



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO EL HIDRÓGENO COMO VECTOR PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA, CASOS DE USO Y DISEÑOS DE PLANTA MÁS RELEVANTES

Autor: Alfonso Barquín Díaz

Director: Emilio Manuel Domínguez Adán

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
El hidrógeno como vector para el almacenamiento de energía eléctrica, casos de uso y
diseños de planta más relevantes

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2022/23 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.: Alfonso Barquín Díaz

Fecha: 03/06/2023

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Emilio Manuel Domínguez Adán

Fecha: 03/06/2023

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Alfonso Barquín Díaz

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: EL HIDRÓGENO COMO VECTOR PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA, CASOS DE USO Y DISEÑOS DE PLANTA MÁS RELEVANTES, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 03 de junio de 2023

ACEPTA



Fdo

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO EL HIDRÓGENO COMO VECTOR PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA, CASOS DE USO Y DISEÑOS DE PLANTA MÁS RELEVANTES

Autor: Alfonso Barquín Díaz

Director: Emilio Manuel Domínguez Adán

Madrid

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis padres, quienes me brindaron la valiosa oportunidad de estudiar en una prestigiosa institución universitaria como ICAI. Su apoyo incondicional durante los momentos difíciles de mi trayectoria académica y personal ha sido fundamental para que nunca me rindiera y siguiera avanzando.

También, me gustaría agradecer a mi abuelo Fernando, por enseñarme el mundo de la ingeniería y mostrarme el futuro que podría tener como ingeniero, y al resto de mi familia por siempre estar ahí para mí.

Finalmente, me gustaría agradecer al director de este trabajo, Emilio Manuel, por ayudarme durante la investigación y redacción de este proyecto en otro país, así como por siempre estar dispuesto a ayudar, apoyar y solucionar dudas, incluso teniendo en cuenta las diferencias horarias entre España y Estados Unidos.

EL HIDRÓGENO COMO VECTOR PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA, CASOS DE USO Y DISEÑOS DE PLANTA MÁS RELEVANTES

Autor: Barquín Díaz, Alfonso.

Director: Domínguez Adán, Emilio Manuel

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este TFG lleva a cabo una labor de investigación exhaustiva de la viabilidad del uso de hidrógeno como vector para el almacenamiento de energía eléctrica. Además, se muestran los casos de uso, diseños de planta, y los tipos de almacenamiento y transporte de hidrógeno más usados en la actualidad. Esto se realiza junto a análisis de costes para averiguar si el hidrógeno será viable en el futuro próximo.

Palabras clave: Hidrógeno, Energía Renovable, Viabilidad

1. Introducción

Este trabajo tiene como objetivo el análisis del hidrógeno como vector de almacenamiento de energía eléctrica, examinando los casos de uso y diseños de plantas relevantes que pueden ayudar en la profundización de esta investigación.

La transición a fuentes de energía renovables y sostenibles presenta un desafío crucial para el almacenamiento de energía de energía eléctrica en la actualidad. A medida que la energía solar y eólica se convierten en componentes integrales de la matriz energética, la necesidad de soluciones de almacenamiento de energía escalables y eficientes crece exponencialmente. Por ello, el hidrógeno se presenta como una alternativa alentadora, debido a su capacidad de almacenamiento a largo plazo y su posición como un combustible limpio en comparación a los combustibles fósiles.

El objetivo principal de este estudio es por tanto explorar el potencial del hidrógeno como vector de almacenamiento de energía eléctrica y su viabilidad técnica y económica en el futuro cercano. Para cumplir este objetivo, se evaluará el hidrógeno en varios contextos, incluida la generación de energía estacionaria, el transporte y la integración en redes eléctricas.

2. Definición del proyecto

Este trabajo consta de varias partes, las cuales se pueden agrupar en ocho (8) partes básicas: la primera parte trata sobre la recopilación de trabajos, proyectos, artículos y noticias que tengan que ver con el tema del hidrógeno, de tal manera que la investigación sobre los diferentes tópicos que constituyen este tema se haga más rápida y eficientemente.

Después se procede a la investigación del hidrógeno como elemento, en la que se muestran las diferentes propiedades y características de este elemento, como los problemas de seguridad que presenta o los métodos existentes para generar estacionariamente este elemento, entre ellos destacamos la electrólisis y los reformados catalíticos, ya que estos son los dos métodos más usados. La electrólisis es el método en el que nos centramos en adelante, debido a que este método permite la creación de hidrógeno verde, que será en el que centraremos el estudio del estado actual de su uso, y del que describiremos su almacenamiento, transporte y casos de uso actuales. Esto es muy importante, ya que describiendo dichos elementos del hidrógeno podemos entender el estado actual de esta tecnología, lo cual sumado a un análisis de plantas de hidrógeno y un análisis de coste de una planta común de hidrógeno, puede hacernos entender si la viabilidad del hidrógeno es posible o no.

A modo de conclusión, se resuelve la pregunta inicial de viabilidad y se proponen posibles futuros trabajos, los cuales pueden no solo mejorar esta viabilidad, sino que también pueden presentar soluciones a los problemas más graves del hidrógeno, entre ellos, la eficiencia y los costes de producción. El esquema de trabajo seguido ha sido el siguiente:

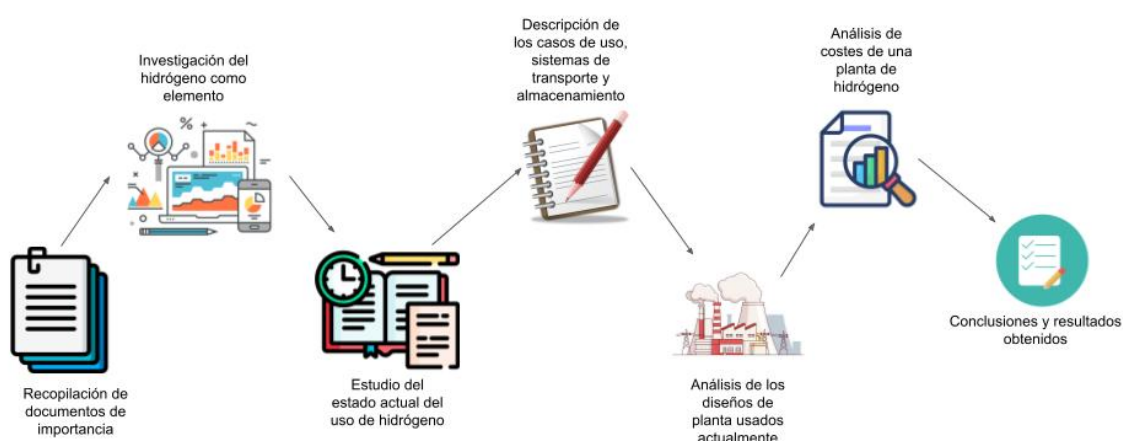


Figura 1: Esquema del trabajo

3. Resultados

Durante este proyecto se ha estudiado el hidrógeno desde diferentes ángulos, analizando las ventajas y problemas que este elemento trae consigo en su uso como vector para el almacenamiento de energía eléctrica.

Habiendo realizado un análisis de costes, estudiado los diferentes diseños de planta y los casos de uso más relevantes del hidrógeno, podemos afirmar que los mayores problemas observados que se oponen en el camino de la viabilidad del hidrógeno son el coste de producción de hidrógeno, siendo estos costes sumados a los ya grandes costes de almacenamiento y mantenimiento, los problemas de seguridad, y la existencia de mejores alternativas en temas de pilas de combustible, en otras palabras, los problemas de eficiencia que las pilas de combustible presentan en comparación con otros combustibles.

En lo referente al primer problema, cabe destacar que el coste de 1 kg de hidrógeno no es lo suficientemente rentable como para que una inversión a gran escala sea 100% confiable. Tras un análisis de costes, y teniendo en cuenta la amortización de una planta de hidrógeno, los costes de operación y mantenimiento del equipo, pero no teniendo en cuenta los intangibles de publicidad, relevancia, acceso a subvenciones y los precios de los materiales, de transporte, de mano de obra y otros costes indirectos, podemos llegar a un precio de 7,97 euros por kilogramo de hidrógeno, que se mantiene entre los 3 y 8 euros establecidos por Agencia Internacional de la Energía. Este coste no es rentable, ya que para que fuera rentable sería necesario que el precio bajara a los 1,50 euros, sin embargo, la probabilidad de que eso ocurra en la próxima década no es segura, ya que depende de muchos factores fuera del control de investigadores, ya que el principal coste es el precio de la electricidad usada en el proceso, por lo que, si ese precio no disminuye de aquí a 2030, el precio del hidrógeno no verá una disminución importante.

Costes de producción de hidrógeno por kilogramo

$$\begin{aligned} &= LCOH + \frac{\text{Coste de mantenimiento y operación} + \text{Amortización}}{\text{Producción de hidrógeno}} \\ &= 6,99 + 0,98 = 7,97 \text{ €/Kg} \end{aligned}$$

Figura 2: Cálculo del coste de producción de 1 kg de hidrógeno

$$LCOH = \frac{\text{Coste electrolizador} + \sum_{t=1}^{VU} \frac{\text{Coste anual de la electricidad}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{VU} \frac{\text{Cantidad de H}_2 \text{ producida al año}}{(1+r)^t}}$$

Figura 3: Fórmula de LCOH

En lo que respecta al segundo problema, el hidrógeno es un elemento que presenta grandes problemas de seguridad, ya que es un elemento inodoro, incoloro e insípido, es muy difícil de detectar por los sentidos humanos, por lo que son necesarias varias medidas de seguridad para impedir fugas o explosiones. La posibilidad de una fuga es seriamente peligrosa, ya que el hidrógeno es el combustible con la más baja energía de autoignición, lo que quiere decir que es el elemento que necesita menos energía para prenderse a sí mismo. Por otra parte, el hidrógeno también tiene la temperatura más alta a la que una sustancia entra en ignición espontáneamente sin necesidad de chispa o llama, lo cual baja las probabilidades de explosión cuando se maneja el hidrógeno. Es necesario, por tanto, mejorar los sistemas de seguridad en plantas y en el uso de hidrógeno en elementos como pilas de combustible, mejorando los sensores de detección de fugas para evitar fuegos o explosiones durante el uso o manejo de hidrógeno.

HYDROGEN IGNITION ENERGY AS COMPARED TO OTHER COMMON FUELS

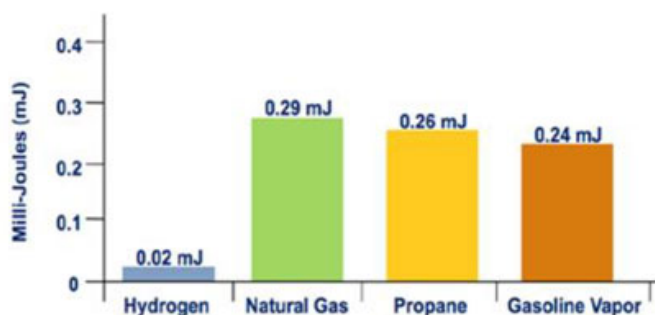


Figura 4: Energía necesaria para la ignición de combustibles

Finalmente, discutimos el tercer mayor problema del hidrógeno en su camino de viabilidad como energía limpia, eficiente y rentable, y es la existencia de mejor competencia en los demás sectores. Desde el punto de vista de un usuario común, la inversión en esta tecnología cuando ya existen mejores alternativas y más eficientes es muy complicada. Por ejemplo, la eficiencia de una pila de combustible es mejor que el uso de gasolina, sin embargo, no es mejor que un coche eléctrico actual, tal como se ve en la imagen proporcionada. No solo eso, también comparando la

inversión necesaria para conseguir la infraestructura necesaria para que los coches de pila de combustible fueran más comúnmente usados sería enorme, basta con ver el número de hidrogeneras que hay en España, siendo tan solo 11 actualmente.

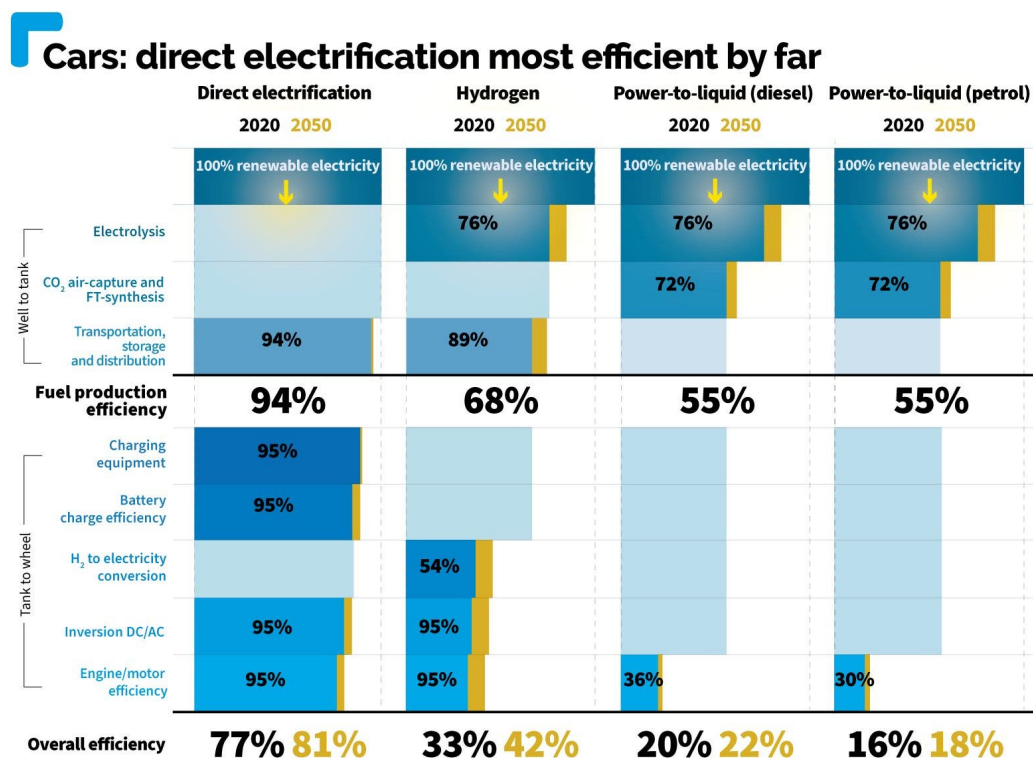


Figura 5: Eficiencia de coches eléctricos y con pila de combustible

4. Conclusiones

La conclusión principal que se obtiene tras la realización de este proyecto nos lleva a afirmar que la viabilidad del hidrógeno como vector para el almacenamiento de energía eléctrica es complicada en el estado actual de esta tecnología. Esto se debe a que todavía estamos hablando de una tecnología posible, pero con algunos problemas que deben resolverse en un plazo de tiempo corto-medio.

Los problemas de seguridad, coste y competencia que trae consigo esta tecnología hacen que la inversión en ella sea difícil y no muy segura. Por ello, es necesario la mejora continua de esta tecnología en esos aspectos, y por ello es por lo que se han puesto en marcha muchas investigaciones para intentar mejorar los aspectos más negativos, como por ejemplo la eficiencia de las pilas de combustible usando celdas de combustible de óxido sólido, o rebajando los costes de producción de hidrógeno usando una producción

a partir de biomasa o residuos. Se cree que la constante investigación de estos campos puede llevar al hidrógeno a convertirse en esa energía limpia, eficiente y rentable tan deseada, pero cabe recalcar que, con la situación actual de esta tecnología, la inversión en ella es complicada, pero necesaria si ese futuro se desea llevar a cabo.

5. Referencias

- [1] Rheinland, T. Ü. V. (s/f). El hidrógeno verde como vector energético del futuro. Tuv.com. <https://www.tuv.com/landingpage/es/hydrogen-technology/main-navigation/allgemein/>
- [2] Centro Nacional de Hidrógeno. *Hidrógeno - Centro Nacional de Hidrógeno*. 2019, febrero 6. <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>
- [3] *Hidrógeno: propiedades, usos, características y riesgos*. (s/f). <https://humanidades.com/hidrogeno/>
- [4] Dincer Ibrahim, and Haris Ishaq. Renewable Hydrogen Production. Elsevier Science, 2021. Páginas 18-21.
- [5] Martino, Marco, and Concetta Ruocco, editors. Catalysts for Sustainable Hydrogen Production: Preparation, Applications and Process Integration. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022. Páginas 12-20.
- [6] Casteleiro Roca, José Luis, et al. *Hidrógeno y su almacenamiento: El futuro de la energía eléctrica*. Universidade da Coruña, 2021. Páginas 83-94.
- [7] Plaza, D. 2022, mayo 25. *¿Qué es el hidrógeno verde? Qué beneficios tiene y cuánto cuesta*. Motor.es. <https://www.motor.es/que-es/hidrogeno-verde>
- [8] Junta de Castilla y León. (s/f). *Cómo obtener hidrógeno*. Jcyl.es. <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/como-obtener-hidrogeno.html>
- [9] Yan, Xing L., and Ryutaro Hino, editors. Nuclear Hydrogen Production Handbook. CRC Press, 2011.
- [10] Pilas de Combustible - Centro Nacional de Hidrógeno. 2019, febrero 7. Centro Nacional de Hidrógeno. <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>
- [11] Spiegel, Colleen. PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab. Elsevier Science, 2008. Páginas 12-24.
- [12] Junta de Castilla y León. (s/f-a). *Aplicaciones de las pilas de combustible*. Jcyl.es. <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/aplicaciones-pilas-combustible.html>
- [13] Hidrogeno (H) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. (s/f). Lenntech.es. <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/h.htm>

- [14] Navneet Kumar, THE HYDROGEN ECONOMY: The Fuel Of The Future. 2021, 29 abril. Páginas 10-12
- [15] Fuels - higher and lower calorific values. (s/f). Engineeringtoolbox.com.
https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html
- [16] Hidrógeno. (s/f). Quimica.es.
<https://www.quimica.es/enciclopedia/Hidr%C3%B3geno.html>
- [17] Sankir, Mehmet, and Nurdan Demirci Sankir, editors. Hydrogen Storage Technologies. Wiley, 2018. Páginas 71-75.
- [18] LA SEGURIDAD EN LA INDUSTRIA DEL HIDRÓGENO VERDE. 2021, julio 15. MAPFRE Global Risks. <https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/la-seguridad-en-la-industria-del-hidrogeno-verde/>
- [19] Los peligros del hidrógeno. (s/f). Crowcon Detection Instruments Ltd.
<https://www.crowcon.com/es/blog/the-dangers-of-hydrogen/>
- [20] De Aragón, E. 2023, enero 2. Fugas de hidrógeno: un aspecto aún por estudiar y determinar. Hidrogeno verde. <https://hidrogeno-verde.es/hidrogeno-verde-estudios-sobre-fugas/>
- [21] Pezzi, S. 2021, septiembre 30. Del gris al verde, los colores del hidrógeno. Good New Energy; Enagas. <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/del-gris-al-verde-los-colores-del-hidrogeno/>
- [22] Pascual, C. A. 2022, octubre 27. Del verde al azul: qué significan los colores del hidrógeno. Newtral. <https://www.newtral.es/tipos-hidrogeno-colores-verde-azul-rosa-barmar/20221027/>
- [23] Corporativa, I. (2019, noviembre 15). Almacenamiento de energía: la clave de un futuro descarbonizado. Iberdrola.
<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/almacenamiento-de-energia-eficiente>
- [24] Laura Ojea, El volante de inercia quiere liderar el mercado de almacenamiento de energía renovable (S/f-b). Elperiodicodelaenergia.com.
<https://elperiodicodelaenergia.com/el-volante-de-inercia-quiere-liderar-el-mercado-de-almacenamiento-de-energia-renovable/#:~:text=Los%20volantes%20de%20inercia%20son,de%20nuevo%20en%20el%20sistema>
- [25] Álvarez, D. O. (s/f). *Batería*. Concepto. <https://concepto.de/bateria/>

