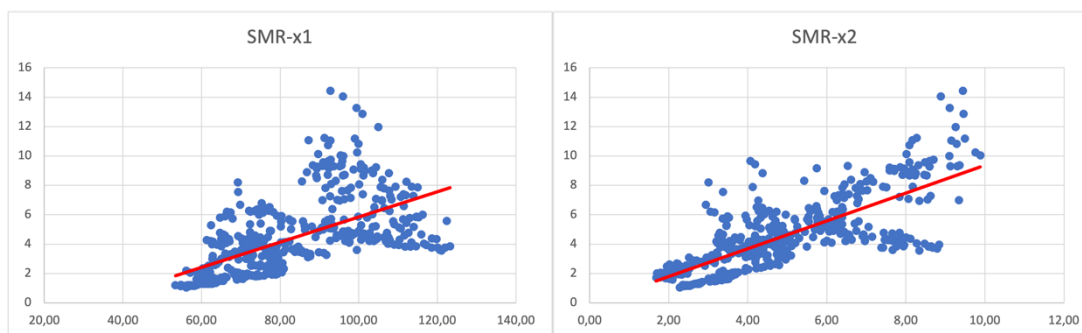
No obstante, el gran margen de mejora que se observa en PEM respecto a electrolizadores alcalinos provoca mucho interés en su desarrollo; sobre todo son adecuados para aplicaciones a pequeña o media escala y uno grandes puntos a favor de la tecnología PEM es que funcionan bien para sistemas de energías renovables donde el suministro de energía es muy variable y que se obtiene un hidrógeno de elevadísima pureza.

5.1 Hidrógeno SMR

Previo a los resultados del análisis de regresión múltiple es interesante ver la líneas de tendencias que existen en distintos gráficos de dispersión simples entre SMR y las distintas variables independientes.

Por simplicidad nos referiremos a lo largo del estudio como x_1 , x_2 y x_3 a las variables independientes y del mismo modo en los gráficos también serán enunciadas así.

En cada gráfico que tenemos a continuación se sitúa la variable dependiente (SMR) en el eje vertical y la variable independiente (x_1 , x_2 o x_3) en el eje horizontal.



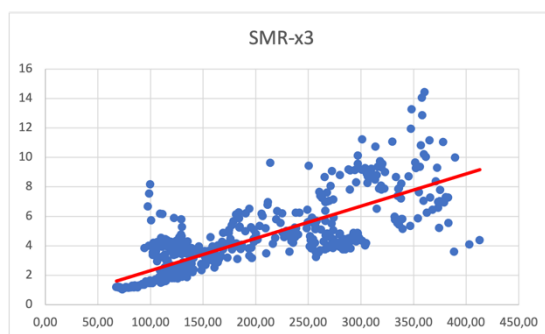


Gráfico 15: Diagramas de dispersión simple entre la variable SMR y resto de variables independientes. Fuente: Elaboración propia

Podemos observar a simple vista que sí existe relación entre la variable dependiente y el resto de variables pues se aprecia cierta linealidad, aunque en algún caso como en el gráfico SMR-x1 veamos ciertos valores muy alejados de nuestra línea de tendencia.

Se ha decidido utilizar la herramienta Excel para el análisis de datos, no obstante, a la hora de hacer el análisis de datos con este programa, también se realiza un análisis de varianza del que podemos obtener más información acerca del estudio de datos.

Aparte del análisis de regresión también se ha realizado un análisis ANOVA que permite complementar el estudios con los resultados obtenidos del mismo.

RESUMEN	
Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,825191399
Coeficiente de determinación R ²	0,680940845
R ² ajustado	0,67902649
Error típico	1,411613545
Observaciones	504

Imagen 11: Cuadro resumen de análisis de regresión de hidrógeno SMR. Fuente: Elaboración propia

El primer dato que nos arroja el cuadro resumen del análisis de regresión es el coeficiente de correlación múltiple del modelo que tiene un valor de 0,82519. Inmediatamente debajo tenemos su coeficiente de determinación (R^2) con 0,68094.

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

Por último, tenemos un error típico de 1,4116, que puede influir como suma o resta, luego se expresa como error de $\pm 1,4116$.

Este error típico se refiere a la medida de dispersión de los residuos, es decir, la diferencia entre los valores observados y los valores predichos por el modelo de regresión.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión	3	2126,374782	708,7915941	355,7025057	1,3704E-123	
Residuos	500	996,3264001	1,9926528			
Total	503	3122,701182				
	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	1,597321758	0,3882714	4,113931026	4,54817E-05	0,834477236	2,360166279
Variable X 1	-0,038600521	0,007003038	-5,511968046	5,69307E-08	-0,052359529	-0,024841514
Variable X 2	0,489945154	0,056338048	8,696523437	4,9449E-17	0,379256674	0,600633635
Variable X 3	0,018797586	0,001748812	10,7487765	2,19251E-24	0,015361661	0,022233511

Imagen 12: Análisis de varianza de hidrógeno SMR y las variables x1, x2, x3. Fuente: Elaboración propia

El análisis de varianza se ha realizado con una confianza del 95%. Los grados de libertad que existen son tres debido a que mi número de variables independientes son tres.

Resulta importante realizar un apunte teórico en este momento para comprender la utilidad de la F obtenida en ANOVA. La F de Fisher o F estadística es una medida estadística utilizada en el ANOVA para evaluar si las diferencias observadas entre las medias de los grupos son estadísticamente significativas. Cuando la F de Fischer es mayor que el valor crítico de F se puede asumir que los factores o variables independientes que se están estudiando tienen un impacto significativo en la variable dependiente.

Se ha obtenido un valor de F de Fischer de 355,7025 y por otro lado un valor crítico de F de 1,3704 elevado a -123.

Establece que el modelo sigue una ecuación según el análisis de regresión de la siguiente forma:

$$y = 1,5973 - 0,0386x_1 + 0,4899x_2 + 0,01879x_3;$$

La variable y sería nuestra variable dependiente, precio de hidrógeno producido por steam reforming (SMR). La influencia de las variables independientes la vemos en el segundo término de la ecuación.

La gran diferencia entre coeficientes se debe a la diversidad a la hora de recoger los datos ya que, por ejemplo, x_1 está recogido en €/barril brent y tenemos valores entre 40 y 130, similares a los que tenemos a la hora de trabajar con datos de carbón en cambio los del gas natural están recogidos en €/MMBtu por lo que se sitúan en el intervalo entre 1 y 10.

El signo del coeficiente que se observan en la recta de regresión indica el tipo de relación que tiene, en coeficiente negativo indica relación inversamente proporcional y el coeficiente positivo indica relación directamente proporcional.

Para ver qué tipo de relación tenemos entre las distintas variables se ha utilizado una matriz de correlaciones como vemos a continuación:

	y_{SMR}	x_1	x_2	x_3
y_{SMR}	1	0,59324345	0,77708202	0,78249315
x_1	0,59324345	1	0,71098001	0,85328808
x_2	0,77708202	0,71098001	1	0,83855693
x_3	0,78249315	0,85328808	0,83855693	1

Imagen 13: Matriz de correlaciones entre SMR, x_1 , x_2 y x_3 . Fuente: Elaboración propia

La matriz de correlación, por definición es simétrica y nos vamos a centrar en los datos que hay acerca de la relación entre nuestra variable dependiente (y_{SMR}) con el resto de las variables independientes.

- y_{SMR} - x_1 : 0,5932; se refiere al coeficiente de correlación que existe entre el precio del hidrógeno SMR con el precio del barril brent de petróleo
- y_{SMR} - x_2 : 0,777; se refiere al coeficiente de correlación que existe entre el precio del hidrógeno SMR con el precio del gas natural

- y_{SMR-x3} : 0,7824; se refiere al coeficiente de correlación que existe entre el precio del hidrógeno SMR con el precio del carbón