- [26] Qué es el sistema de almacenamiento de energía en batería y cómo funciona. (s/f). Enel X. <https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/what-is-battery-energy-storage>
- [27] De devolver dicha energía posteriormente casi en su totalidad, B. es un S. de A. de E. E. P. E. y. Q. T. la C., & de veces., C. Q. P. R. un D. N. (s/f). 7.Baterías para Almacenamiento de Energía. Biblus.us.es. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70692/fichero/10+Baterias+para+Almacenamiento+de+Energ%C3%ADa.pdf>
- [28] Cryospain. (2023, abril 24). Amoníaco verde, la solución al transporte y almacenamiento de hidrógeno renovable. Cryospain. <https://cryospain.com/es/amoniac-verde-solucion-al-transporte-y-almacenamiento-de-hidrogeno-renovable>
- [29] Alcalde, S. (2022, septiembre 15). Estos son los principales proyectos para producir hidrógeno verde en España. National geographic. https://www.nationalgeographic.com.es/economia-circular/estos-son-principales-proyectos-para-producir-hidrogeno-verde-espana_18710
- [30] Alfonso Barquín Díaz, Anexo B: El hidrógeno como vector para el almacenamiento de energía eléctrica, casos de uso y diseños de planta más relevantes
- [31] Bockris, J. O. M. (2013). The hydrogen economy: Its history. International Journal of Hydrogen Energy, 38(6), 2579–2588. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.026>
- [32] Liquid hydrogen--the fuel of choice for space exploration. (2015). <https://www.nasa.gov/content/liquid-hydrogen-the-fuel-of-choice-for-space-exploration>
- [33] Dubois, René A. ; Roberto Perazzo ; Walter E. Triaca. “Hidrógeno y la energía del futuro.” ANCEF, <https://www.ancefn.org.ar/user/FILES/PUBLICACIONES/hidrogeno.pdf>.
- [34] Geier, J. (s/f). INFORME sobre una estrategia europea para el hidrógeno. Europa.eu. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2021-0116_ES.html
- [35] Pérez, L. (s/f). Métodos de almacenamiento del hidrógeno. Synerhy.com. <https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/>

- [36] Physical hydrogen storage. (s/f). Energy.gov.
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage>
- [37] Confinamiento del hidrógeno. (s/f). Energiasostenible.net.
http://www.energiasostenible.net/almacenamiento_y_transporte_de_hidrog.htm
- [38] Stochl, R. J., & Knoll, R. H. (s/f). Thermal performance of a liquid hydrogen tank multilayer insulation system at warm boundary temperatures of 630, 530 and 152 °R. Nasa.gov.
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19910015845/downloads/19910015845.pdf>
- [39] Nachtane, M., Tarfaoui, M., Abichou, M. A., Vetcher, A., Rouway, M., Aâmir, A., Mouadili, H., Laaouidi, H., & Naanani, H. (2023). An overview of the recent advances in composite materials and artificial intelligence for hydrogen storage vessels design. *Journal of Composites Science*, 7(3), 119.
<https://doi.org/10.3390/jcs7030119>
- [40] Baquero, R. P. (2019, julio 23). *Almacenamiento de Hidrógeno*. ARIEMA; ARIEMA Energía y Medioambiente. <https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2>
- [41] Ilaria Lucentini, Producción de hidrógeno a partir de amoníaco en reactores de paredes catalíticas. Institut de Tècniques Energètiques, Departament d'Enginyeria Química, Universitat Politècnica de Catalunya. 2021, Octubre.
- [42] Miranda, Paulo Emilio, editor. *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies: Hydrogen Production and Practical Applications in Energy Generation*. Elsevier Science, 2018. Páginas 221-236.
- [43] Assessment of hydrogen delivery options. (s/f). Europa.eu. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/system/files/2021-06/jrc124206_assessment_of_hydrogen_delivery_options.pdf
- [44] Blanco, H. (2022, mayo 5). What's best for Hydrogen transport: ammonia, liquid hydrogen, LOHC or pipelines? *Energy Post*. <https://energypost.eu/whats-best-for-hydrogen-transport-ammonia-liquid-hydrogen-lohc-or-pipelines/>
- [45] Emonts, Bernd, and Detlef Stolten, editors. *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems, and Technology*. Wiley, 2016. Páginas 59-80.
- [46] Cde, B. 2. (2022, julio 19). HORIZONTE EUROPA: Desarrollo de la contención de LH2 a gran escala para el transporte marítimo. CDE Almería - Centro de Documentación Europea - Universidad de Almería; Centro de Documentación

- Europea de Almería. <https://www.cde.ual.es/horizonte-europa-desarrollo-de-la-contencion-de-lh2-a-gran-escala-para-el-transporte-maritimo/>
- [47] Sankir, Nurdan Demirci, and Mehmet Sankir, editors. Hydrogen Storage Technologies. Wiley, 2018. Páginas 4-33.
- [48] Berger, M. (2018, octubre 22). MOF Metal Organic Framework - definition, fabrication and use. Nanowerk.com. <https://www.nanowerk.com/mof-metal-organic-framework.php>
- [49] Hidroductos: las “autopistas” necesarias para conseguir una verdadera economía del hidrógeno. (2023, enero 30). Good New Energy; Enagas. <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/hidroductos-las-autopistas-necesarias-para-conseguir-una-verdadera-economia-del-hidrogeno/>
- [50] PRECISION FLUID CONTROLS. (2021, agosto 18). ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN VECTORES DE HIDRÓGENO ORGÁNICO LÍQUIDO (LOHC). MECOtech; GISI. <https://mecotech.it/es/almacenamiento-de-hidr%C3%B3geno-en-portadores-de-hidr%C3%B3geno-org%C3%A1nico-l%C3%ADquido-lohc/>
- [51] Use of hydrogen - U.S. Energy Information Administration (EIA). (s/f). Eia.gov. <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/use-of-hydrogen.php>
- [52] Spiegel, Colleen. PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab. Elsevier Science, 2008. Páginas 12-24.
- [53] Hoxha, Dritan. Modern Devices Thermodynamics: Batteries, Fuel Cells and Supercapacitors. Arcler Education Incorporated, 2019. Páginas 99-119.
- [54] Korkees, S. (2021). Three reasons why Hydrogen Fuel Cells wont be driving our future mobility - EVSE Australia. <https://evse.com.au/blog/three-reasons-why-hydrogen-fuel-cells-wont-be-driving-our-future-mobility/>
- [55] F. Gutiérrez-Martín, M.T. Domínguez-De Juan, M. Ruiz-Pastrana, Hidrógeno electrolítico para la gestión de la red eléctrica. 2011 Marzo/Abril. https://oa.upm.es/11645/1/INVE_MEM_2011_102854.pdf
- [56] Analizan si el hidrógeno puede mejorar la gestión de la red eléctrica. (s/f). Agencia SINC. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Analizan-si-el-hidrogeno-puede-mejorar-la-gestion-de-la-red-electrica>
- [57] Prometeo project. (s/f). Prometeo-Project.Eu. <https://prometeo-project.eu/>
- [58] de Benito, J. L. (2023, enero 9). HIDROGENERAS 2023: Dónde están y cómo funcionan las estaciones en las que cargar un coche de hidrógeno. Movilidad

- Eléctrica. <https://movilidadelectrica.com/hidrogenas-2023-donde-estan-y-como-funcionan-las-estaciones-en-las-que-cargar-un-coche-de-hidrogeno/>
- [59] “Hydrogen from renewable power.” International Renewable Energy Agency (IRENA). Septiembre 2018.
- [60] Schoenfisch, M., & Dasgupta, A. (s/f). Grid-Scale Storage. IEA. <https://www.iea.org/reports/grid-scale-storage>
- [61] Hydrogen Roadmap Europe: A Sustainable Pathway for the European Energy Transition. Publications Office of the European Union, 2016.
- [62] El hidrógeno verde: la energía del futuro clave en la descarbonización. (s/f). Acciona.com. https://www.acciona.com/es/hidrogeno-verde/?_adin=11551547647
- [63] El hidrógeno verde ¿la clave para descarbonizar la industria? (s/f). Sostenibilidad.com. https://www.sostenibilidad.com/desarrollo-sostenible/hidrogeno-verde-descarbonizar/?_adin=11551547647
- [64] Reducing greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles in Europe. (2022, agosto 31). European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/co2-emissions-of-new-heavy>
- [65] Ramón Roca, Iberdrola inaugura en Puertollano la mayor planta de hidrógeno verde de Europa para uso industrial. 2022, Mayo 13. Elperiodicodelaenergia.com. <https://elperiodicodelaenergia.com/el-volante-de-inercia-quiere-liderar-el-mercado-de-almacenamiento-de-energia-renovable/#:~:text=Los%20volantes%20de%20inercia%20son,de%20nuevo%20en%20el%20sistema>
- [66] Resumen ejecutivo – World Energy Outlook 2022 – Analysis. (s/f). IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary?language=es>
- [67] “PERSPECTIVAS DE DESARROLLO DE UN MERCADO GLOBAL DE HIDRÓGENO.” Orkestra Instituto Vasco de Competitividad, 16 September 2020, <https://www.orkestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/210006-Perspectivas-desarrollo-mercado-global-hidr%C3%B3geno-COMPLETO.pdf>
- [68] Executive summary – Global Hydrogen Review 2021 – Analysis. (s/f). IEA. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021/executive-summary>

- [69] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico - Centrales Nucleares en España. (s/f). Gob.es.
<https://energia.gob.es/nuclear/Centrales/Espana/Paginas/CentralesEspana.aspx>
- [70] Page, D. (2023, abril 15). España avanza hacia el apagón nuclear y descarta retrasar los cierres de centrales. El Periódico de España.
<https://www.epe.es/es/activos/20230415/espana-avanza-apagon-nuclear-cierre-centrales-86017223>
- [71] Corporativa, I. (s/f). Iberdrola construye la mayor planta de hidrógeno verde para uso industrial en Europa. Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/puertollano-planta-hidrogeno-verde>
- [72] City of Lancaster, CA. (2023, enero 24). Element Resources to build one of California's largest renewable hydrogen production facilities in the City of Lancaster, CA. PR Newswire. <https://www.prnewswire.com/news-releases/element-resources-to-build-one-of-californias-largest-renewable-hydrogen-production-facilities-in-the-city-of-lancaster-ca-301728691.html>
- [73] Resiliencia, I., & Prieto, P. (2020, diciembre 7). Un breve análisis de la eficiencia de ciclo completo de la economía del hidrógeno verde. 15/15/15; Instituto Resiliencia. <https://www.15-15-15.org/webzine/2020/12/07/un-breve-analisis-de-la-eficiencia-de-ciclo-completo-de-la-economia-del-hidrogeno-verde/>
- [74] Hidrógeno verde 3. (s/f). Afs-services.com. <https://afs-services.com/hidrogeno-verde-3/>
- [75] Verbo, M. L. (2020, julio 24). Iberdrola pone en marcha la mayor planta de hidrógeno verde de Europa. Expansion. <https://www.expansion.com/empresas/energia/2020/07/24/5f1aa9d6468aebc0518b4572.html>
- [76] *Precio del Hidrógeno*. (2021, febrero 22). Hidrogeno verde. <https://hidrogeno-verde.es/precio-del-hidrogeno/>
- [77] De Aragón, E. (2021, noviembre 30). El coste del hidrógeno verde podría bajar de 1,8 €/kg en 2030. Hidrogeno verde. <https://hidrogeno-verde.es/coste-del-hidrogeno-verde/>
- [78] "Hydrogen Insights." 2021, Febrero. Hydrogen Council, <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf>

HYDROGEN AS A VECTOR FOR ELECTRICAL ENERGY STORAGE, MOST RELEVANT USE CASES AND PLANT DESIGNS

Author: Barquín Díaz, Alfonso.

Supervisor: Domínguez Adán, Emilio Manuel

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This TFG carries out a thorough investigation of the feasibility of using hydrogen as a vector for electrical energy storage. In addition, use cases, plant designs, and the types of hydrogen storage and transport most commonly used today are shown. This is done in conjunction with cost analyses to ascertain whether hydrogen will be viable in the near future.

Keywords: Hydrogen, Renewable Energy, Viability

1. Introduction

This paper aims to analyze hydrogen as an electrical energy storage vector, examining relevant use cases and plant designs that can help in furthering this research.

The transition to renewable and sustainable energy sources presents a crucial challenge for electrical energy storage today. As solar and wind energy become integral components of the energy matrix, the need for scalable and efficient energy storage solutions grows exponentially. Thus, hydrogen presents itself as an encouraging alternative, due to its long-term storage capacity and its position as a clean fuel compared to fossil fuels.

The main objective of this study is therefore to explore the potential of hydrogen as an electrical energy storage vector and its technical and economic feasibility in the near future. To meet this objective, hydrogen will be evaluated in several contexts, including stationary power generation, transportation, and grid integration.

2. Project Definition

This work consists of several parts, which can be grouped into 8 basic parts: the first part deals with the collection of works, projects, articles, and news that have to do with the topic of hydrogen, so that the research on the different topics that constitute this topic is done more quickly and efficiently.

Then we proceed to the investigation of hydrogen as an element, in which the different properties and characteristics of this element are shown, such as the safety problems it presents or the existing methods to stationary generate this element, among them we highlight the electrolysis and catalytic reforming, as these are the two most used methods.

Electrolysis is the method on which we will focus from now on, because this method allows the creation of green hydrogen, which will be the one on which we will focus the study of the current state of its use, and on which we will describe its storage, transport and current use cases.

This is very important, since by describing these elements of hydrogen we can understand the current state of this technology, which added to an analysis of hydrogen plants and a cost analysis of a common hydrogen plant, can make us understand if the viability of hydrogen is possible or not.

By way of conclusion, the initial feasibility question is resolved, and possible future works of research are proposed, which may not only improve this feasibility, but may also present solutions to the most serious problems of hydrogen, among them, efficiency, and production costs.

The working outline was as follows:

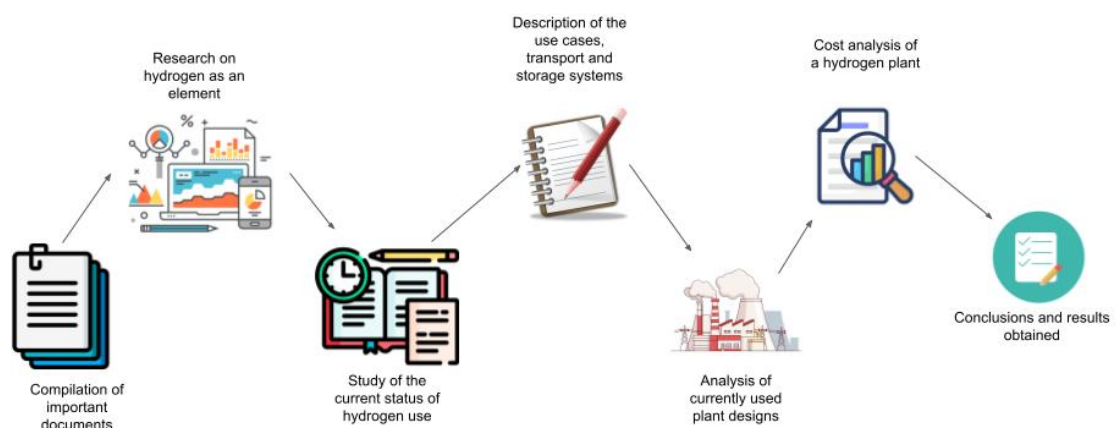


Figure 1: Work Scheme

3. Results

During this project, hydrogen has been studied from different angles, analyzing the advantages and problems that this element brings with its use as a vector for electrical energy storage.

Having carried out a cost analysis, studied the different plant designs and the most relevant hydrogen use cases, we can state that the biggest problems observed that stand in the way of the viability of hydrogen are the cost of hydrogen production, being these costs added to the already large storage and maintenance costs, the safety problems, and the existence of better alternatives in fuel cell issues, in other words, the efficiency problems that fuel cells present in comparison with other fuels.

Regarding the first problem, it should be noted that the cost of 1kg of hydrogen is not sufficiently cost-effective for a large-scale investment to be 100% reliable. After a brief cost analysis, and taking into account the amortization of a hydrogen plant and the costs of operation and maintenance of the equipment, but not taking into account the intangibles of publicity, relevance, access to subsidies and the prices of materials, transport costs, labor and other indirect costs, we can arrive at a price of 7.97 euros per kilogram of hydrogen, which remains between 3 and 8 euros established by the International Energy Agency. However, the probability that this will happen in the next decade is not certain, as it depends on many factors beyond the control of researchers, since the main cost is the price of electricity used in the process, so if this price does not decrease between now and 2030, the price of hydrogen will not see a significant decrease.

Hydrogen production costs per kilogram

$$\begin{aligned} &= LCOH + \frac{\text{Cost of maintenance and operation} + \text{Amortization}}{\text{Hydrogen production}} \\ &= 6,99 + 0,98 = 7,97 \text{ €/Kg} \end{aligned}$$

Figure 2: Calculation of the cost of production of 1 kg of hydrogen

$$LCOH = \frac{\text{Coste electrolizador} + \sum_{t=1}^{VU} \frac{\text{Coste anual de la electricidad}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{VU} \frac{\text{Cantidad de H}_2 \text{ producida al año}}{(1+r)^t}}$$

Figure 3: LCOH Formula

Regarding the second problem, hydrogen is an element that presents major safety problems, since it is an odorless, colorless, and tasteless element that is very difficult to detect by the human senses, so several safety measures are necessary to prevent leaks or explosions. The possibility of a leak is seriously dangerous, since hydrogen is the fuel with the lowest self-ignition energy, meaning that it is the element that needs the least energy to ignite itself. On the other hand, hydrogen also has the highest temperature at which a substance ignites spontaneously without the need for a spark or flame, which lowers the chances of explosion when handling hydrogen. It is therefore necessary to improve safety systems in plants and in the use of hydrogen in elements such as fuel cells, improving leak detection sensors to avoid fires or explosions during hydrogen use or handling.