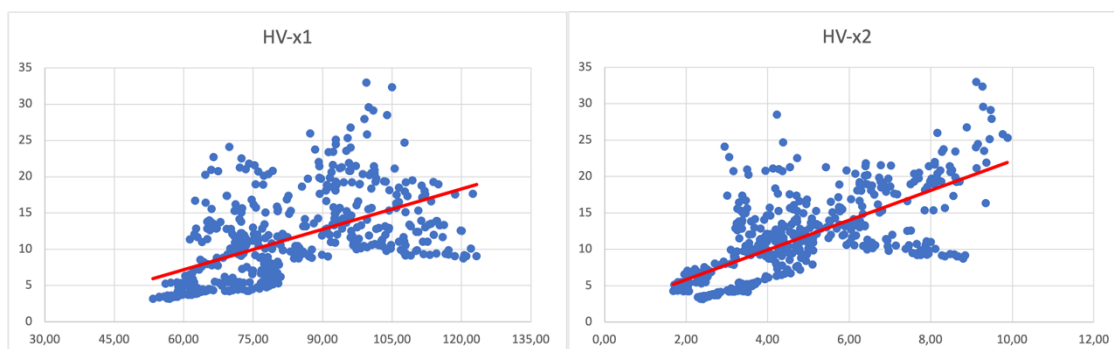
5.2 Hidrógeno verde

Al igual que hemos realizado en el anterior análisis, antes de ver los resultados del análisis de regresión múltiple es interesante ver la líneas de tendencias que existen en distintos gráficos de dispersión simples entre nuestra variable dependiente que será el precio del hidrógeno verde en €/kg y las distintas variables independientes.

Las variables independientes son exactamente las mismas que antes y por simplicidad seguiremos con su denominación de x_1 , x_2 y x_3 .

Veremos de nuevo tres distintos gráficos en los que se sitúa la variable dependiente (precio del hidrógeno verde) en el eje vertical y la variable independiente (x_1 , x_2 o x_3) en el eje horizontal.

Durante este análisis utilizaremos una notación propia para nuestra variable dependiente que es el precio del hidrógeno verde generado por electrólisis alcalina en €/kg, será conocido como HV, que son las siglas de hidrógeno verde y nos permite ser más ágiles a la hora de trabajar en el proyecto.



EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

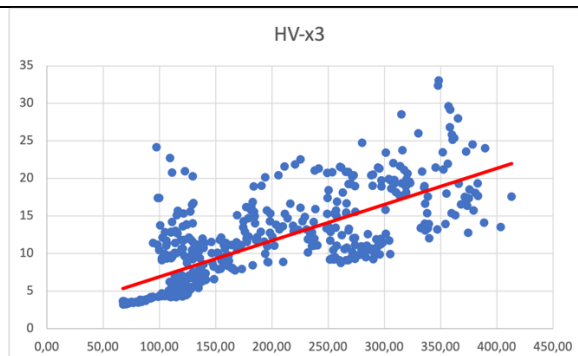


Gráfico 16: Diagramas de dispersión simple entre la variable HV y resto de variables independientes. Fuente: Elaboración propia

A priori parece que sí existe una tendencia ligera aun así vemos bastante dispersión en todos los gráficos por lo que se podría insinuar que se obtendrán resultados distintos a los que obtuvimos con la variable SMR.

Al igual que hemos hecho en el experimento anterior, se realizará un análisis de regresión con la herramienta Excel y así mismo un análisis de varianza o ANOVA seguido de más información que nos aporta la matriz de correlaciones de las variables que existen en este modelo.

RESUMEN	
Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,7607519
Coefficiente de determinación R ²	0,578743453
R ² ajustado	0,576230989
Error típico	3,867209348
Observaciones	507

Imagen 14: Cuadro resumen de análisis de regresión de hidrógeno HV. Fuente: Elaboración propia

En el cuadro resumen de la regresión múltiple sobre el modelo compuesto por nuestra variable dependiente HV y las tres variables independientes x1, x2, x3 nos informa de que existe un coeficiente de correlación múltiple en el modelo de 0,7607. El coeficiente de determinación tiene un valor de 0,57874. Se observa un error típico de valor 3,8672.

EL HIDRÓGENO COMO NUEVO COMMODITY

ANÁLISIS DE VARIANZA						
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión	3	10334,81671	3444,938904	230,3489083	5,11357E-94	
Residuos	503	7522,519996	14,95530814			
Total	506	17857,33671				
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	6,149654886	1,057150981	5,817196405	1,06561E-08	4,07267944	8,226630333
Variable X 1	-0,09880732	0,019157343	-5,157673533	3,60243E-07	-0,136445587	-0,061169053
Variable X 2	0,922524536	0,154494805	5,971233383	4,45376E-09	0,618989921	1,226059151
Variable X 3	0,046793245	0,00479016	9,768619009	9,36322E-21	0,037382059	0,05620443

Imagen 15: Análisis de varianza de hidrógeno HV y las variables x1, x2, x3. Fuente: Elaboración propia

El ANOVA que observamos ha sido realizado con una confianza del 95% y tiene tres grados de libertad pues tenemos tres variables independientes que afectan a nuestra HV en el modelo.