HYDROGEN IGNITION ENERGY AS COMPARED TO OTHER COMMON FUELS

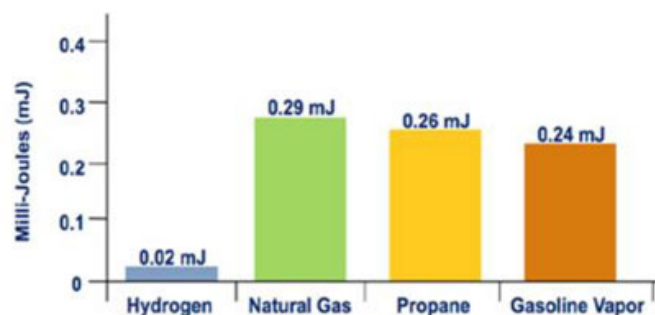


Figure 4: Energy required for ignition of fuels

Finally, we discuss the third major problem of hydrogen on its way to viability as a clean, efficient, and profitable energy, and that is the existence of better competition in other sectors. From the point of view of a common user, investing in this technology when there are already better and more efficient alternatives is very complicated. For example, the efficiency of a fuel cell is better than using gasoline, however, it is not better than a current electric car, as seen in the image provided. Not only that, but also comparing the investment needed to get the infrastructure in place for fuel cell cars to be more commonly used would be huge, just looking at the number of hydrogen stations in Spain, currently being only 11.

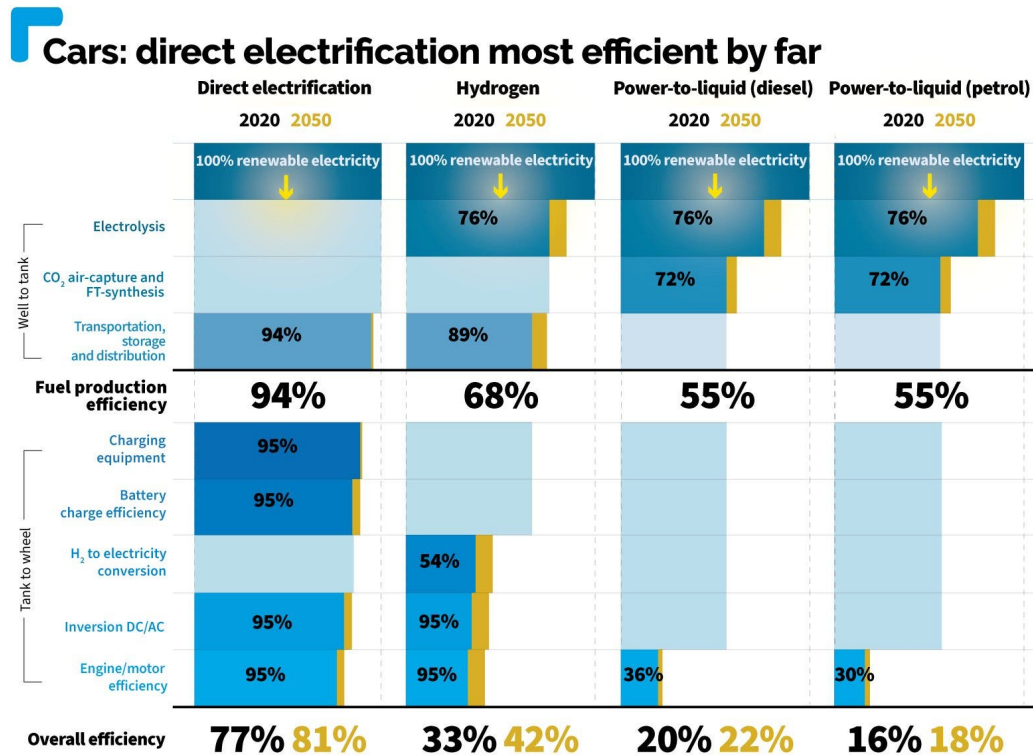


Figure 5: Efficiency of electric and fuel cell cars.

4. Conclusions

The main conclusion obtained after the realization of this project leads us to affirm that the viability of hydrogen as a vector for electrical energy storage is complicated in the current state of this technology. This is because we are still talking about a possible technology, but with some problems that must be solved in a short-medium period.

The problems of security, cost, and competition that this technology brings with it make investment in it difficult and not very secure. Therefore, there is a need for continuous improvement of this technology in these aspects, and that is why a lot of research has been launched to try to improve the most negative aspects, such as the efficiency of fuel cells using solid oxide fuel cells or lowering the costs of hydrogen production by using biomass or waste production. It is believed that continued research in these fields can lead to hydrogen becoming the clean, efficient, and cost-effective energy that is so desired, but it should be stressed that with the current status of this technology, investment in it is complicated, but necessary if such a future is to be realized.

5. References

- [1] Rheinland, T. Ü. V. (s/f). El hidrógeno verde como vector energético del futuro. Tuv.com. <https://www.tuv.com/landingpage/es/hydrogen-technology/main-navigation/allgemein/>
- [2] Centro Nacional de Hidrógeno. *Hidrógeno - Centro Nacional de Hidrógeno*. 2019, February 6. <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>
- [3] *Hidrógeno: propiedades, usos, características y riesgos*. (s/f). <https://humanidades.com/hidrogeno/>
- [4] Dincer Ibrahim, and Haris Ishaq. Renewable Hydrogen Production. Elsevier Science, 2021. Pages 18-21.
- [5] Martino, Marco, and Concetta Ruocco, editors. Catalysts for Sustainable Hydrogen Production: Preparation, Applications and Process Integration. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022. Pages 12-20.
- [6] Casteleiro Roca, José Luis, et al. *Hidrógeno y su almacenamiento: El futuro de la energía eléctrica*. Universidade da Coruña, 2021. Pages 83-94.
- [7] Plaza, D. 2022, May 25. *¿Qué es el hidrógeno verde? Qué beneficios tiene y cuánto cuesta*. Motor.es. <https://www.motor.es/que-es/hidrogeno-verde>
- [8] Junta de Castilla y León. (s/f). *Cómo obtener hidrógeno*. Jcyl.es. <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/como-obtener-hidrogeno.html>
- [9] Yan, Xing L., and Ryutaro Hino, editors. Nuclear Hydrogen Production Handbook. CRC Press, 2011.
- [10] Pilas de Combustible - Centro Nacional de Hidrógeno. 2019, February 7. Centro Nacional de Hidrógeno. <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>
- [11] Spiegel, Colleen. PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab. Elsevier Science, 2008. Pages 12-24.
- [12] Junta de Castilla y León. (s/f-a). *Aplicaciones de las pilas de combustible*. Jcyl.es. <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/aplicaciones-pilas-combustible.html>
- [13] Hidrogeno (H) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. (s/f). Lenntech.es. <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/h.htm>
- [14] Navneet Kumar, THE HYDROGEN ECONOMY: The Fuel Of The Future. 2021, 29 April. Pages 10-12
- [15] Fuels - higher and lower calorific values. (s/f). Engineeringtoolbox.com. https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html

- [16] Hidrógeno. (s/f). Quimica.es.
<https://www.quimica.es/enciclopedia/Hidr%C3%B3geno.html>
- [17] Sankir, Mehmet, and Nurdan Demirci Sankir, editors. Hydrogen Storage Technologies. Wiley, 2018. Pages 71-75.
- [18] LA SEGURIDAD EN LA INDUSTRIA DEL HIDRÓGENO VERDE. 2021, julio 15. MAPFRE Global Risks. <https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/la-seguridad-en-la-industria-del-hidrogeno-verde/>
- [19] Los peligros del hidrógeno. (s/f). Crowcon Detection Instruments Ltd.
<https://www.crowcon.com/es/blog/the-dangers-of-hydrogen/>
- [20] De Aragón, E. 2023, January 2. Fugas de hidrógeno: un aspecto aún por estudiar y determinar. Hidrogeno verde. <https://hidrogeno-verde.es/hidrogeno-verde-estudios-sobre-fugas/>
- [21] Pezzi, S. 2021, September 30. Del gris al verde, los colores del hidrógeno. Good New Energy; Enagas. <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/del-gris-al-verde-los-colores-del-hidrogeno/>
- [22] Pascual, C. A. 2022, October 27. Del verde al azul: qué significan los colores del hidrógeno. Newtral. <https://www.newtral.es/tipos-hidrogeno-colores-verde-azul-rosa-barmar/20221027/>
- [23] Corporativa, I. (2019, November 15). Almacenamiento de energía: la clave de un futuro descarbonizado. Iberdrola.
<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/almacenamiento-de-energia-eficiente>
- [24] Laura Ojea, El volante de inercia quiere liderar el mercado de almacenamiento de energía renovable (S/f-b). Elperiodicodelaenergia.com.
<https://elperiodicodelaenergia.com/el-volante-de-inercia-quiere-liderar-el-mercado-de-almacenamiento-de-energia-renovable/#:~:text=Los%20volantes%20de%20inercia%20son,de%20nuevo%20en%20el%20sistema>
- [25] Álvarez, D. O. (s/f). Batería. Concepto. <https://concepto.de/bateria/>
- [26] Qué es el sistema de almacenamiento de energía en batería y cómo funciona. (s/f). Enel X. <https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/what-is-battery-energy-storage>
- [27] De devolver dicha energía posteriormente casi en su totalidad, B. es un S. de A. de E. E. P. E. y. Q. T. la C., & de veces., C. Q. P. R. un D. N. (s/f). 7.Bateríaspara Almacenamiento de Energía. Biblus.us.es.

- <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70692/fichero/10+Baterias+para+Almacenamiento+de+Energ%C3%ADa.pdf>
- [28] Cryospain. (2023, April 24). Amoniac verde, la solución al transporte y almacenamiento de hidrógeno renovable. Cryospain.
<https://cryospain.com/es/amoniac-verde-solucion-al-transporte-y-almacenamiento-de-hidrogeno-renovable>
- [29] Alcalde, S. (2022, September 15). Estos son los principales proyectos para producir hidrógeno verde en España. National geographic.
https://www.nationalgeographic.com.es/economia-circular/estos-son-principales-proyectos-para-producir-hidrogeno-verde-espana_18710
- [30] Alfonso Barquín Díaz, Anexo B: El hidrógeno como vector para el almacenamiento de energía eléctrica, casos de uso y diseños de planta más relevantes
- [31] Bockris, J. O. M. (2013). The hydrogen economy: Its history. International Journal of Hydrogen Energy, 38(6), 2579–2588.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.026>
- [32] Liquid hydrogen--the fuel of choice for space exploration. (2015).
<https://www.nasa.gov/content/liquid-hydrogen-the-fuel-of-choice-for-space-exploration>
- [33] Dubois, René A. ; Roberto Perazzo ; Walter E. Triaca. “Hidrógeno y la energía del futuro.” ANCEFN,
<https://www.ancefn.org.ar/user/FILES/PUBLICACIONES/hidrogeno.pdf>.
- [34] Geier, J. (s/f). INFORME sobre una estrategia europea para el hidrógeno. Europa.eu. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2021-0116_ES.html
- [35] Pérez, L. (s/f). Métodos de almacenamiento del hidrógeno. Synerhy.com.
<https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/>
- [36] Physical hydrogen storage. (s/f). Energy.gov.
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage>
- [37] Confinamiento del hidrógeno. (s/f). Energiasostenible.net.
http://www.energiasostenible.net/almacenamiento_y_transporte_de_hidrog.htm
- [38] Stochl, R. J., & Knoll, R. H. (s/f). Thermal performance of a liquid hydrogen tank multilayer insulation system at warm boundary temperatures of 630, 530 and 152

°R. Nasa.gov.

<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19910015845/downloads/19910015845.pdf>

- [39] Nachtane, M., Tarfaoui, M., Abichou, M. A., Vetcher, A., Rouway, M., Aâmir, A., Mouadili, H., Laaouidi, H., & Naanani, H. (2023). An overview of the recent advances in composite materials and artificial intelligence for hydrogen storage vessels design. *Journal of Composites Science*, 7(3), 119.
<https://doi.org/10.3390/jcs7030119>
- [40] Baquero, R. P. (2019, julio 23). *Almacenamiento de Hidrógeno*. ARIEMA; ARIEMA Energía y Medioambiente. <https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2>
- [41] Ilaria Lucentini, Producción de hidrógeno a partir de amoníaco en reactores de paredes catalíticas. Institut de Tècniques Energètiques, Departament d'Enginyeria Química, Universitat Politècnica de Catalunya. 2021, October.
- [42] Miranda, Paulo Emilio, editor. *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies: Hydrogen Production and Practical Applications in Energy Generation*. Elsevier Science, 2018. Pages 221-236.
- [43] Assessment of hydrogen delivery options. (s/f). Europa.eu. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/system/files/2021-06/jrc124206_assessment_of_hydrogen_delivery_options.pdf
- [44] Blanco, H. (2022, May 5). What's best for Hydrogen transport: ammonia, liquid hydrogen, LOHC or pipelines? *Energy Post*. <https://energypost.eu/whats-best-for-hydrogen-transport-ammonia-liquid-hydrogen-lohc-or-pipelines/>
- [45] Emonts, Bernd, and Detlef Stolten, editors. *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems, and Technology*. Wiley, 2016. Pages 59-80.
- [46] Cde, B. 2. (2022, July 19). *HORIZONTE EUROPA: Desarrollo de la contención de LH2 a gran escala para el transporte marítimo*. CDE Almería - Centro de Documentación Europea - Universidad de Almería; Centro de Documentación Europea de Almería. <https://www.cde.ual.es/horizonte-europa-desarrollo-de-la-contencion-de-lh2-a-gran-escala-para-el-transporte-maritimo/>
- [47] Sankir, Nurdan Demirci, and Mehmet Sankir, editors. *Hydrogen Storage Technologies*. Wiley, 2018. Pages 4-33.
- [48] Berger, M. (2018, October 22). *MOF Metal Organic Framework - definition, fabrication and use*. Nanowerk.com. <https://www.nanowerk.com/mof-metal-organic-framework.php>

- [49] Hidroductos: las “autopistas” necesarias para conseguir una verdadera economía del hidrógeno. (2023, January 30). Good New Energy; Enagas.
<https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/hidroductos-las-autopistas-necesarias-para-conseguir-una-verdadera-economia-del-hidrogeno/>
- [50] PRECISION FLUID CONTROLS. (2021, August 18). ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN VECTORES DE HIDRÓGENO ORGÁNICO LÍQUIDO (LOHC). MECOtech; GISI. <https://mecotech.it/es/almacenamiento-de-hidr%C3%B3geno-en-portadores-de-hidr%C3%B3geno-org%C3%A1nico-l%C3%ADquido-lohc/>
- [51] Use of hydrogen - U.S. Energy Information Administration (EIA). (s/f). Eia.gov.
<https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/use-of-hydrogen.php>
- [52] Spiegel, Colleen. PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab. Elsevier Science, 2008. Pages 12-24.
- [53] Hoxha, Dritan. Modern Devices Thermodynamics: Batteries, Fuel Cells and Supercapacitors. Arcler Education Incorporated, 2019. Pages 99-119.
- [54] Korkees, S. (2021). Three reasons why Hydrogen Fuel Cells wont be driving our future mobility - EVSE Australia. <https://evse.com.au/blog/three-reasons-why-hydrogen-fuel-cells-wont-be-driving-our-future-mobility/>
- [55] F. Gutiérrez-Martín, M.T. Domínguez-De Juan, M. Ruiz-Pastrana, Hidrógeno electrolítico para la gestión de la red eléctrica. 2011 Marzo/Abril.
https://oa.upm.es/11645/1/INVE_MEM_2011_102854.pdf
- [56] Analizan si el hidrógeno puede mejorar la gestión de la red eléctrica. (s/f). Agencia SINC. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Analizan-si-el-hidrogeno-puede-mejorar-la-gestion-de-la-red-electrica>
- [57] Prometeo project. (s/f). Prometeo-Project.Eu. <https://prometeo-project.eu/>
- [58] de Benito, J. L. (2023, January 9). HIDROGENERAS 2023: Dónde están y cómo funcionan las estaciones en las que cargar un coche de hidrógeno. Movilidad Eléctrica. <https://movilidadelectrica.com/hidrogeneras-2023-donde-estan-y-como-funcionan-las-estaciones-en-las-que-cargar-un-coche-de-hidrogeno/>
- [59] “Hydrogen from renewable power.” International Renewable Energy Agency (IRENA). September 2018.
- [60] Schoenfisch, M., & Dasgupta, A. (s/f). Grid-Scale Storage. IEA.
<https://www.iea.org/reports/grid-scale-storage>

- [61] Hydrogen Roadmap Europe: A Sustainable Pathway for the European Energy Transition. Publications Office of the European Union, 2016.
- [62] El hidrógeno verde: la energía del futuro clave en la descarbonización. (s/f). Acciona.com. https://www.acciona.com/es/hidrogeno-verde/?_adin=11551547647
- [63] El hidrógeno verde ¿la clave para descarbonizar la industria? (s/f). Sostenibilidad.com. https://www.sostenibilidad.com/desarrollo-sostenible/hidrogeno-verde-descarbonizar/?_adin=11551547647
- [64] Reducing greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles in Europe. (2022, August 31). European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/co2-emissions-of-new-heavy>
- [65] Ramón Roca, Iberdrola inaugura en Puertollano la mayor planta de hidrógeno verde de Europa para uso industrial. 2022, May 13. Elperiodicodelaenergia.com. <https://elperiodicodelaenergia.com/el-volante-de-inercia-quiere-liderar-el-mercado-de-almacenamiento-de-energia-renovable/#:~:text=Los%20volantes%20de%20inercia%20son,de%20nuevo%20en%20el%20sistema>
- [66] Resumen ejecutivo – World Energy Outlook 2022 – Analysis. (s/f). IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary?language=es>
- [67] “PERSPECTIVAS DE DESARROLLO DE UN MERCADO GLOBAL DE HIDRÓGENO.” Orkestra Instituto Vasco de Competitividad, 16 September 2020, <https://www.orquestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/210006-Perspectivas-desarrollo-mercado-global-hidr%C3%B3geno-COMPLETO.pdf>
- [68] Executive summary – Global Hydrogen Review 2021 – Analysis. (s/f). IEA. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021/executive-summary>
- [69] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico - Centrales Nucleares en España. (s/f). Gob.es. <https://energia.gob.es/nuclear/Centrales/Espana/Paginas/CentralesEspana.aspx>
- [70] Page, D. (2023, April 15). España avanza hacia el apagón nuclear y descarta retrasar los cierres de centrales. El Periódico de España. <https://www.epe.es/es/activos/20230415/espana-avanza-apagon-nuclear-cierre-centrales-86017223>