Se observa un valor de la F estadística o F de Fischer de 230,3489 y un valor crítico de F de 5,11356 elevado a -94.

La ecuación que sigue este modelo obtenido tras el análisis de regresión es la siguiente:

$$y = 6,1496 - 0,0988x_1 + 0,9225x_2 + 0,0467x_3;$$

Al igual que en la ocasión anterior el coeficiente que acompaña a x1, es negativo lo que indica que según el modelo un incremento en el precio del barril brent provocaría un descenso en el precio del hidrógeno verde.

Como sabemos, la y representa la variable que se quiere predecir, que en esta ocasión estamos hablando de nuestra variable HV.

Para ver qué tipo de relación tenemos entre las distintas variables se ha utilizado una matriz de correlaciones como vemos a continuación:

	y_{HV}	$x1$	$x2$	$x3$
y_{HV}	1	0,54192015	0,70408032	0,72511035
$x1$	0,54192015	1	0,71438277	0,85578966
$x2$	0,70408032	0,71438277	1	0,83988969
$x3$	0,72511035	0,85578966	0,83988969	1

Imagen 16: Matriz de correlaciones entre HV, x1, x2 y x3. Fuente: Elaboración propia

- y_{HV} - $x1$: 0,5419; se refiere al coeficiente de correlación que existe entre el precio del hidrógeno verde de generación por electrólisis alcalina con el precio del barril brent de petróleo
- y_{HV} - $x2$: 0,7040; se refiere al coeficiente de correlación que existe entre el precio del hidrógeno verde de generación por electrólisis alcalina con el precio del gas natural
- y_{HV} - $x3$: 0,7251; se refiere al coeficiente de correlación que existe entre el precio del hidrógeno verde de generación por electrólisis alcalina con el precio del carbón

6. Análisis de resultados

6.1 Hidrógeno SMR

Tras el análisis de regresión y el análisis de varianza realizado procedemos a interpretar y comentar los resultados obtenidos.

En primer lugar, nos encontramos con un coeficiente de correlación múltiple de 0,82519; siendo 1 el máximo posible a obtener. No es un mal coeficiente e indica que sí existe una relación notable en el modelo y por ello las variables dependientes tiene influencia sobre nuestra variable dependiente, el precio del hidrógeno SMR.

Como es lógico, elevando este resultado al cuadrado obtenemos el coeficiente de determinación R^2 que es 0,68094 el cual indica que el 68,094% de variaciones en el precio de hidrógeno SMR puede explicarse debido a modificaciones en los precios de gas natural, petróleo y carbón.

En otras palabras, el restante 31,906% de variación se debe a otras fuentes como pueden ser el error aleatorio u otro tipo de variables que no se hayan tenido en cuenta en el análisis de regresión.

Siguiendo con los resultados obtenidos, nos apoyaremos en la presencia de la F de Fischer que se ha obtenido tras el ANOVA. Puesto que se ha obtenido un valor F ampliamente mayor que el valor crítico de F, se afirma que es significativa la incidencia que tienen las variables independientes x_1 , x_2 y x_3 .

En tercer lugar, al observar los resultados obtenidos al realizar la matriz de correlaciones se puede ver como las tres variables independientes tienen incidencia en nuestra variable dependiente.

Mientras que el gas natural y el carbón tiene unos coeficientes de correlación con respecto nuestra variable independiente muy similares de 0,777 y 0,7824 respectivamente, por otro lado, nos encontramos que el precio del petróleo tiene un coeficiente de correlación menor, que es igual a 0,5932. Estos resultados podrían intuirse gracias a los gráficos de dispersión realizados anteriormente que ayudan a posteriori en la interpretación de estos resultados.

6.2 Hidrógeno verde

Al igual que realizamos en el estudio anterior, en este apartado veremos que ideas y realidades se pueden obtener de los resultados obtenidos

Nuestro coeficiente de correlación múltiple es igual a 0,7607. Si nos fijamos en las gráficas de dispersión podía esperarse un resultado similar a este que no es muy bueno realmente pues existía cierta dispersión arriba y debajo de las líneas de tendencia de los gráficos.

Por ende, el R^2 resulta 0,57874 que quiere decir que el 57,874% de variaciones en el precio de hidrógeno HV se puede explicar gracias a las fluctuaciones de los precios de gas natural, petróleo y carbón. Realmente estamos por ligeramente encima del 50%, lo cual indica que casi cada 1 de 2 veces no hay influencia de nuestras variables x_1 , x_2 , x_3 sobre la fluctuación en HV

Al igual que en el otro análisis, la comparación de la F de Fischer y el valor crítico de F concluye que sí se puede considerar significativa la incidencia que tienen las variables independientes x_1 , x_2 y x_3 en nuestro modelo de regresión sobre la variable HV.

Para terminar, miramos los detalles que ofrece la matriz de correlaciones y con los datos que se extraen se puede ver como las tres variables independientes tienen cierta incidencia en nuestra variable dependiente HV

Los coeficientes de correlación del gas natural y carbón que son exactamente 0,704 y 0,7251 respectivamente indican que tienen una incidencia muy similar sobre nuestra variable HV en cambio, existe algo más de diferencia con el coeficiente restante pues encontramos que con el precio del petróleo el coeficiente de correlación de valor es 0,5419.

6.3 Comparación de resultados

La comparación de los distintos resultados obtenidos en ambos casos permite avanzar más en la profundidad del estudio.

A continuación, veremos qué diferencias notables existen entre el análisis con variable SMR y con la variable HV.

Coefficiente de variación

Puesto que el precio del hidrógeno es algo relativamente nuevo y no existen muchos datos históricos de ellos, es muy posible que por ello los resultados se hayan visto influenciados por este fenómeno.

Por este motivo, vamos a calcular el coeficiente de variación del precio del hidrógeno SMR y del precio del hidrógeno de electrólisis alcalina HV.

Se aplica la siguiente fórmula:

$$cv[\%] = \frac{\sigma}{\mu} 100;$$

cv: coeficiente de variación

σ : desviación estándar

μ : media

Para nuestra variable SMR tenemos un coeficiente de variación de 57,8%

Para nuestra variable HV tenemos un coeficiente de variación de 52,97%

Ambos coeficientes de variación resultan elevados para un estudio de esta índole, pero los datos que tenemos son de dos años de antigüedad y por eso hemos trabajado con ello.

Ambas variables tienen coeficientes de variación elevados pues superan el 50% las dos variables. Está demostrado que la influencia de la guerra de Ucrania es un hecho a tener en cuenta pues es lo que principalmente ha provocado la subida de precios de los recursos energéticos y son estos recursos los que se están utilizando como variables dependientes en el modelo.

Si sumamos todo esto al hecho de que los datos de precios de hidrógeno se han empezado a recoger hace relativamente poco en comparación con otras commodities, entenderemos por qué tenemos ese tipo de coeficientes de variación.

Para responder a la pregunta de qué modelo funciona mejor a la hora de predecir el posible precio del hidrógeno se puede averiguar viendo cada resultado obtenido en los distintos estudios.

En el análisis de hidrógeno SMR se observa mayor coeficiente de correlación múltiple y mayor coeficiente de determinación, concretamente R^2 es 0,68094 frente al R^2 de HV que es 0,57874, es decir, mientras que en el análisis de SMR se podían explicar el 68,094% de variaciones en el precio de hidrógeno SMR puede explicarse gracias a x_1 , x_2 , x_3 en el análisis de HV solo ocurre esto en el 57,874% de las ocasiones. Existe una diferencia de 0,1022 que debemos considerar y provoca que no funcione tan bien un modelo como el otro.

Aun así, un coeficiente de determinación cercano al 0,7 tampoco resulta muy atractivo de cara a tener fiabilidad para desarrollar un modelo, si bien estamos contando con un modelo simple de estudio para este proyecto que solo tiene tres variables independientes cuando en la realidad los precios de las commodities fluctúan dependiendo de múltiples factores.

En la matriz de correlaciones también se observan diferencias entre ambos modelos, el factor de correlación múltiple está influenciado por los distintos coeficientes de correlación entre cada variables independiente y nuestra variable respuesta. Por ello todos los coeficientes del análisis SMR son mayores que sus análogos de HV y en ambos análisis la variable que resulta menos significativa para el modelo es el precio del barril Brent de petróleo.