- [71] Corporativa, I. (s/f). Iberdrola construye la mayor planta de hidrógeno verde para uso industrial en Europa. Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/puertollano-planta-hidrogeno-verde>
- [72] City of Lancaster, CA. (2023, January 24). Element Resources to build one of California's largest renewable hydrogen production facilities in the City of Lancaster, CA. PR Newswire. <https://www.prnewswire.com/news-releases/element-resources-to-build-one-of-californias-largest-renewable-hydrogen-production-facilities-in-the-city-of-lancaster-ca-301728691.html>
- [73] Resiliencia, I., & Prieto, P. (2020, December 7). Un breve análisis de la eficiencia de ciclo completo de la economía del hidrógeno verde. 15/15\15; Instituto Resiliencia. <https://www.15-15-15.org/webzine/2020/12/07/un-breve-analisis-de-la-eficiencia-de-ciclo-completo-de-la-economia-del-hidrogeno-verde/>
- [74] Hidrógeno verde 3. (s/f). Afs-services.com. <https://afs-services.com/hidrogeno-verde-3/>
- [75] Verbo, M. L. (2020, July 24). Iberdrola pone en marcha la mayor planta de hidrógeno verde de Europa. Expansion. <https://www.expansion.com/empresas/energia/2020/07/24/5f1aa9d6468aebc0518b4572.html>
- [76] *Precio del Hidrógeno*. (2021, February 22). Hidrogeno verde. <https://hidrogeno-verde.es/precio-del-hidrogeno/>
- [77] De Aragón, E. (2021, November 30). El coste del hidrógeno verde podría bajar de 1,8 €/kg en 2030. Hidrogeno verde. <https://hidrogeno-verde.es/coste-del-hidrogeno-verde/>
- [78] "Hydrogen Insights." 2021, February. Hydrogen Council, <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf>

Índice de la memoria

1	<i>Introducción.....</i>	7
1.1	Motivación del Proyecto.....	7
1.2	Organización del Proyecto	8
2	<i>El Hidrógeno.....</i>	9
2.1	¿Qué es el hidrógeno?	9
2.2	Producción del hidrógeno.....	9
2.3	Reformados catalíticos	10
2.4	Electrólisis	12
2.5	Células de hidrógeno	13
2.6	Propiedades del hidrógeno	16
2.7	Seguridad.....	20
2.8	Taxonomía del hidrógeno.....	22
2.9	Tipos de hidrógeno	23
2.9.1	Hidrógeno gris.....	23
2.9.2	Hidrógeno azul	23
2.9.3	Hidrógeno verde.....	24
2.9.4	Hidrógeno negro y marrón.....	24
2.9.5	Hidrógeno rosa, turquesa, amarillo o blanco	24
3	<i>Estado de la Cuestión</i>	26
3.1	Métodos de almacenamiento actuales	26
3.1.1	Bombeo hidroeléctrico	26
3.1.2	Almacenamiento por aire comprimido.....	27
3.1.3	Almacenamiento térmico	28
3.1.4	Supercondensadores.....	28
3.1.5	Volantes de inercia	29
3.1.6	Almacenamiento en baterías	30
3.2	Estado del arte	32
4	<i>Definición del Trabajo.....</i>	35
4.1	Justificación.....	35

4.2	Trabajos Anteriores	36
4.3	Objetivos.....	37
4.4	Metodología.....	41
5	<i>Sistemas de Almacenamiento de Hidrógeno</i>	44
5.1	Tanques criogénicos	44
5.2	Almacenamiento subterráneo	51
5.3	Almacenamiento en forma de amoníaco o metanol	53
6	<i>Sistemas de Transporte.....</i>	55
6.1	Hidrógeno Gaseoso Comprimido	55
6.2	Hidrógeno líquido.....	57
6.3	Hidruros metálicos.....	58
6.4	Gasoductos	61
6.5	Portadores de hidrógeno orgánico líquido.....	63
7	<i>Casos de Uso</i>	65
7.1	Pilas de combustible	65
7.2	Equilibrio de red eléctrica	68
7.3	Energía de reserva	71
7.4	Descarbonización	72
8	<i>Diseños de Planta</i>	75
8.1	Estructura de las plantas	75
8.2	Problemas de las plantas.....	77
8.3	Futuro de las plantas.....	79
9	<i>Análisis de Costes</i>	85
10	<i>Conclusiones y Trabajos Futuros</i>	90
11	<i>Bibliografía</i>	96
ANEXO I		104

Índice de figuras

Figura 1: Fórmula química de obtención de H ₂ a partir de métodos de reformados	10
Figura 2: Producción de hidrógeno por reformado de metano con vapor (https://www.engineering-airliquide.com/es/produccion-hidrogeno-por-reformado-metano-con-vapor).....	12
Figura 3: Proceso de Electrólisis (https://avatarenergia.com/hidrogeno-a-partir-de-agua/)	13
Figura 4: Esquema de funcionamiento de una pila de combustible (https://hive.blog/hive-196387/@emiliomoron/pilas-de-combustible-de-hidrogeno-limitaciones-y-una-posible-solucion)	14
Figura 5: Reacciones en una célula de hidrógeno	14
Figura 6: Formula química de combustión del hidrógeno.....	18
Figura 7: Reacción de descomposición del amoníaco.....	18
Figura 8: Temperatura de autoignición (https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/la-seguridad-en-la-industria-del-hidrogeno-verde/)	20
Figura 9: Procesos de obtención del Hidrógeno (https://www.divulgah2.es/aprende-sobre/hidrogeno/produccion/).....	22
Figura 10: Procesos de obtención del Hidrógeno (https://www.divulgah2.es/aprende-sobre/hidrogeno/produccion/).....	27
Figura 11: Esquema básico de un supercondensador (Díaz Baizán, Patricia, 2016/11/06, SUPERCONDENSADORES HIBRIDOS ASIMETRICOS BASADOS EN MATERIALES DE CARBONO Y ESPECIES REDOX INORGANICAS).....	29
Figura 12: Esquema básico de un supercondensador (Díaz Baizán, Patricia, 2016/11/06, SUPERCONDENSADORES HIBRIDOS ASIMETRICOS BASADOS EN MATERIALES DE CARBONO Y ESPECIES REDOX INORGANICAS).....	30
Figura 13: Objetivos de Desarrollo Sostenible discutidos: 3, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14 y 15	41
Figura 14: Tanque de alta presión de tipo IV (https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/).....	45

Figura 15: Componentes de un tanque de almacenamiento de hidrógeno presurizado (Camisa de vacío) (https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage).....	47
Figura 16: Electrolizadores en la superficie y cavernas para almacenar el hidrógeno que producen en el subsuelo (https://h2businessnews.com/construyen-el-mayor-proyecto-de-almacenamiento-subterraneo-de-hidrogeno-del-mundo/)	51
Figura 17: Proceso de transformación y almacenamiento del amoníaco en hidrógeno puro. (https://www.flexim.com/es/hydrogen-flowmeters-assisting-energy-transition/ammonia-hydrogen-carrier)	54
Figura 18: Distintas formas de almacenar hidrógeno en materiales https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/	60
Figura 19: Diagrama de flujo: para almacenar hidrógeno en el tanque para su transporte (proceso de carga) https://mecotech.it/es/almacenamiento-de-hidr%C3%B3geno-en-portadores-de-hidr%C3%B3geno-org%C3%A1nico-l%C3%ADquido-lohc/	63
Figura 20: Coche con pila de combustible (https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-desmontando-mitos-sobre-coche-hidrogeno-201905060136_noticia.html).....	65
Figura 21: Comparación entre un coche eléctrico y un coche con pila de combustible (https://evse.com.au/blog/three-reasons-why-hydrogen-fuel-cells-wont-be-driving-our-future-mobility/)	67
Figura 22: Proyecto Prometeo (https://www.interempresas.net/Energia/Articulos/346548-Proyecto-PROMETEO-hidrogeno-verde-partir-del-agua-sol-para-industria-cero-emisiones.html).....	68
Figura 23: Como el hidrógeno limpio es creado y usado (https://www.alfalaval.com/industries/energy-and-utilities/sustainable-solutions/clean-energy/green-hydrogen/)	73
Figura 24: La cadena de valor del hidrógeno (https://www.ariema.com/la-cadena-de-valor-del-hidrogeno)	76
Figura 25: Demanda eléctrica de la Península Ibérica (https://demanda.ree.es/visiona/peninsula/nacional/total).....	82
Figura 26: Estructura de generación del sistema eléctrico nacional (https://www.energias-renovables.com/panorama/espana-2020-el-pais-con-110-000-20200124)	83

Figura 27: Energía nuclear operable en España (https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/spain.aspx)	84
Figura 28: Capacidad de electrolizadores instalados en MW (https://www.icis.com/explore/resources/news/2020/11/24/10578433/spain-strengthens-green-hydrogen-position/)	84
Figura 29: Fórmula del factor de capacidad (https://afs-services.com/hidrogeno-verde-3/)	86
Figura 30: Fórmula del LCOH (https://afs-services.com/hidrogeno-verde-3/).....	87
Figura 31: Cálculos iniciales del LCOH.....	87
Figura 32: Conversión del sumatorio del LCOH ((https://afs-services.com/hidrogeno-verde-3/)).....	87
Figura 33: Cálculo final del LCOH	87
Figura 34: Cálculos de la amortización y costes de mantenimiento y operación.....	88
Figura 35: Coste final del hidrógeno	88
Figura 36: Energía necesaria para la ignición de combustibles (https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-compared-other-fuels).....	91
Figura 37: Coste de gasolina e hidrógeno por milla (https://stillwaterassociates.com/how-does-the-cost-of-hydrogen-stack-up-against-gasoline/)	92

Índice de tablas

Tabla 1: Tabla de HHV y LHV de combustibles gaseosos (Kenneth W. R., Kenneth M. B., 2011, Combustion Engineering 2nd Edition)	17
Tabla 2: Eficiencia de coches eléctricos y con pila de combustible (https://cleantechnica.com/2021/02/01/chart-why-battery-electric-vehicles-beat-hydrogen-electric-vehicles-without-breaking-a-sweat/)	66
Tabla 3: Coste anual de los combustibles industriales (https://www.induambiente.com/informe-tecnico/calderas/claves-del-hidrogeno-verde#:~:text=Para%20producir%201%20kg%20de%20hidr%C3%B3geno%20por%20electr%C3%B3lisis%20se%20necesitan,eficiencia%20del%20equipo%20)	93

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la creciente demanda de fuentes de energía renovables ha llevado a explorar nuevas tecnologías de almacenamiento y distribución de energía eléctrica. Una solución prometedora es el uso del hidrógeno como vector de almacenamiento y transporte de energía. El hidrógeno es un vector energético limpio y eficiente que puede producirse a partir de fuentes renovables, como la energía eólica y la solar, y puede utilizarse para una amplia gama de aplicaciones, tales como el transporte, la calefacción y la generación de electricidad. [1]

Por ello es por lo que el uso del hidrógeno como almacenamiento de energía eléctrica se ha vuelto más común durante los últimos años y ha sido elevado como la solución a muchos de los problemas que hoy día afrontamos como sociedad. El hidrógeno es un elemento químico que tiene propiedades únicas que hacen de él un posible vector para el almacenamiento de energía eléctrica, de ahí que se plantee la siguiente pregunta: ¿es viable la implementación del hidrógeno en este sentido? Y como consecuencia, nuevas preguntas surgen a raíz de esta, y entre otras ¿cómo se puede implementar el hidrógeno en una planta eléctrica? ¿Qué casos existen en los que el hidrógeno puede ser más útil que otras soluciones actuales como las baterías?

A través de un análisis en profundidad de la documentación y de los estudios de casos existentes, este proyecto pretende ofrecer una visión global del potencial del hidrógeno como tecnología clave para la transición hacia un sistema energético sostenible y responder a la pregunta de si su implementación es viable en los próximos años.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La principal motivación de este proyecto es estudiar el hidrógeno en profundidad y ver si su implementación como portador de energía es viable en un futuro próximo, investigando así si el hidrógeno puede apoyar el proceso de descarbonización. En consecuencia, es necesario

no solo examinar en detalle las diferentes formas de producir y almacenar hidrógeno, sino también discutir los casos de uso del hidrógeno en la economía actual y los diseños de plantas más relevantes que pueden apoyar el proceso de descarbonización.

Por consiguiente, es necesario responder a la pregunta de si el hidrógeno se convertirá en un vector de energía sostenible para la economía actual y si su implementación será viable en los próximos años. Es esta pregunta la que lleva a cuestionarse si el hidrógeno realmente puede apoyar el proceso de descarbonización y si este proyecto puede aportar un valor positivo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

En resumen, este proyecto está motivado para averiguar si la introducción del hidrógeno es realmente posible, pero también si esta implementación es segura y si esta idea es viable en un futuro cercano. En los últimos años se ha llegado a la conclusión de que el hidrógeno es el futuro próximo de las energías renovables y el lugar más seguro para invertir. Por lo tanto, este proyecto está motivado para cuestionar esta afirmación y averiguar si esto es realmente un futuro inmediato, o si, por el contrario, las limitaciones económicas, de producción y de seguridad hacen que esta idea sea improbable a corto y medio plazo. [30]

1.2 ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

Para entender la importancia del hidrógeno como vector para el almacenamiento de energía eléctrica, este proyecto comenzará explicando qué es el hidrógeno, así como sus principales propiedades y características únicas para poder comprender cómo los sistemas de almacenamiento y casos de uso pueden funcionar, así como que elementos especiales van a ser necesarios para funcionar eficientemente. Después, se justificará la existencia de este proyecto y se mostrarán los métodos y objetivos seguidos para la compleción de este. Seguido de esto, se enseñarán los sistemas de almacenamiento, transporte, casos de uso y diseños de planta más relevantes, así como un análisis de coste de plantas para comprobar si es rentable el uso de una planta de hidrógeno en comparación con una planta eléctrica tradicional para finalizar con una conclusión respondiendo a la pregunta principal sobre la viabilidad del uso del hidrógeno en el futuro cercano.

2 EL HIDRÓGENO

2.1 ¿QUÉ ES EL HIDRÓGENO?

El hidrógeno es un elemento químico que se encuentra en la atmósfera y constituye aproximadamente el 75% de la materia del universo. Debido a su masa atómica, el hidrógeno es el elemento más ligero que existe, siendo el primero de la tabla periódica al estar formado por solo un protón y un electrón. Pese a su abundancia en la Tierra, el hidrógeno se encuentra combinado con otros elementos formando otras moléculas como el agua o los hidrocarburos. En condiciones normales el hidrógeno es un gas diatómico, incoloro, inodoro, insípido, no metálico y altamente inflamable. [2]

La única forma de hidrógeno que es útil para ser usada como energía emplea el hidrógeno en estado gaseoso y en su estado molecular diatómico, es decir estando formado por dos átomos de hidrógeno lo cual lleva el nombre de H_2 . Para que el hidrógeno se pueda usar como energía y combustible, es necesario que se encuentre en estado gaseoso, para lo cual es preciso el empleo de varios procesos y otras energías para convertir el hidrógeno en una energía que se pueda usar, lo cual lo convierte en lo que se denomina un vector energético. [3]

2.2 PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO

La producción de hidrógeno es muy variada, puesto que existen múltiples métodos, procedimientos y fuentes de energía utilizadas en los procesos. De la misma manera, la producción de hidrógeno se puede realizar en multitud de localizaciones, desde áreas remotas hasta grandes ciudades.

Todos los métodos y procesos se pueden resumir principalmente en dos, la electrólisis, el método menos utilizado que constituye el 4% de la generación total de hidrógeno, y los

reformados de otros elementos, entre los cuales se encuentran el petróleo, con un 30%, el carbón con un 18% y el gas natural con un 48%. [4]

La producción de hidrógeno es muy diversa, y dependiendo del tipo de proceso y la energía utilizada durante ese proceso se pueden producir diferentes tipos de hidrógeno que se clasifican con un color, que simboliza como de contaminante es ese tipo de hidrógeno y que serán explicados en más profundidad en los próximos apartados. Se analizará posteriormente que, pese a que los procesos de reformados catalíticos son los más abundantes, son mucho peores en aspectos contaminantes en comparación con el proceso de la electrólisis, ya que es este último el que es usado en la creación del hidrógeno verde, el cual es el único de todos los tipos de hidrógeno que permite la producción de hidrógeno sin emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

2.3 REFORMADOS CATALÍTICOS

Los métodos de reformados son métodos usados para la obtención de hidrógeno a partir de hidrocarburos, y en particular gas natural. Estos procesos requieren de una gran cantidad de energía para ser llevados a cabo, y consisten en exponer las materias primas seleccionadas a vapor de agua en condiciones de alta temperatura y moderada presión. Como resultado de las reacciones químicas se obtienen hidrógeno y dióxido de carbono, y dependiendo de la mezcla reformada, en algunos casos también monóxido de carbono.

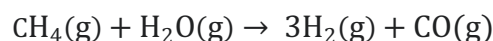


Figura 1: Fórmula química de obtención de H₂ a partir de métodos de reformados

De todos los métodos de reformados, el método más utilizado es la reformación catalítica de gas natural. Esto se debe a varias razones, pero la más importante entre ellas es la gran diferencia económica entre este proceso y los demás, pese a que la contaminación que es producida durante este proceso es a su vez mucho mayor que en el resto de los procesos. La reformación catalítica del gas natural se lleva a cabo mezclando vapor de agua a altas temperaturas (750-1100°C) con gas natural. Esta reacción produce el ambicionado hidrógeno

diatómico y monóxido de carbono que es expulsado como contaminación. Además, este hidrógeno puede ser producido más rápidamente gracias al efecto de un catalizador, que aumenta la velocidad de la reacción química al disminuir la energía de activación, acelerando así el proceso de reformados en su totalidad. [5]

Para los demás métodos de reformación catalítica, se usan combustibles fósiles, los cuales son portadores de hidrógeno y en consecuencia les hace idóneos para obtener la molécula de hidrógeno diatómico. El proceso es simple, ya que basta con crear la reacción de combustibles fósiles con agua, de manera que se obtienen los mismos resultados que con el reformado catalítico de gas natural. El proceso requiere de un catalizador y de un aporte de energía para que el proceso se inicie y llegue a los resultados esperados.

El aporte de energía se produce aportando en un reactor la energía seleccionada que puede ser de diversos tipos, y ésta se puede reducir si al introducir el aporte, se añade oxígeno al mismo tiempo que se introduce agua en el reactor. Si se realiza este cambio para evitar gastar demasiada energía, el proceso desprende cierta cantidad de calor. De esta forma, el proceso pasa a llamarse reformado autotérmico al convertirse en un proceso exotérmico. Sin embargo, esta expulsión de calor produce adicionalmente dióxido de carbono, lo cual contamina más que si no redujéramos la cantidad de energía necesaria para el proceso.

Aunque contamina más y genera una cantidad menor de hidrógeno, no obstante, este proceso es interesante desde el punto de vista energético en algunos casos, ya que posee un menor consumo de energía en comparación con otros reformados.

En resumen, para cualquier proceso de reformado, es necesario llevar a cabo una serie de reacciones con el fin de obtener hidrógeno diatómico. Estas reacciones son comunes, pero requieren energía para comenzar y al finalizar expulsan residuos, ya que, al reaccionar el agua con metano, se forma tanto hidrógeno como dióxido de carbono, e incluso en algunos casos también monóxido de carbono, lo cual aumenta aún más el índice de contaminación del proceso.

Una vez los resultados de las reacciones se han generado, se comienza la última etapa que es común para todos los procesos de reformados catalíticos y en la que se purifican los elementos resultantes. Esta etapa es muy variada, ya que se pueden usar una gran diversidad de procesos: se pueden utilizar tanto procesos físicos como las membranas de paladio o los métodos criogénicos y procesos químicos como la oxidación selectiva. [6]

Estos procesos son elegidos dependiendo de varias restricciones sobre el hidrógeno, como por ejemplo el nivel de pureza necesario.

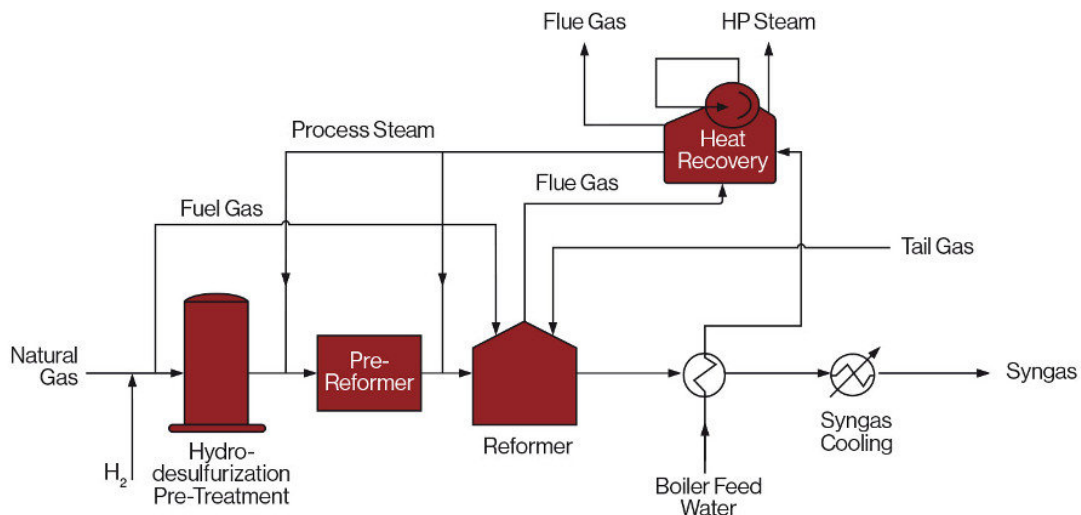


Figura 2: Producción de hidrógeno por reformado de metano con vapor (<https://www.engineering-airliquide.com/es/produccion-hidrogeno-por-reformado-metano-con-vapor>)

2.4 ELECTRÓLISIS

El segundo proceso general es la electrólisis, que es el único proceso utilizado para obtener hidrógeno verde. El proceso se puede resumir de forma sencilla en la descomposición del agua para formar hidrógeno y oxígeno. Una de las mayores ventajas que tiene este proceso, es que, a diferencia de los otros métodos, este proceso no genera ningún resultado que se considere contaminación. [8]

Sin embargo, al igual que en el resto de los procesos, la electrólisis necesita de un aporte de energía eléctrica para comenzar el proceso. La electrólisis es una técnica de producción de hidrógeno muy cara, ya que se estima que el coste de producción de hidrógeno por electrólisis es aproximadamente de entre 3 y 8 €/kg, mientras que el coste por kilogramo de hidrógeno producido por reformados es en torno a 1,5 €/kg.[7] De ahí que, pese a que se produce hidrógeno verde, y por tanto el único tipo de hidrógeno que no contamina en su producción, este proceso es el menos utilizado de todos. Y la razón fundamental es que el aporte de energía necesario es mucho mayor que en los otros procesos.

Como se puede observar en la imagen inferior, la electrólisis necesita de una célula electroquímica, en la que hay un cátodo y un ánodo que están unidos mediante un conductor. Este conductor está formado por iones positivos de hidrógeno, que a su vez están disueltos en agua, lo cual permite el paso de corriente entre cátodo y ánodo, y esto a su vez crea una reacción que hace que el agua se disocie, formándose hidrógeno en el cátodo, mientras que en el ánodo se formará oxígeno. [8][9]

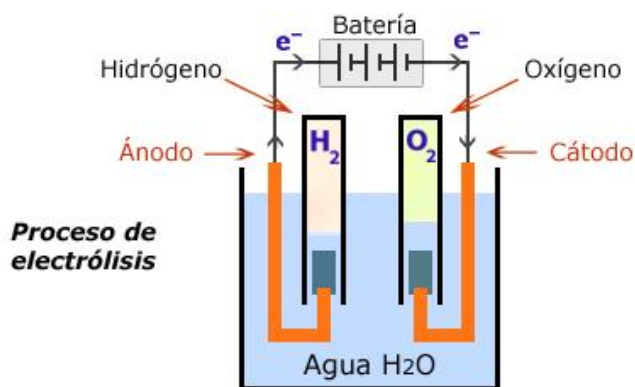


Figura 3: Proceso de Electrólisis (<https://avatarenergia.com/hidrogeno-a-partir-de-agua/>)

2.5 CÉLULAS DE HIDRÓGENO

El hidrógeno es un combustible que ofrece un gran beneficio en su posibilidad de ser transformado en electricidad. Este combustible puede ser usado en motores de combustión o en células (pilas de combustible), y gracias a esta flexibilidad, puede impulsar directamente

vehículos al combustionar o bien, al generar electricidad a partir de la reacción electroquímica que se forma en las células.

Una pila o célula de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma de forma directa la energía química en energía eléctrica. Para ello, se comienza con un combustible, en nuestro caso hidrógeno, y de un comburente que en la mayoría de los casos se trata de oxígeno. Con estos elementos se produce una reacción química cuyos resultados son agua y electricidad en forma de calor y corriente continua. Una pila de este tipo tiene diversas partes: electrodos, llamados ánodo y cátodo, donde las reacciones de reducción y oxidación se llevan a cabo; electrolito, que separa los gases y los electrones y que permite el paso de iones de hidrógeno; y las placas bipolares que separan las celdas. [10]

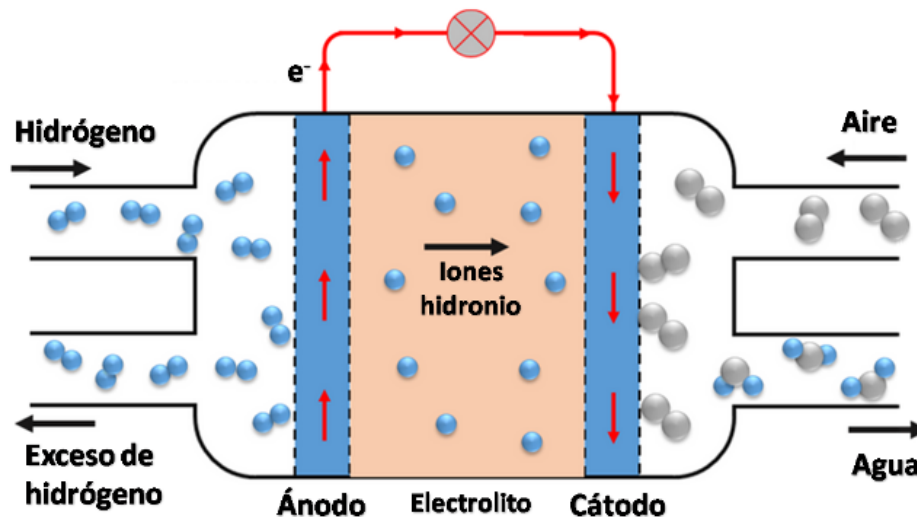


Figura 4: Esquema de funcionamiento de una pila de combustible (<https://hive.blog/hive-196387/@emiliomoron/pilas-de-combustible-de-hidrogeno-limitaciones-y-una-posible-solucion>)

Reacción en el ánodo
$$\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}(+) + 2\text{e}(-)$$

Reacción en el cátodo
$$\frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}(+) + 2\text{e}(-) \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$$

Reacción global
$$\text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$$

Figura 5: Reacciones en una célula de hidrógeno

El proceso en el que se forma energía eléctrica es muy simple en estas células. Se comienza introduciendo hidrógeno por el lado del ánodo, de manera que el hidrógeno se disocia en protones y electrones. Los protones son conducidos al cátodo, pero los electrones están forzados a viajar por un circuito externo, lo cual produce la energía deseada, ya que la membrana está aislada eléctricamente. Por último, en el cátodo las moléculas del comburente (oxígeno) reaccionan con los electrones que vuelven del circuito externo y con los protones para formar agua.

Cabe mencionar que existen diferentes tipos de pilas de combustible que se clasifican principalmente por el electrolito que utilizan. El tipo de pila determina principalmente el tipo de reacciones químicas que tienen lugar en la pila, el combustible requerido y el rango de temperaturas de operación. Estas características determinan a su vez, las aplicaciones para las que estas pilas son más adecuadas.

En materia de aplicaciones existe una gran diversidad en las que las pilas de combustibles pueden ser utilizadas, pero las más importantes que pueden ayudar al proceso de descarbonización son las portátiles, estacionarias y de transporte. [12]

Las aplicaciones portátiles son aquellas que están orientadas a pequeños dispositivos eléctricos, como ordenadores o teléfonos móviles, que cada vez son más prevalentes a nuestro alrededor.

Las aplicaciones estacionarias son aquellas que usan el hidrógeno para generar electricidad y calor en áreas comunes como empresas o zonas residenciales, tras almacenar el hidrógeno para que sea fácilmente accesible y sea cómodo su transporte. Otra aplicación es su uso como generador de potencia en casos de emergencia.

Finalmente, se encuentran las aplicaciones al transporte, en las que se plantea el uso de hidrógeno como combustible en pilas de combustible para vehículos eléctricos. Estos vehículos de celda de combustible de hidrógeno reducirían la contaminación del aire local ya que tienen cero emisiones de gases contaminantes. Adicionalmente, estas pilas se podrían

aplicar a vehículos de mayor tamaño como autobuses o incluso aviones, ya que el hidrógeno es una forma mucho más ligera de alimentar un motor eléctrico que una batería. [11]

2.6 PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno se comporta como un gas incoloro e inodoro en condiciones ordinarias de presión y temperatura (25°C y 1 atm). Siendo el primer elemento de la Tabla Periódica y con su número de electrones siendo tan solo 1, el hidrógeno posee propiedades únicas que lo diferencian del resto de los elementos en la Tabla Periódica, lo que hace que se le clasifique en su propio grupo, siendo el único elemento en ese grupo.

El hidrógeno tiene un peso molecular muy bajo, de tan solo aproximadamente 1, siendo su versión diatómica la forma útil del hidrógeno con un peso molecular de 2. Esta masa molecular tan baja hace que el hidrógeno sea el elemento químico más ligero de todos, lo que da lugar a que el hidrógeno gaseoso sea extremadamente poco abundante en la atmósfera de la Tierra. Esto se debe a que su pequeña masa permite que el hidrógeno escape al influjo de la gravedad terrestre más fácilmente que otros gases más pesados.

En temas de solubilidad, el hidrógeno en su estado puro es insoluble en el agua. Pero puede disolverse en diversos metales y en disolventes orgánicos, lo cual lo hace del hidrógeno un elemento indispensable en la metalurgia. Sin embargo, la adsorción del hidrógeno en el acero puede volverlo quebradizo. Esto es sumamente peligroso, ya que esto puede crear fallas en equipos químicos y a su vez generar fallos durante los procesos químicos que pueden ocasionar graves accidentes a los operarios.

A menos que haya sido previamente activado con un catalizador, el hidrógeno se mantiene poco reactivo a temperaturas ordinarias. Sin embargo, si la temperatura del hidrógeno se eleva lo suficiente, este se vuelve muy reactivo. [13]

Una de las propiedades más importantes del hidrógeno es su poder calorífico, es decir, la cantidad de energía por unidad de masa o unidad de volumen que se puede desprender al producirse una reacción de oxidación. Esta propiedad tiene dos valores principales, el PCI

(Poder Calorífico Inferior), que es el calor de la reacción de combustión que no aprovecha la energía de la condensación del agua, y el PCS (Poder Calorífico Superior), el cual sí aprovecha esta energía y, por tanto, con la misma cantidad de combustible se genera más calor.

En nuestro caso, la reacción más usada para el hidrógeno sería la de combustión, y de acuerdo con los valores que se exponen en la tabla inferior, los poderes caloríficos del hidrógeno serían el superior de 142,2 MJ/kg y el inferior de 121,2 MJ/kg. Sin embargo, son más usados los valores de unidad de volumen, siendo estos de 11,7 MJ/m³ el superior y de 9,9 MJ/m³ el inferior. Estos datos son muy importantes a la hora de hablar de almacenamiento de hidrógeno, ya que muestran que, en comparación con otros combustibles, la cantidad de energía que se puede almacenar por m³ es mucho menor que otras opciones. Esto se ve especialmente si lo comparamos con el gas natural, que tiene una capacidad calorífica más de 3 veces mayor que la que tiene el hidrógeno. [14][15]

	HHV		LHV	
	(MJ/m ³) ^a	MJ/kg	(MJ/m ³) ^a	MJ/kg
Hydrogen (H ₂)	11.7	142.2	9.9	121.2
Carbon monoxide (CO)	11.6	10.1	11.6	10.1
Methane (CH ₄)	36.4	55.5	32.8	50.0
Ethane (C ₂ H ₆)	63.8	51.9	58.4	47.8
Propane (C ₃ H ₈)	90.8	50.4	83.6	46.4
Butane (C ₄ H ₁₀)	117	49.5	108	45.8
Ethylene (C ₂ H ₄)	57.7	50.3	54.1	47.2
Acetylene (C ₂ H ₂)	53.2	49.9	51.4	48.2
Propylene (C ₃ H ₆)	84.2	48.9	78.8	45.8
Natural gas (typical)	38.3	53.5	34.6	48.3
Coal producer gas (typical)	5.2	5.3	4.3	4.4
Wood producer gas (typical)	4.8	5.1	4.0	4.2

Tabla 1: Tabla de HHV y LHV de combustibles gaseosos (Kenneth W. R., Kenneth M. B., 2011, Combustion Engineering 2nd Edition)

En lo relativo a sus propiedades atómicas, el hidrógeno es en ámbitos generales diatómico, aunque se puede disociar en átomos libres si es expuesto a altas temperaturas, ya que se vuelve muy reactivo a estas temperaturas. Asimismo, el hidrógeno atómico tiene un papel importante en las reacciones de reducción, al ser un agente reductor poderoso, que es capaz de reducir a su estado metálico gran variedad de sales, como los nitratos y cianuros.

Aparte de su papel en las reacciones de reducción, el hidrógeno también es capaz de reaccionar con cierto número de elementos, tanto metales como no metales, para producir hidruros, que actualmente están en proceso de investigación para comprobar si pueden ayudar a los esfuerzos de transporte de hidrógeno.

El hidrógeno también reacciona con oxígeno para formar agua, sin embargo, esta reacción es extraordinariamente lenta a temperatura ambiente, aunque existe la posibilidad de añadir un catalizador, que puede acelerar la reacción. Si se añade una chispa eléctrica, ésta reacciona como un catalizador, pero tiene el inconveniente de que lo realiza con violencia explosiva, lo cual puede provocar más problemas de seguridad. [16]

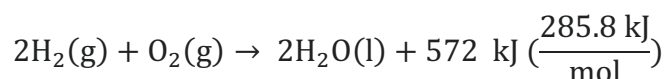


Figura 6: Fórmula química de combustión del hidrógeno

Finalmente, si se le hace reaccionar con nitrógeno, el hidrógeno experimenta una importante reacción para producir amoníaco. El amoníaco, siendo un derivado de la unión de hidrógeno y nitrógeno puede funcionar como un sistema de transporte del propio hidrógeno. Por ello, se está estudiando actualmente la posibilidad de emplearlo como combustible. Sin embargo, esto implica ventajas e inconvenientes que se discutirán en los próximos capítulos.

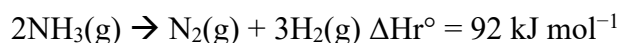


Figura 7: Reacción de descomposición del amoníaco

Por ahora, un procedimiento que se ha ideado es separar el amoníaco en gases de hidrógeno y nitrógeno, y así se podría aprovechar ese hidrógeno en pilas de combustible. El mayor

inconveniente de este uso es que el amoniaco es muy peligroso para el ser humano, pese a que es mucho más fácil de transportar que el hidrógeno.

Sin embargo, el uso más estudiado del amoniaco es la viabilidad de su utilización para el almacenamiento químico debido a su alto contenido de hidrógeno. El amoniaco puede licuarse a baja presión, 8.5 atm a 20 °C, por lo que su transporte y su almacenamiento son relativamente fáciles y requieren poca energía. Adicionalmente, desde el punto de vista de la seguridad, el amoniaco tiene un rango de combustión relativamente pequeño, siendo del 16-25 % en aire, en comparación con el de 4-75 % del hidrógeno.

La termodinámica dicta que la reacción de descomposición del amoniaco llega al 99 % de conversión a 400 °C y 1 atm. Esto significa que se requiere de una temperatura de operación moderadamente alta para poder llegar a terminar la reacción de descomposición del amoniaco y así producir hidrógeno de muy alta pureza.

Sin embargo, y pese a estos inconvenientes, se han estudiado y desarrollado varios catalizadores que ayudan a la reacción, como el rutenio o el níquel, que resultan ser altamente activos y ayudan a que la descomposición del amoniaco pueda ser llevada a cabo a la temperatura más baja posible. Esto amplifica la facilidad de obtener hidrógeno a partir del amoniaco, y refuerza la idea de que el amoniaco puede ser la solución ideal al transporte y almacenamiento de hidrógeno.