Otra similitud que existe en el modelo es a la hora de hablar de errores típicos de cada análisis, si bien son distintos pues para SMR tenemos un error de 1,4116 y para HV tenemos 3,8672 esto se debe a que el precio del hidrógeno SMR es menor y debemos comparar este error con las medias de cada variable respuesta que son 4,3105 €/kg y 11,2474€/kg respectivamente. Por ello en ambos casos se afirma que son errores entre el 30 y 35 %.

7. Conclusiones

Es innegable que una correcta transición e implementación de hidrógeno verde provocaría una importante contribución para la reducción de la huella de carbono, no es suficiente pues existen múltiples factores que perjudican y generan emisiones de carbono negativas para el planeta, pero resultaría un paso importante en la mejora del medio ambiente.

Al hilo del anterior párrafo, hay que destacar que la transición e implementación del hidrógeno verde se ha realizado con una celeridad mucho mayor que la que se preveía años atrás.

La guerra que está ocurriendo actualmente en Europa ha sido el detonante para que Europa se diera cuenta de la gran dependencia energética que tenía de Rusia y es por ello que ha buscado otro tipo de vías que le puedan ayudar a conseguir una independencia energética de Rusia como por ejemplo el proyecto de European Hydrogen Backbone en el que hay implicados hasta 28 países trabajando para un bien común.

La economía alrededor del hidrógeno verde está emergiendo, de hecho, no existe ni siquiera un mercado del hidrógeno verde como tal pero ya se está trabajando en su creación.

En esta economía, la tecnología de los electrolizadores juega un papel esencial ya que son necesarios para completar el proceso de electrólisis y obtener nuestro hidrógeno verde. Por este motivo se prevén reducciones de en torno al 50% del coste de los electrolizadores en 2050.

Hoy en día se puede afirmar que económicamente no es rentable la generación de hidrógeno verde pues su producción es del orden de dos o tres veces más caro que la producción de hidrógeno no renovable, no obstante, los beneficios futuros que puede aportar el hidrógeno verde es lo que provoca el interés que se ha despertado sobre él.

El hidrógeno verde conformará una economía de escala a lo largo de los años, empezaremos a notarlo a partir de 2030 y ya en 2050 se espera que hayan existido enormes variaciones de costes en torno a esta economía del hidrógeno verde.

De hecho, el hidrógeno verde será más barato de producir que otros tipos de hidrógeno que sí generen emisiones de carbono negativas para el planeta.

Debido a la economía de escala, ciertas tecnologías tienen un CAPEX que actualmente complica la rentabilidad del hidrógeno verde frente a otros colores de hidrógeno, pero a medida que pase el tiempo la situación cambiará en favor del hidrógeno verde.

Gracias al estudio realizado se puede afirmar que el precio de las commodities petróleo, carbón y gas natural sí influye en el precio del hidrógeno.

Este era el resultado esperado a priori de realizar el análisis de regresión pues como hemos explicado el LCOH tiene dependencia del precio de la electricidad el cual está relacionado con los combustibles fósiles pues siguen siendo una forma notable de generación de energía en todo el mundo.

Las fluctuaciones de precio de las commodities seleccionadas no afectan de la misma manera a todos los tipos de hidrógeno. Se puede apreciar como en el hidrógeno producido por steam reforming se ha creado un modelo de regresión con mejores resultados que en el hidrógeno verde.

Un dato que explica a simple vista esta diferencia es el coeficiente de determinación R^2 que tiene valores de 0,68094 para el hidrógeno SMR y 0,57874 para el HV.

Esto ocurre por diversas razones, pero la más obvia es porque el hidrógeno no renovable utiliza directamente combustibles fósiles, en este caso concreto gas natural, para el proceso de generación del hidrógeno por lo que esta relación directa es lo que provoca que las fluctuaciones del precio de las commodities de combustible fósil se adapten mejor a las variaciones de precio del hidrógeno producido por steam reforming.

Por otro lado, tenemos el precio del hidrógeno verde que también se ve afectado en por los cambios de precios de petróleo, gas natural o carbón.