En resumen, el amoniaco se puede considerar como un sistema de almacenamiento de hidrógeno, ya que es líquido a baja presión a temperatura ambiente. Sin embargo, la optimización de la reacción de descomposición del amoniaco debe considerar no solo el tipo de catalizador, sino también el tipo de reactor para permitir la creación de una energía totalmente libre de carbono. [17]

Esto puede ser una de las mayores ayudas en el proceso de descarbonización, sobre todo unido a la creación de “hubs” de hidrógeno. Estos “hubs” son estructuras que permiten producir y consumir hidrógeno en un área concentrada y como consecuencia, disminuyen costos, por ejemplo, en infraestructuras de transporte y de almacenamiento.

2.7 *SEGURIDAD*

Como ya se ha explicado anteriormente, existen varios procesos para la producción de hidrógeno, sin embargo, todos los procesos conllevan problemas de seguridad. Por tal motivo es que el hidrógeno se almacena en forma de gas en cilindros o tanques a temperatura ambiente a alta presión (hasta 300 bar), o se almacena o se transporta casi sin presión en forma de hidrógeno criogénico líquido en recipientes aislados.

Varios de los problemas de seguridad que son derivados del uso del hidrógeno se deben a las propiedades físicas y químicas del hidrógeno. Estas propiedades hacen de este elemento un elemento difícil de manipular y complicado trabajar con él. El mayor de los problemas que el hidrógeno puede generar es la posible combustión que el hidrógeno puro produce. El hidrógeno tiene un rango de inflamabilidad muy amplio (entre el 4% y el 74% de concentración en el aire) y además requiere muy poca energía para iniciar la combustión, siendo esta energía la más baja de todos los combustibles usados comúnmente. Por ejemplo, en concentraciones relativamente bajas la inflamabilidad del hidrógeno es similar a la del gas natural o la gasolina. Sin embargo, el hidrógeno posee la temperatura más alta a la que una sustancia entra en ignición espontáneamente sin necesidad de chispa o llama, lo cual baja las probabilidades de explosión cuando se maneja el hidrógeno. [18]

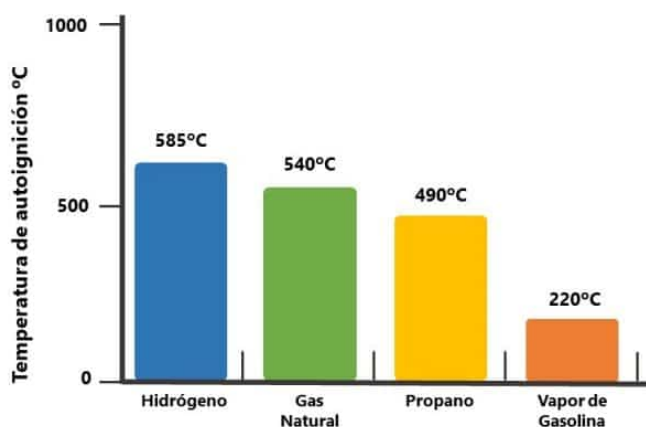


Figura 8: Temperatura de autoignición (<https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/la-seguridad-en-la-industria-del-hidrogeno-verde/>)

El hidrógeno puede funcionar como combustible, sin embargo, al ser altamente inflamable, las fugas que se pueden producir crean un grave riesgo de incendio. A diferencia de otros combustibles, los incendios de hidrógeno son muy diferentes. Al ser un elemento tan ligero, cuando se produce una fuga el hidrógeno se dispersa rápidamente hacia arriba, mientras que otros combustibles como la gasolina se acumulan en el suelo. Esto hace que la ignición del hidrógeno sea menos probable que en otros combustibles, sin embargo, el hidrógeno se enciende y arde más fácilmente, lo cual provoca incendios rápidos y difíciles de controlar.

Un ejemplo preocupante es que tan solo una chispa de electricidad estática del dedo de una persona es suficiente como para provocar una explosión cuando hay hidrógeno. Para añadir dificultades a la situación, la llama del hidrógeno es invisible lo cual complica extraordinariamente el problema en caso de que hubiera un accidente, ya que es difícil determinar dónde están las llamas, y aunque generan calor, sigue siendo difícil de averiguar dónde están. [19]

El hidrógeno, como se ha mencionado anteriormente, es inodoro, incoloro e insípido. Esto hace que las fugas sean difíciles de detectar, al no poder ser percibidas por los sentidos humanos. Otro posible problema que puede aparecer es que, pese a que el hidrógeno no es tóxico, en ambientes interiores el hidrógeno puede acumularse y causar asfixia al desplazar al oxígeno presente en el aire. A esto hay que añadir que, al tratarse de un gas, las fugas de hidrógeno se acumulan rápidamente si se presentan en ambientes interiores, lo cual aumenta el peligro de asfixia exponencialmente.

Tras una fuga, el hidrógeno tardará poco en llegar al techo debido a su ligereza, por lo que comenzará a llenar la habitación entera, y esto puede en el peor de los casos llevar a una explosión, debido a lo inflamable que es el hidrógeno. Este peligro puede compensarse si se añaden odorantes al combustible de hidrógeno, lo cuales generan un olor particular en caso de fuga que pueden alertar del peligro. Pero como el hidrógeno se dispersa rápidamente, es poco probable que el odorante viaje con él, por lo que, si se dispersa por la habitación, el nivel de dificultad para averiguar si ha habido una fuga no ha cambiado.

Por último, cabe comentar que el hidrógeno suele almacenarse y transportarse en tanques de hidrógeno líquido, y esto crea una preocupación importante, ya que, al estar comprimido, el hidrógeno líquido es extremadamente frío. Si hubiera una fuga de este hidrógeno comprimido y entrara en contacto con la piel, podría provocar graves congelaciones o incluso la pérdida de las extremidades. [20]

2.8 TAXONOMÍA DEL HIDRÓGENO

La taxonomía es la ciencia que estudia los métodos de clasificación de una sustancia u organismo. Como tal, en temas de hidrógeno, el método de clasificación se sustenta en el proceso del que proviene el hidrógeno lo cual permite al hidrógeno clasificarse en varios tipos que serán estudiados en más profundidad a continuación. Esta clasificación se debe a que el hidrógeno es un elemento impuro, lo cual significa que no podemos encontrar hidrógeno puro en la Tierra en grandes cantidades. Como se comentó anteriormente el hidrógeno es un elemento tan ligero, que tiende a subir a las capas más altas de la atmósfera y escapar al espacio. Por tanto, existen diferentes procesos de obtención de hidrógeno que ya han sido explorados anteriormente, y que forman diferentes tipos de hidrógeno que dependen de estos procesos y de las energías usadas durante estos procesos. [2]

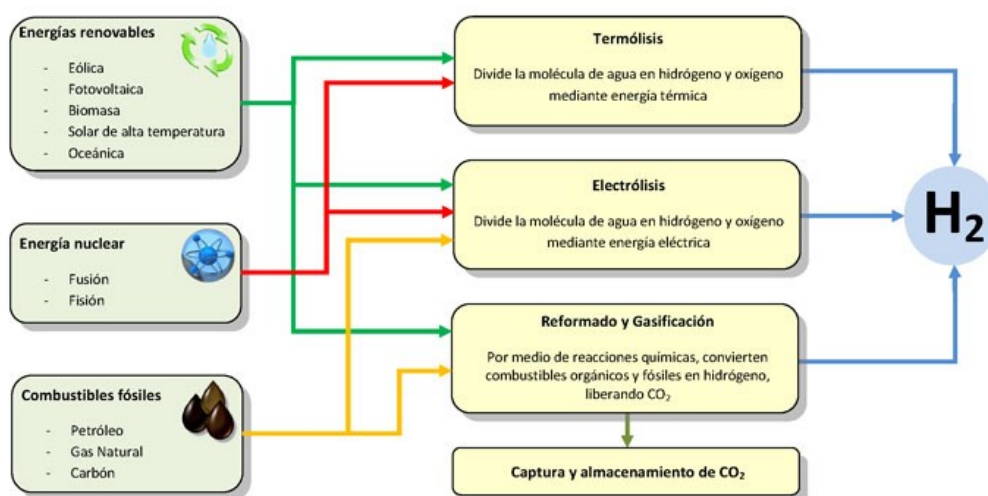


Figura 9: Procesos de obtención del Hidrógeno (<https://www.divulgah2.es/aprendesobre/hidrogeno/produccion/>)

2.9 TIPOS DE HIDRÓGENO

Existen multitud de tipos de hidrógeno llamados con diferentes nombres en base a las distintas materias primas, fuentes de energía y procedimientos que han sido empleados para la producción de ese hidrógeno. Esto es gracias a la taxonomía del hidrógeno, que estudia como clasificar el hidrógeno según el proceso del que proviene. Los nombres de los tipos de hidrógeno se basan en un color, el cual ha sido asignado para diferenciarlos de una manera sencilla y clasificarlos en función de su origen y de la cantidad de dióxido de carbono que se expulsa en su producción.

2.9.1 HIDRÓGENO GRIS

El hidrógeno gris es con diferencia el hidrógeno más común de todos. Se llama gris principalmente porque es derivado del carbón o del metano, y es producido en grandes cantidades, (aproximadamente 75 millones de toneladas de hidrógeno al año). Para obtener este tipo de hidrógeno se usa la técnica de reformado por vapor usando metano o gas natural. Es un proceso relativamente barato, pero que consume mucha energía porque exige presiones muy altas y temperaturas de 800 a 900 °C. Además, uno de los mayores inconvenientes, es la cantidad de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono que son generados durante la producción.

2.9.2 HIDRÓGENO AZUL

El hidrógeno azul se produce a partir de gas natural mediante un proceso similar al del hidrógeno gris. La principal diferencia con el hidrógeno gris es que parte de las emisiones de dióxido de carbono se consiguen almacenar y reutilizar mediante un sistema de captura de carbono. Después, ese dióxido de carbono puede ser utilizado para otros fines como la producción de combustibles sintéticos. Por este motivo este tipo de hidrógeno tiene un método de producción que es considerado como un método viable para reducir emisiones en el corto plazo.

2.9.3 HIDRÓGENO VERDE

El hidrógeno verde es el que se produce sin apenas emisiones nocivas de gases de efecto invernadero, de manera que es considerado el más limpio de todos, pero a la vez, el más caro de producir. La principal razón por la que se dice que es verde es por el uso de electricidad procedente de fuentes de energía renovable para su producción mediante la electrolisis.

Es el proceso más caro, pero se espera que su precio vaya disminuyendo a medida que bajen los costes de las energías renovables y los electrolizadores usados en el proceso de electrólisis. Además, es con diferencia el tipo de hidrógeno en el que más se invierte tanto en la mejora de su desarrollo como en las infraestructuras necesarias para producirlo.

2.9.4 HIDRÓGENO NEGRO Y MARRÓN

El hidrógeno marrón es el más contaminante de todos, lo que le ha hecho ganarse el título de ser el más opuesto al verde. Esto es debido a que se obtiene del proceso de calentar carbón negro a más de 700 °C, y a partir de este proceso se obtiene un gas del que se extrae el hidrógeno. Debido a sus emisiones de dióxido de carbono, es la forma de producción más dañina para el medio ambiente.

2.9.5 HIDRÓGENO ROSA, TURQUESA, AMARILLO O BLANCO

Los hidrógenos rosas, turquesa, amarillo y blanco son los más experimentales, y los menos usados en la industria por el momento. El hidrógeno rosa, también denominado hidrógeno rojo o púrpura, se genera a través de la electrolisis alimentada por energía nuclear. Sin embargo, si la electricidad usada para la electrolisis (la electrolisis es una reacción química en la que moléculas de agua se dividen en átomos de hidrógeno y oxígeno) proviene de un conjunto de fuentes diversas, ya sean renovables o no, recibe el nombre de hidrógeno amarillo.

El hidrógeno turquesa es la forma más reciente y experimental de obtener hidrógeno, puesto que aún no se ha probado a escala. Este hidrógeno se fabrica mediante un proceso llamado pirólisis de metano, que requiere temperaturas de alrededor de los 1000 °C. En lugar de generar un subproducto de dióxido de carbono como con el hidrógeno gris, se produce un desecho de carbón sólido que no contribuye al efecto invernadero. En el futuro, el hidrógeno turquesa podría valorarse como un hidrógeno de bajas emisiones, si durante el proceso térmico la fuente de alimentación es renovable y el carbono producido se almacena de manera responsable.

Por último, el hidrógeno blanco es un hidrógeno geológico que se encuentra en depósitos subterráneos y se produce a través de la técnica del fracking, que consiste en inyectar un fluido a alta presión en formaciones rocosas con el fin de abrir fisuras para que pueda escapar el hidrógeno. De momento, no hay estrategias para explotar este método de producción de hidrógeno y hay incluso algunos países en los cuales el método de fracking es considerado ilegal, como España, Francia o Alemania. [21][22]

3 ESTADO DE LA CUESTIÓN

La cuestión que se trata en este proyecto es si la implementación del hidrógeno como almacenamiento de energía eléctrica es viable o no en un futuro cercano. Con este fin, lo primero que debemos plantearnos para evaluar la viabilidad del uso del hidrógeno como vector energético para el almacenamiento de energía eléctrica es analizar si es mejor este método que los sistemas actuales de almacenamiento eléctrico.

3.1 MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO ACTUALES

Existe una variedad de métodos que son empleados en la industria para almacenar energía eléctrica. Entre ellos, los más utilizados son las siguientes tecnologías que permiten transformar y almacenar energía de manera eficiente: el bombeo hidroeléctrico, aire comprimido, almacenamiento térmico, supercondensadores, volantes de inercia y finalmente las baterías.

3.1.1 BOMBEO HIDROELÉCTRICO

Para comenzar, la energía hidroeléctrica por bombeo es un método de almacenamiento de energía hidroeléctrica, el cual es el más eficiente para almacenar energía a gran escala. Se trata de una configuración de dos embalses de agua a diferentes alturas que pueden generar energía cuando el agua baja de uno a otro, por descarga, pasando por una turbina. Estos embalses aportan estabilidad, seguridad y sostenibilidad al sistema eléctrico, al generar energía eléctrica sin crear ningún tipo de emisión a la atmósfera. Sin embargo, el mayor problema que presentan estos embalses es que su construcción fue realizada en el siglo pasado en una época en la que no se tuvieron en cuenta regulaciones medioambientales. De ahí que, construir nuevos embalses o depender solo de este tipo de almacenamiento no es lo más recomendable, ya que es un proceso complicado que hoy día no es tan fácil de operar como lo era anteriormente. [23]

3.1.2 ALMACENAMIENTO POR AIRE COMPRIMIDO

El almacenamiento de energía por aire comprimido se basa en el ciclo de la turbina del Ciclo de Brayton. Este tipo de ciclo funciona de la siguiente manera: se aplica presión al aire y después se calienta mediante la combustión de combustible. Después, el gas resultante, que se encuentra a alta temperatura, pasa a través de una turbina para extraer su energía. Una porción de esa energía se utiliza para impulsar el compresor, mientras que la energía restante se emplea para hacer girar un generador eléctrico. El excedente de energía se utiliza para comprimir aire usando un compresor rotativo y luego almacenarlo a menudo en una cámara subterránea. [23]

El mayor problema que presenta este método es que la producción no es muy eficaz. Esta producción se puede aumentar quemando gas natural en el aire a alta presión antes de que ingrese a la turbina de aire. Sin embargo, esto tiene la penalización de producir emisiones de dióxido de carbono, lo que no ocurre con la planta de almacenamiento simple, de tal forma que genera problemas sobre la sostenibilidad de la planta que van en contra de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

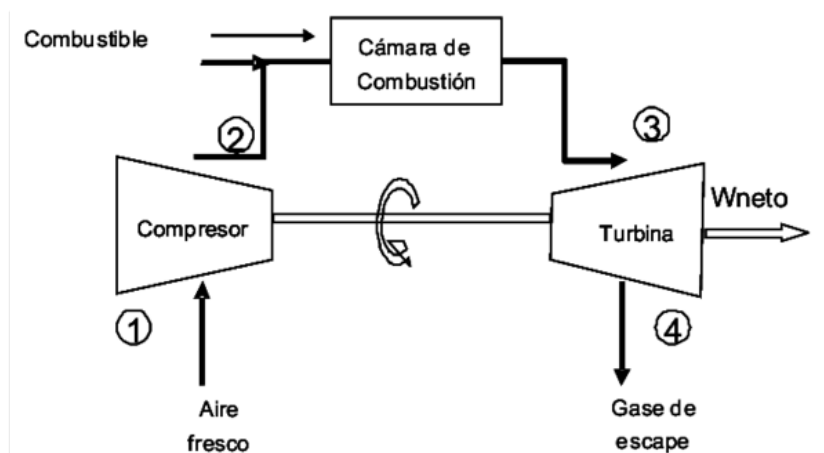


Figura 10: Procesos de obtención del Hidrógeno (<https://www.divulgah2.es/aprende-sobre/hidrogeno/produccion/>)

3.1.3 ALMACENAMIENTO TÉRMICO

Otro método es el almacenamiento térmico, que consiste en acumular energía en materiales que permitan retenerla y liberarla de manera controlada, a través de métodos que incluyen desde la refrigeración mediante acumulación de hielo hasta la exposición a temperaturas elevadas. Sin embargo, este método también presenta varios problemas de seguridad y precio.

Hoy día, usar este tipo de almacenamiento es muy caro, ya que se necesitan diversas medidas de seguridad para evitar problemas, tales como que si a lo largo de todo el año no se realiza el adecuado asoleamiento en el interior y exterior de los materiales de almacenamiento pueden generarse calentamientos o enfriamientos en zonas no deseadas que pueden conllevar accidentes. [23]

3.1.4 SUPERCONDENSADORES

Otro método de almacenamiento es el uso de supercondensadores, en los cuales la energía se almacena en las superficies de los electrodos. El mayor problema que presentan los superconductores es que la cantidad de energía que almacenan es mucho menor que otros métodos como las baterías. Sin embargo, son muy potentes y rápidos, puesto que guardan la energía en un campo eléctrico. Por otro lado, mientras que las baterías tienen una vida limitada y necesitan de una carga más larga, los supercondensadores se autocargan muy rápido y tienen mayor durabilidad.

Por otra parte, en los supercondensadores no existe reacción química, sino solamente una separación de electrones y protones. De esta forma, la carga no provoca acumulación de calor y, por tanto, no crea deformación del dispositivo, como sí ocurre con las baterías.[23]

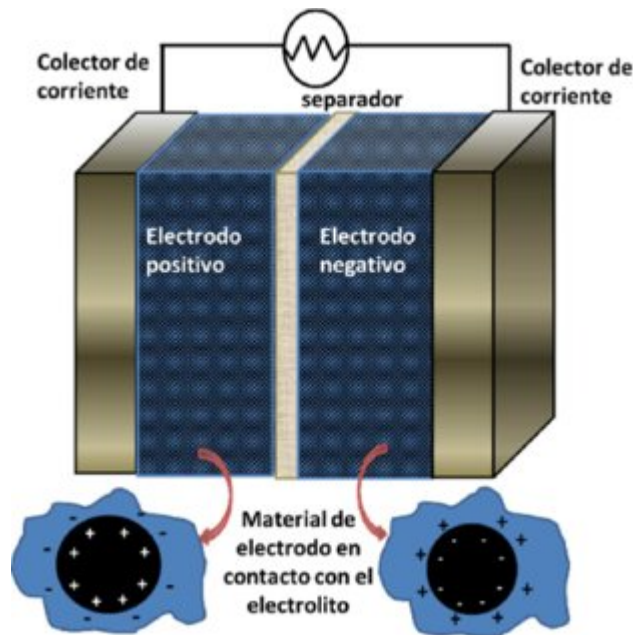


Figura 11: Esquema básico de un supercondensador (Díaz Baizán, Patricia, 2016/11/06, SUPERCONDENSADORES HIBRIDOS ASIMÉTRICOS BASADOS EN MATERIALES DE CARBONO Y ESPECIES REDOX INORGANICAS)

3.1.5 VOLANTES DE INERCIA

Otro método utilizado es el uso de volantes de inercia, los cuales se sirven de la energía cinética para almacenar electricidad. Consiste en un disco pesado con una masa distribuida uniformemente alrededor de un eje central. El volante de inercia está diseñado para girar a alta velocidad y, cuando se aplica una fuerza a su eje, la energía cinética almacenada en el disco se libera para realizar trabajo, lo cual resulta en una manera limpia y sencilla de almacenamiento de energía, aunque evidentemente, la viabilidad del empleo de volantes de inercia depende de algunos factores tales como el número de ciclos de vida, los costes de fabricación y explotación, los materiales empleados, etc. Esto sumado al coste general de mantener el volante funcionando genera unos costes muy grandes, y que deja mucho espacio para la mejora en temas de rendimiento. [24]

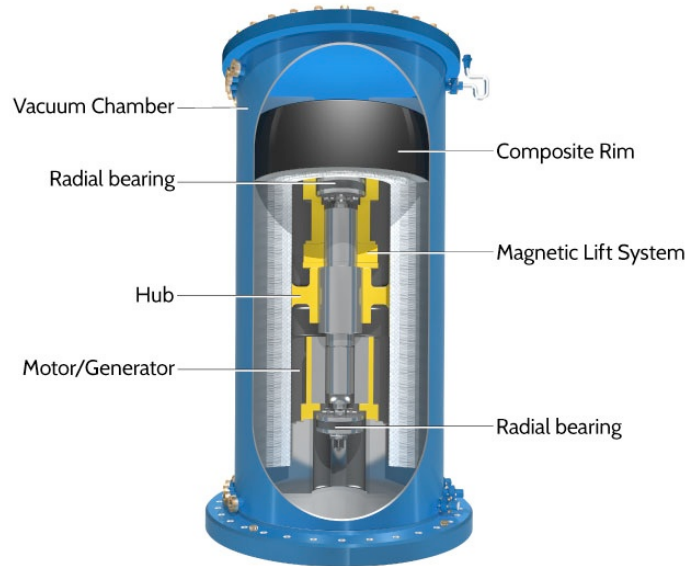


Figura 12: Esquema básico de un supercondensador (Díaz Baizán, Patricia, 2016/11/06, SUPERCONDENSADORES HIBRIDOS ASIMETRICOS BASADOS EN MATERIALES DE CARBONO Y ESPECIES REDOX INORGANICAS)

3.1.6 ALMACENAMIENTO EN BATERÍAS

Para finalizar, el último método utilizado actualmente es el uso de baterías. Este método es el más común, ya que las baterías reciben la electricidad de la red eléctrica directamente de la central, o de una fuente de energía renovable, y posteriormente la almacenan en forma de corriente eléctrica para luego liberarla cuando se necesite. Existe una diversidad de tipos de baterías; entre ellas están las baterías de plomo-ácido, las cuales son muy versátiles, ya que pueden emplearse para diferentes finalidades, desde el arranque de vehículos pequeños hasta para el soporte eléctrico de fábricas y hogares; las baterías de níquel-cadmio que tienen una larga vida útil y una buena resistencia a la sobrecarga; las baterías de níquel-hidruro metálico que han sido creadas con la finalidad de sustituir lentamente a las baterías de níquel-cadmio en virtud de su mayor capacidad y menor efecto memoria; las baterías de ion-litio, las cuales tiene la mejor eficacia de todas las baterías y finalmente las baterías de litio de fosfato de hierro, que cuentan con un ciclo de vida mayor, lo que conlleva a una mayor durabilidad.[25]

Sin embargo, pese a que el uso de baterías como medio de almacenamiento es el más común y utilizado de todos los métodos, existen varios problemas que aún no han sido solucionados. Estos problemas son: los materiales usados en las baterías, el efecto en el medio ambiente, el manejo de las baterías y el peso de éstas.

Analizando el primer problema, los materiales usados en las baterías, podemos concluir observando los diferentes tipos de baterías que existen, que todas ellas usan materiales que no son sencillos de obtener, y que hoy en día incluso existen problemas de escasez de alguno de ellos. Este es el problema con el litio, un material que es usado en variedad de baterías y que ha sufrido una gran escasez en los últimos 2 años, debido a su utilización en diferentes elementos de la batería como el electrolito o el ánodo. De ahí que, en el año 2021, por primera vez desde que se tienen registros, la demanda mundial de litio fuera superada por la oferta. El litio siendo un material ligero y muy reactivo, tiene una gran demanda hoy día, y esto ha provocado un gran aumento de su precio, lo cual a su vez ha aumentado el precio de las baterías.

El segundo de los problemas es el efecto de las baterías en el medio ambiente, y este es uno de los más problemas más serios si lo comparamos con el método del hidrógeno. El principal problema que traen las baterías al medio ambiente es el manejo de la batería una vez su vida útil ha finalizado. Las pilas son consideradas residuos peligrosos porque tienen capacidades corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas e inflamables. Estas propiedades hacen que el manejo inadecuado de los residuos sea especialmente peligroso, ya que no solo afecta al medio ambiente, también afecta al primer problema, debido a que la cantidad de materiales como el litio no hace más que disminuir al gastar innecesariamente los materiales que no son fácilmente reciclables.

El tercer problema que conlleva el uso de baterías es su manejo. Este problema puede parecer el menos importante, ya que al contrario que los otros, su implicación no es tan devastadora como los problemas en el medio ambiente o en el precio y demanda de éstas. Sin embargo, el mal manejo de baterías ya sea durante su vida útil como durante su fabricación y fase de desecho, puede generar problemas medioambientales y de seguridad. Ya hemos hablado

sobre como el manejo inadecuado de residuos es nocivo para el medio ambiente, pero también es peligroso este mal manejo durante la vida útil de la batería. Como se ha mencionado anteriormente, las baterías tienen propiedades corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas e inflamables, lo cual puede llevar a problemas como explosiones o fugas corrosivas que pueden lesionar a trabajadores o usuarios de estas baterías.

Finalmente, el último problema de las baterías es su peso. Este problema es bastante simple de explicar y entender, ya que los problemas que conlleva el alto peso de una batería son ramificaciones de los otros problemas. Un alto peso crea situaciones en las que el manejo de la batería es más complicado y esto puede ocasionar problemas a usuarios y trabajadores; de la misma forma, el peso también afecta a la hora de distribuir los residuos de la batería, de manera que un mal manejo de estos puede causar problemas medioambientales como ya se ha explicado anteriormente. Como ejemplo, el peso de la batería de un coche eléctrico varía entre los 100 y 600 kg dependiendo de la potencia de la batería, y ya existen registros de accidentes que han ocurrido durante el deshecho de la batería debido a su peso. [26][27]

3.2 ESTADO DEL ARTE

A continuación, se describirán las tecnologías de última generación que utilizan el hidrógeno como vector energético para el almacenamiento de energía eléctrica. Para llevar a cabo esto, necesitamos entender que la idea de usar hidrógeno como portador de energía ya ha sido planteada y estudiada en detalle. Por esta razón, ya se ha comprobado que el hidrógeno se puede producir y almacenar de varias formas y métodos, y son estos métodos los que plantean serios problemas energéticos y de seguridad.

Ya se han comenzado varias investigaciones sobre cómo resolver los diferentes problemas que aparecen al usar estos métodos. Sin embargo, los resultados de estas investigaciones pueden tardar años en aparecer y no hay garantía de que se obtengan resultados positivos. Este problema se puede resumir cuestionando la viabilidad del hidrógeno como vector energético y hasta que esos resultados no aparezcan, si es que pueden aparecer, los métodos actuales son los únicos que pueden ser usados y estudiados en mayor profundidad.

Por lo tanto, existen diferentes métodos de generación de hidrógeno que producen diferentes tipos de hidrógeno según el proceso utilizado y el tipo de energía utilizada para obtenerlo. El más importante de estos tipos es el llamado hidrógeno verde producido por electrólisis. Este tipo de hidrógeno es el único que no genera contaminación durante la producción, ya que el proceso utiliza energías renovables y no libera gases nocivos para el medio ambiente al final de la reacción química. No debemos olvidar que el hidrógeno debe ser almacenado por compresión o licuefacción y ser transportado en embarcaciones o tubos para su uso como medio de almacenamiento de energía eléctrica de forma segura.[30]

En consecuencia, se han llevado a cabo numerosos estudios para mejorar la producción y el almacenamiento del hidrógeno y demostrar alternativas más económicas y eficientes a los métodos actualmente en uso. Por consiguiente, las opciones más interesantes son aquellas que presentan el mayor potencial a la hora de almacenar hidrógeno y que sean económicamente viables. Teniendo en cuenta estos requisitos, se examinaron en detalle los siguientes métodos: almacenamiento de hidrógeno en amoníaco, producción de hidrógeno verde por electrólisis y producción de energía eléctrica en pilas de combustible.

En cuanto al primero de estos métodos, cabe señalar que ya ha sido documentado el empleo de amoníaco para almacenar hidrógeno en numerosas investigaciones y trabajos. A partir de estos estudios, podemos confirmar que el amoníaco siendo un derivado del enlace entre el hidrógeno y el nitrógeno, puede funcionar como sistema de transporte de hidrógeno. Por ello, actualmente se está investigando la posibilidad de utilizarlo como combustible, pero esto tiene diversas ventajas y desventajas. Actualmente, una posibilidad es separar el hidrógeno y el nitrógeno gaseoso, y este hidrógeno se puede utilizar en pilas de combustible, el cual es el tercer método para discutir. El principal inconveniente del aprovechamiento del amoníaco como sistema de transporte es que, si bien es mucho más fácil de transportar que otros métodos, el amoníaco es extremadamente peligroso para los humanos.[28]

El segundo método, la electrólisis, es el proceso de dividir el agua en hidrógeno y oxígeno. Una de las mayores ventajas de este proceso es que, a diferencia de otros métodos, este proceso no origina resultados que se consideren contaminantes y produce hidrógeno verde,

que es el que tiene más probabilidades de contribuir a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Al igual que otros procesos de producción de hidrógeno, la electrólisis requiere un aporte de energía para iniciar el proceso y es este suministro de energía el que ocasiona que la electrólisis sea un proceso muy costoso para producir hidrógeno. En consecuencia, a pesar de que produce hidrógeno verde, es decir el único tipo de hidrógeno que no contamina durante su producción, este proceso es el menos utilizado de todos.[9]

Finalmente, analizamos cómo las celdas de combustible pueden generar electricidad y su uso en aplicaciones portátiles, estacionarias y de transporte. En primer lugar, una pila o celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química directamente en energía eléctrica. Estas baterías utilizan hidrógeno como combustible que tiene la gran ventaja de convertirse en electricidad. Esto significa que el hidrógeno se puede usar directamente en motores y celdas de combustión interna y esta flexibilidad implica que el hidrógeno se puede usar como combustible en una amplia gama de aplicaciones. Estas aplicaciones pueden apoyar en gran medida el proceso de descarbonización de varias maneras. Por ejemplo, las celdas de combustible se pueden utilizar en vehículos, y estos vehículos de pila de combustible de hidrógeno no emiten contaminantes, lo que reduce la contaminación del aire local. [11]

4 DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

La implementación del hidrógeno como vector para el almacenamiento de energía eléctrica es una de las materias más discutidas hoy en día, y esto es debido principalmente al pensamiento general de que el hidrógeno presenta una solución viable para uno de los problemas más serios que nuestra sociedad afronta: el excesivo uso de energías y combustibles nocivos para el medio ambiente.

Las razones por las que se cree que el hidrógeno es una posible solución a este problema son diversas, como por ejemplo la producción de hidrógeno verde que usa energías renovables y por lo tanto es mucho mejor para el medio ambiente, o el uso de hidrógeno como almacenamiento de energía eléctrica que permite un uso limpio de energía.

A simple vista parece que el hidrógeno es la solución perfecta, y en virtud de ello es por lo que en los últimos años el número de proyectos que incluyen hidrógeno han crecido exponencialmente, incluyendo entre otros proyectos como el “Corredor Vasco del Hidrógeno (BH2C)”, un conjunto de 3 plantas (2MW, 10MW y 100MW) que serán operativas a partir de 2025, o el Vall de L’Hidrogen de Cataluña que prevé la producción de hidrógeno verde a gran escala (hasta 50 toneladas por día). [29]

Sin embargo, para concluir si el hidrógeno es el verdadero futuro de la industria energética, es necesario hacer un estudio a fondo de la eficacia y viabilidad del hidrógeno; para comprobar si es cierto que es una útil implementación y ayuda para los ODS, o si, por el contrario, es tan solo una idea pasajera que ha sidoalzada como la solución ideal sin darse cuenta de lo acertada o equivocada que es esa idea. Creemos que la cuestión a responder si el hidrógeno puede ser la solución o una de las soluciones posibles para la descarbonización o al menos la mitigación del uso de combustibles fósiles, debe analizarse con detenimiento y al menos con cierto espíritu crítico. Por ello es por lo que este proyecto tiene cierto sentido

crítico, para justificar si el hidrógeno es una opción viable, segura y eficiente para la generación y almacenamiento de energía eléctrica como uno de los vectores posibles hacia la descarbonización. [30]

4.2 TRABAJOS ANTERIORES

El uso del hidrógeno como vector para el almacenamiento de energía eléctrica es un tema que ha sido objeto de investigación durante varias décadas. Por ello, para comprobar la viabilidad del uso de hidrógeno, se comenzará presentando algunos trabajos relevantes relacionados con este proyecto, para entender el estado actual del estudio de este tema.

Década de 1970

En el año 1970, el físico y químico británico John Bockris propuso por primera vez la idea de utilizar el hidrógeno como vector de energía, para ello Bockris sugirió que la energía eléctrica producida por fuentes renovables (como la energía solar y la energía eólica) podría ser utilizada para producir hidrógeno a través de la electrólisis del agua ya anteriormente discutida. El hidrógeno podría luego ser almacenado y transportado a otros lugares, donde se utilizaría como combustible para generar energía eléctrica. [31]

Década de 1980

En la década de 1980, la NASA comenzó a investigar el uso del hidrógeno como combustible para cohetes, para ello desarrollaron tecnologías para producir hidrógeno a partir de agua utilizando células solares y para almacenar el hidrógeno en tanques criogénicos a temperaturas muy bajas. Estas tecnologías se han utilizado desde entonces en la industria aeroespacial y han sentado las bases para la producción de hidrógeno a gran escala que vemos hoy día.[32]

Década de 2000

En 2004, la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales publicó un informe titulado "El hidrógeno y la energía del futuro", en el que se analizaba el potencial del hidrógeno como vector energético. En este informe se destacó la importancia de desarrollar

tecnologías para producir hidrógeno de manera sostenible y asequible, así como para almacenar y distribuir el hidrógeno de manera eficiente, y por otra parte también discutieron los desafíos técnicos y económicos asociados con la adopción y uso del hidrógeno como fuente de energía. [33]

Década de 2020

En 2021, la Comisión Europea publicó un informe titulado "INFORME sobre una estrategia europea para el hidrógeno", en el que describieron las oportunidades y desafíos asociados con el uso del hidrógeno como vector energético en Europa. En este informe se destacó la importancia de establecer una cadena de suministro de hidrógeno sostenible y de bajo coste, así como la importancia de desarrollar tecnologías para la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables, en otras palabras, hidrógeno verde. [34]

4.3 OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto consiste en contestarnos a la pregunta de si la implementación del hidrógeno como vector energético es viable en el futuro cercano y si podrá ayudar al proceso de descarbonización. Para poder responder a esta pregunta, se han creado tres (3) diferentes objetivos que constan como los objetivos generales del proyecto, y son los que se procederán a desarrollar en profundidad.

Estos objetivos son: el estudio de los métodos de almacenamiento y transporte de hidrógeno y los posibles riesgos que pueden conllevar; la investigación de los casos de uso para el almacenamiento y la creación de hidrógeno; y por último el análisis de los diseños de plantas más relevantes que permitan que la creación y almacenamiento de hidrógeno sean lo más eficiente y económicamente posible.

La implementación del hidrógeno como combustible y vector energético es una pregunta que conlleva muchos factores diferentes, pero entre ellos los más importantes son los factores económicos, que debaten si con la economía actual es viable usar hidrógeno en lugar de otros combustibles más nocivos como la gasolina; los factores de seguridad, que

consideran si es posible mejorar las condiciones de seguridad de manejo del hidrógeno debido a sus propiedades; y por último los factores de producción, los cuales analizan si con el precio que tiene la generación de hidrógeno verde, somos o no capaces de generar suficiente volumen como para ser usado eficientemente en la ayuda al proceso de descarbonización. [30]

Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El proyecto abordará varios Objetivos de Desarrollo Sostenible, en adelante ODS, al intentar resolver la pregunta de si la implementación del hidrógeno como vector energético es viable en un futuro cercano y si podrá ayudar al proceso de descarbonización.

En primer lugar, introducir el hidrógeno en nuestra rutina diaria nos permite hablar de objetivos de salud y bienestar (ODS 3) destinados a garantizar una vida saludable y promover el bienestar en todas las edades. La salud y el bienestar humanos dependen en gran medida de la calidad del aire que respiramos a diario, y este aire está cada vez más contaminado. Los automóviles y las fábricas con motores de combustión interna emiten grandes cantidades de dióxido de carbono a la atmósfera y ésta se deteriora cada vez más. Introducir hidrógeno en los automóviles a través de pilas de combustible y utilizar hidrógeno para almacenar energía eléctrica podría mejorar la salud de las personas al no emitir gases nocivos.