Se debe a que la infraestructura necesaria para producir, almacenar y distribuir el hidrógeno verde aún está en desarrollo y no está tan extendida como la infraestructura existente para los combustibles fósiles.

Mientras que los precios de los combustibles fósiles sean bajos, puede desalentar las inversiones en infraestructura de hidrógeno verde, lo que puede mantener su precio relativamente alto.

Otro detalle importante es la predominancia de hidrógeno no renovable a día de hoy en el mercado. Tan sólo algo más del 5% de hidrógeno producido en el mundo es verde por lo que, debido a la competencia en el mercado energético y el hecho de que tenga tanto peso todavía el hidrógeno no renovable, provoca las fluctuaciones de otros tipos de hidrógeno influyen en el precio del hidrógeno verde.

Por último, es importante indicar que los resultados obtenidos están basados en un volumen de datos que es demasiado reciente y apenas tiene historial sumado a que sólo se han tenido en cuenta tres tipos de commodities puede ser un indicio de que con una mayor cantidad de información y más variables de tipos de combustibles fósiles en el modelo, se podrían haber obtenido mejores resultados que explicarían la variabilidad del precio del hidrógeno en un mayor porcentaje de veces.

8. Anexos

Alineación con ODS

Los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) también conocidos como Agenda 2030, son un conjunto de 17 metas y 169 indicadores adoptados por la Asamblea General de las Naciones Unidas en septiembre de 2015. Estos objetivos abarcan una amplia gama de áreas, desde la erradicación de la pobreza y el hambre hasta la igualdad de género, la educación de calidad, la acción climática y la paz y la justicia.

Los ODS proporcionan un lenguaje común y una visión compartida para abordar los desafíos globales, y sirven como una herramienta para monitorear y evaluar el progreso hacia el logro de metas específicas para 2030. También promueven la rendición de cuentas y la transparencia en la implementación de políticas y programas a nivel nacional e internacional

La alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible se aprecia notablemente pues el proyecto trata sobre el hidrógeno verde, el cual puede ser utilizado como un vector energético y así puede ayudar a reducir y suprimir el consumo de combustibles fósiles. Por ello concuerda principalmente con el ODS número 7: Energía asequible y no contaminante.



Dentro de este objetivo nos encontramos como aspectos principales: garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos; aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas y por último, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética. El desarrollo y apuesta por el hidrógeno verde próximos años de futuro pueden ayudar a reforzar cada aspecto mencionado anteriormente.

Del mismo modo también está relacionado con el ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles, es bien sabido que existen ciudades en las que la preocupación por la emisión de carbono es notable y afecta a la salud de las personas, por lo que una correcta implantación y promoción del uso de hidrógeno verde como vector energético provocaría consecuentemente la reducción de huella de carbono en ciudades.



Por su estrecha relación a los ODS mencionados anteriormente también debemos mencionar el ODS 13: Acción por el clima, como ya hemos dicho, la implantación del hidrógeno verde en el día a día energético nos facilitaría el camino hacia el cumplimiento de estos ODS.



Entre los ODS 11 (Ciudades y comunidades) y 13 (Acción por el clima) se han marcado objetivos destacables como: reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo o incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales.

Objetivos en los que la presencia de hidrógeno verde ayudaría notablemente, por ello para la mejoría de diversos problemas a nivel medioambiental los gobiernos y grandes empresas ven en el hidrógeno verde un potencial por el que merece la pena arriesgarse.

9. Bibliografía

- [1] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, MITERD. (2020). “Hoja de ruta para el hidrógeno verde”.
- [2] Iberdrola. (2023). Pioneros en hidrógeno verde.
<https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde>
- [3] Global Carbon Atlas. (2020). Carbon story.
<https://globalcarbonatlas.org/emissions/carbon-story/>
- [4] International Energy Agency, IEA. (2023). Renewables
<https://www.iea.org/energy-system/renewables>
- [5] International Energy Agency, IEA. (2023) Net Zero Industry Act: CCUS.
<https://www.iea.org/policies/17545-net-zero-industry-act-ccus>
- [6] International Renewable Energy Agency, IRENA (2023) “Renewable capacity statistics 2023.”
- [7] International Renewable Energy Agency, IRENA (2023) “Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal”
- [8] Wikipedia. (2023) Hidrógeno <https://es.wikipedia.org/wiki/Hidrógeno>
- [9] Linares Hurtado, José Ignacio y Moratilla Soria, Beatriz Yolanda. (2007). “El hidrógeno y la energía”. Universidad Pontificia Comillas, ICAI.
- [10] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, MITERD. (2023). “Borrador de la actualización de PNIEC 2023-2030”
- [11] Nuevo, David. (2022) “El hidrógeno verde”. Tecpa
<https://www.tecpa.es/hidrogeno-verde/>
- [12] Alonso Pascual, Cristina. (2022) Tipos de hidrógeno. Newtral.
<https://www.newtral.es/tipos-hidrogeno-colores-verde-azul-rosa-barmar/20221027/>
- [13] Figuerola-Ferretti, I., McCrorie, J. R., & Paraskevopoulos, I. (2020). “ Mild explosivity in recent crude oil prices”.
- [14] International Energy Agency, IEA (2022). “Global hydrogen review 2022”
- [15] Comisión Europea (2022). “REPowerEU”

- [16] International Renewable Energy Agency, IRENA (2022) “Green hydrogen cost and potential”
- [17] Valle, David. (2021) “Riesgos del hidrógeno”
<https://elperiodicodelaenergia.com/los-riesgos-del-hidrogeno/>
- [18] McGovan, Jack (2023) “German electrolyser, solar PV, CCS projects receive funding under EU decarbonisation scheme”
<https://www.cleanenergywire.org/news/german-electrolyser-solar-pv-ccs-projects-receive-funding-under-eu-decarbonisation-scheme>
- [19] Granados Deville-Bellechasse, Jorge Rafael. (2022). “Análisis técnico-económico de generación de hidrógeno renovable” Universidad Pontificia Comillas, ICAI
- [20] Villarreal, David. (2022) “Qué es la electrolisis y por qué es clave en la transición verde” <https://www.diariomotor.com/que-es/electrolisis/>
- [21] Amber Grid, Bulgartransgaz, Connexus, CREOS, DESFA, Elering, Enagás, Enginet, Eustream, FGSZ, FluxSwiss, Fluxys Belgium, Gas Connect Austria, Gasgrid Finland, Gassco, Gasunie, Gas Networks Ireland, GAZ-SYSTEM, GRTgaz, National Grid, NET4GAS, Nordion Energi, OGE, ONTRAS, Plinacro, Plinovodi, REN, Snam, TAG, Teréga, and Transgaz. (2023). “European Hydrogen Backbone” EHB.
- [22] Morgan, Harry. (2022). “Why market dynamics will reduce the average price of green hydrogen to \$1.50/kg by 2030” Recharge.
<https://www.rechargenews.com/energy-transition/opinion-why-market-dynamics-will-reduce-the-average-price-of-green-hydrogen-to-1-50-kg-by-2030/2-1-1292801>
- [23] Retuerto, María (2023). “Tipos de electrolizadores”. Idea Green.
<https://ideagreen.es/hidrogeno-verde/tipos-de-electrolizadores/>
- [24] ENI. (2023). “Hydrogen, its potential as an energy vector”.
<https://www.eni.com/en-IT/operations/natural-resources/hydrogen-clean-energy.html>
- [25] Acciona. (2022). “El hidrógeno verde: la energía del futuro clave en la descarbonización”. https://www.acciona.com/es/hidrogeno-verde/?_adin=02021864894
- [26] Vector Renewables (2022) “LCOH, how is the price of Green Hydrogen calculated?” <https://www.vectorenrenewables.com/en/media-en/blog/lcoh-how-is-the-price-of-green-hydrogen-calculated-1>

[27] Alonso Rodríguez, María Teresa (2022) “Diseño de una planta de producción de hidrógeno verde en San Roque” Trabajo de Fin de Máster. Universidad Europea

[28] Sanchez Galán, Javier. (2020). “Análisis de regresión”.
<https://economipedia.com/definiciones/analisis-de-regresion.html>

[29] Glen, Stephanie (2023) "Regression Analysis: Step by Step Articles, Videos, Simple Definitions" <https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/regression-analysis/>

[30] Fernado, Jason (2022) “What Is a Commodity and Understanding Its Role in the Stock Market” <https://www.investopedia.com/terms/c/commodity.asp>

[31] Comisión Europea. (2021). “Marco sobre clima y energía para 2030.”