En lo que respecta a los objetivos de agua limpia y saneamiento (ODS 6), no parece haber un vínculo obvio, pero se puede argumentar que el hidrógeno contribuye a este objetivo. Este vínculo se encuentra en las plantas de sal que extraen sal del agua de mar y requieren grandes cantidades de energía eléctrica, contaminando en el proceso no solo el aire sino también el agua. Si se utiliza hidrógeno como fuente de energía, ayudará a reducir la contaminación del agua, ya que el uso de energía eléctrica no la contaminará.

Sin embargo, el principal objetivo de los ODS reflejado en este proyecto es garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna (ODS 7). Ciertamente el hidrógeno se está investigando como combustible sostenible en este proyecto porque es muy

abundante en la naturaleza y es posible que no libere gases nocivos durante su generación y almacenamiento. Si podemos confirmar que el hidrógeno puede alcanzar este estado de utilización en un futuro cercano, podría resolver uno de los mayores problemas energéticos del mundo.

Otro de los ODS abordado en este proyecto tiene como objetivo promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo digno para todos (ODS 8). Este objetivo podría verse afectado positivamente por la introducción del hidrógeno en el sector energético. Probablemente se crearían empleos, se impulsarían las economías en áreas desfavorecidas al abrir fábricas que no causen contaminación en sus vecindarios y mejoraría la calidad de vida de los trabajadores mediante el uso de hidrógeno verde en vez de combustibles fósiles.

Se puede también discutir de infraestructuras (ODS 9) de la misma manera que hablamos de industria eléctrica y fábricas. Esto conducirá a los objetivos de construir una infraestructura resiliente, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación, lo que se puede usar para promover el uso de energía limpia, y construyendo las tuberías de agua y las plantas de celdas de combustible necesarias para usar hidrógeno como vector de energía.

Este objetivo se promoverá mediante la consolidación de estas plantas y la construcción de nuevas infraestructuras para el transporte y almacenamiento de hidrógeno. No solo se busca lograr este objetivo, sino también hacer que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles (ODS 11). Al introducir el hidrógeno en la industria, los aspectos energéticos y de sostenibilidad de la industria solo mejorarán si realmente encontramos soluciones a los problemas que surgen cuando se trabaja con hidrógeno.

Como es comúnmente conocido, el consumo y la producción mundial (ODS 12) dependen del entorno natural y de la utilización de los recursos cada vez más escasos del planeta. Esto tiene un efecto devastador en el planeta, pero utilizar hidrógeno como combustible puede mejorar la situación aprovechando sus propiedades, especialmente su abundancia en la naturaleza. El hidrógeno es la sustancia más abundante del universo, constituyendo el 75%

de la materia del universo. Utilizarlo como fuente de energía nos hace menos dependientes de los escasos recursos naturales del planeta, fomentando así el consumo responsable.

Otro de los grandes objetivos orientados a aportar soluciones es la adopción de medidas urgentes para hacer frente al cambio climático y sus impactos (ODS 13). Con la ayuda del hidrógeno verde como combustible y fuente de energía respetuosa con el medio ambiente, esto es claramente factible si el hidrógeno es capaz de generar la demanda eléctrica que es necesaria hoy en día. El hidrógeno verde no emite gases nocivos a la atmósfera durante el proceso de fabricación y es inocuo cuando se utiliza en pilas de combustible. Esto fomentará la producción de más vehículos de pila de combustible, lo que contribuirá significativamente a reducir los gases de efecto invernadero y mejorar el cambio climático en general.

Como la creación, almacenamiento y transporte de hidrógeno podría posiblemente no contaminar al no expulsar gases nocivos, esto también podría ayudar a conservar y utilizar sosteniblemente los recursos marinos, los mares y los océanos (ODS 14). La manera en la que esto podría ocurrir sería usando hidrógeno en vez de combustibles fósiles, ya que estos agravan los efectos de contaminación y acidificación de los océanos. Si pudiésemos usar hidrógeno como una fuente de energía habitual, la contaminación y los desechos de fábricas serían menos frecuentes y ayudarían a que la situación en la que se encuentran los océanos mejorase.

Por último, la introducción del hidrógeno como vector de energía y combustible apoyará los objetivos de gestión sostenible de los bosques, lucha contra la desertificación, atajar y revertir la degradación de la tierra y detener la pérdida de biodiversidad (ODS 15). Esto se logra de manera similar a la descrita en la sección anterior, usando hidrógeno como fuente de energía en vehículos, fábricas y aplicaciones generales, y usando hidrógeno verde para producir, almacenar y reducir la contaminación en el proceso de creación, almacenamiento y transporte de hidrógeno.

Esto no solo promueve el uso sostenible de la energía, sino que también reduce la necesidad de combustibles y energías como el carbón o la leña, reduciendo así la deforestación, así

como la pérdida de biodiversidad, ya que no es necesario el aprovechamiento forestal para conseguir materias primas. [30]



Figura 13: Objetivos de Desarrollo Sostenible discutidos: 3, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14 y 15

4.4 METODOLOGÍA

La metodología de este proyecto consta de varias partes, pero todas pueden condensarse en cuatro: recopilación de fuentes sobre el tema en cuestión, análisis de contenido, puesta en común en reuniones semanales y discusión y justificación de las conclusiones extraídas.

En cuanto a la primera parte, se inicia con una investigación y recopilación de hechos e información sobre diversos temas relacionados con el hidrógeno. Por ejemplo, se podría dedicar una semana a aprender sobre las diversas características del hidrógeno, y la semana siguiente podría dedicarse a aprender cómo afecta el amoníaco a los nuevos sistemas de transporte de hidrógeno.

Todo el contenido y la información obtenida se obtiene de repositorios de documentos y libros proporcionados por el director o de investigaciones independientes en bibliotecas y en Internet. Este paso se realiza resumiendo los datos y sacando conclusiones generales sobre el tema de investigación. Por ejemplo, si se investigan los procesos de almacenamiento de

hidrógeno, éstos se resumen sistemáticamente, creando tablas comparativas de manera que el alumno pueda elegir cual de todos los sistemas es el más adecuado para su proyecto.

Una vez por semana, el director se reúne con el alumno para intercambiar los datos obtenidos, la información recabada y las conclusiones extraídas del análisis. Estas conclusiones pueden o no, ser correctamente extraídas. En ese caso, el director puede orientar al estudiante en la dirección correcta.

Finalmente, el alumno racionaliza las conclusiones extraídas y registra lo aprendido durante la semana en su memoria del proyecto. Esto sirve como recopilación de todas las conclusiones extraídas cada semana. En esta parte se hace un resumen del problema y principales conclusiones para poder iniciar la siguiente investigación con las ideas claras obtenidas. Todos estos pasos son parte del programa de trabajo semanal del proyecto, donde todos los datos, procesos y conclusiones se escriben en la memoria.

La metodología aplicada también se basa en los siguientes recursos utilizados en este proyecto: bibliografías científicas, artículos publicados, participación en congresos y búsqueda de noticias relacionadas con el contenido de la investigación.

En cuanto al primer recurso, el alumno tiene una biblioteca de ciencias completa con documentos y artículos relacionados con el hidrógeno que se pueden utilizar para la investigación. Además, el director proporciona un repositorio en línea con una variedad de documentos y presentaciones para reducir el esfuerzo de buscar nuevos datos, ya que hay mucha información en este repositorio.

Además de las bibliotecas y repositorios provistos, el alumno busca información y datos en forma de artículos publicados, ya sea digital o en papel. Estos artículos se deben registrar en la memoria, y el alumno también debe estar seguro de que la información en estos artículos es significativa y no se ha vuelto obsoleta con el paso de los años. La forma en la que el alumno encuentra estos artículos depende del tipo de información que busca, pero en todos los casos, se ha de asegurar que las conclusiones que obtiene de un artículo tienen sentido y se correlacionan con las conclusiones de otros artículos sobre el mismo tema.

Además, el alumno puede asistir a conferencias donde se tratan temas relacionados con el hidrógeno, como su papel como nuevo combustible y su uso en nuevas industrias. Un ejemplo de un congreso atendido fue el congreso “Hydrogen Online Conference”. Fue un evento en línea de 24 horas donde expertos y líderes de la industria presentaron nuevos contenidos sobre la industria de la energía y el uso del hidrógeno.

Finalmente, además de buscar artículos sobre un tema, el alumno también puede buscar noticias sobre el contenido de su trabajo. Estas son muy útiles al presentar la situación actual, y esto le permite al alumno enfocar su proyecto en el presente o inspirar a explorar contextos específicos en torno a su tema. [30]

5 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

El hidrógeno es hoy día considerado una fuente de combustible alternativa con potencial para sustituir a los combustibles fósiles en el futuro, sin embargo, uno de los mayores retos a la hora de utilizar el hidrógeno como vector para el almacenamiento de energía eléctrica es cómo almacenarlo de forma eficaz y eficiente. Esto se debe a que el hidrógeno tiene baja densidad y es un gas a temperatura y presión ambiente, lo que dificulta mucho su almacenamiento en grandes cantidades, y es por ello por lo que el desarrollo de métodos eficaces y seguros de almacenamiento del hidrógeno es fundamental para su uso generalizado como combustible. Los tres métodos de almacenamiento de hidrógeno más usados comúnmente hoy en día son el uso de tanques criogénicos, el almacenamiento subterráneo y el almacenamiento en forma de amoníaco o metanol. [2]

5.1 TANQUES CRIOGÉNICOS

La forma más común de almacenar hidrógeno es en tanques criogénicos, que son contenedores especialmente diseñados para mantener el hidrógeno a temperaturas extremadamente bajas (-253°C aproximadamente). A esta temperatura, el hidrógeno se convierte en estado líquido, lo que reduce considerablemente su volumen y facilita su almacenamiento y transporte, por ello es por lo que los tanques criogénicos se utilizan habitualmente en aplicaciones a gran escala, como en la industria aeroespacial. En este tipo de industria los tanques pueden almacenar suficiente hidrógeno líquido como para alimentar cohetes y naves espaciales, sin embargo, los tanques criogénicos son caros y requieren equipos, conocimientos y técnicas específicos para su mantenimiento.

Por estas razones es que los tanques criogénicos están hechos de materiales especiales, que pueden soportar las temperaturas extremadamente bajas necesarias para almacenar hidrógeno líquido, siendo uno de los materiales más comunes el acero inoxidable que recubre los tanques hechos de doble pared con una capa aislante intermedia. El diseño es

simple, ya que la capa exterior del depósito está diseñada para mantener el calor fuera, mientras que la interior contiene el hidrógeno líquido. [35]

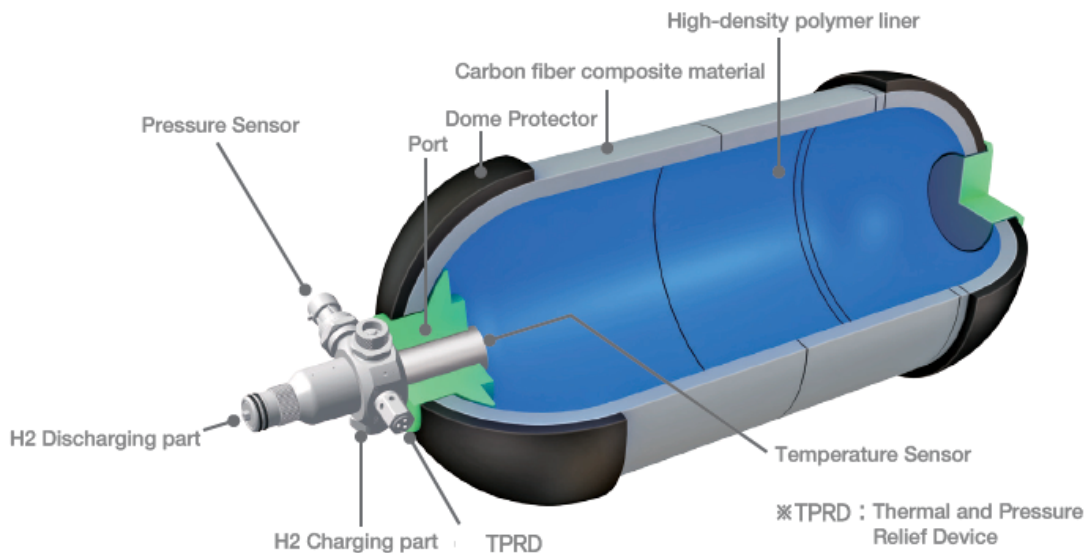


Figura 14: Tanque de alta presión de tipo IV (<https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/>)

Una de las ventajas de los depósitos criogénicos es que ofrecen un almacenamiento de alta densidad debido a que el hidrógeno líquido tiene una densidad energética mucho mayor que el hidrógeno gaseoso, lo que significa que se puede almacenar una cantidad mucho mayor de hidrógeno en un volumen menor. Esto permite el almacenamiento de grandes cantidades, lo cual facilita su transporte y a su vez reduce la dificultad y cantidad de infraestructura necesaria para almacenar la misma cantidad de energía si se almacenara el hidrógeno en estado gaseoso.

Sin embargo, el uso de tanques criogénicos también presenta varias desventajas: los costes de construcción y mantenimiento son muy elevados debido a que los tanques deben diseñarse de manera que puedan soportar las bajas temperaturas necesarias para almacenar hidrógeno líquido, lo cual aumenta su coste exponencialmente, y también hay que aislarlos para mantener el calor exterior fuera del contenido, lo que aumenta aún más el coste. Otra desventaja es que su mantenimiento requiere equipos y conocimientos muy especializados

y específicos: hay que llenarlos y vaciarlos con cuidado para evitar que el hidrógeno líquido hierva y se escape a la atmósfera, generando problemas de seguridad y posibles accidentes. Por ello es por lo que están sometidos a inspecciones periódicas para asegurarse de que no haya fugas ni otros problemas que puedan comprometer la seguridad del depósito, lo cual dificulta la velocidad de carga y descarga de los tanques.

En general, los depósitos criogénicos son un método eficaz para almacenar hidrógeno, sobre todo para aplicaciones a gran escala que requieren un almacenamiento de alta densidad, sin embargo, su coste y los requisitos de mantenimiento especializado los hacen menos prácticos para aplicaciones a menor escala. [36]

Estas características hacen que exista una gran variedad de tanques criogénicos que tienen diferentes ventajas y desventajas que permiten un mejor almacenamiento del hidrógeno. Entre estos tipos los más comunes son los tanques con camisa de vacío, los tanques de aislamiento multicapa y los microdepósitos.

Tanques con camisa de vacío

Los tanques con camisa de vacío son una clase de tanque criogénico que se utiliza habitualmente para el almacenamiento y transporte de líquidos criogénicos, en nuestro caso siendo el hidrógeno líquido. Estos tanques están diseñados por tres partes básicas: dos capas de metal, un recipiente interior que contiene el líquido criogénico y una cubierta exterior sellada al vacío para reducir la transferencia de calor.

El espacio de vacío entre el recipiente interior y la camisa exterior se crea eliminando las moléculas de aire del espacio entre las capas, lo que da lugar a un vacío casi perfecto. Este espacio reduce la transferencia de calor por conducción y convección, y por tanto minimiza la carga térmica sobre el líquido criogénico del interior del depósito, y es este efecto lo que ayuda a mantener la baja temperatura necesaria para que el hidrógeno líquido permanezca en estado líquido.

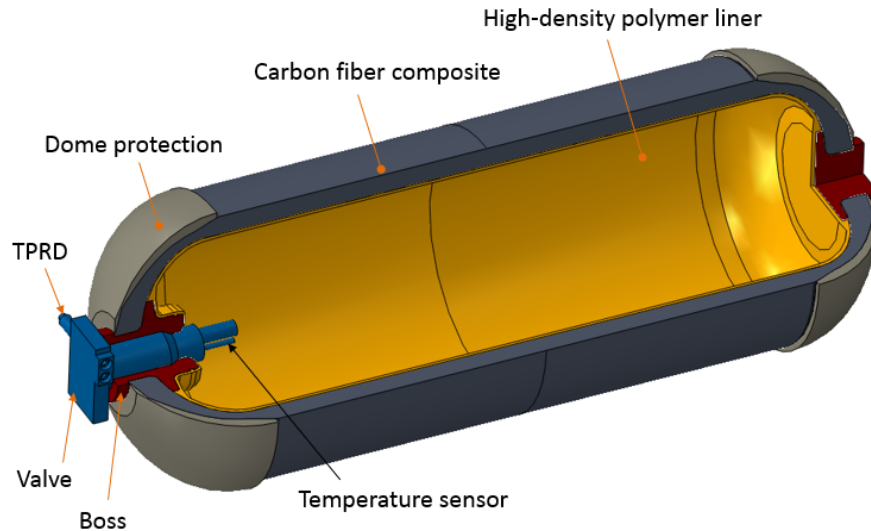


Figura 15: Componentes de un tanque de almacenamiento de hidrógeno presurizado (Camisa de vacío)
(<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage>)

Los depósitos con camisa de vacío se utilizan en diversas aplicaciones, como la exploración espacial, la investigación científica y los procesos industriales, para ello este tipo de tanques han sido diseñados para ofrecer varias ventajas, entre ellas el alto aislamiento térmico, la reducción de la ebullición y una mayor seguridad y rentabilidad.

En temas de aislamiento térmico, este existe para ayudar a reducir la transferencia de calor y mantener la temperatura lo suficientemente baja como para que el almacenamiento de líquidos criogénicos se mantenga seguro, lo cual también afecta a su habilidad de reducir de la transferencia de calor en los depósitos con camisa de vacío que a su vez se traduce en un menor índice de ebullición, lo que significa que se pierde menos líquido criogénico por evaporación. También, este tipo de tanque criogénico está diseñado con unas características de seguridad que evitan que el tanque se pueda romper o tener fugas en caso de accidente, lo cual hace que no solo aumente su seguridad sino también su rentabilidad y esto los hace tener un uso más común en varias industrias debido a su sencillez y fiabilidad.

Sin embargo, como es de esperar, los tanques con camisa de vacío también tienen algunas limitaciones, entre las que se incluyen el peso y tamaño, la capacidad limitada que tienen los tanques y la dificultad de su mantenimiento.

Con respecto al primero de estos problemas, peso y tamaño de los tanques, el espacio de vacío entre la capa interior y exterior del tanque aumenta el tamaño del tanque, haciendo que sea difícil de mantener y manejar, aparte del hecho de que los tanques requieren un mantenimiento regular para garantizar que se mantiene el espacio de vacío y que el aislamiento siga siendo eficaz. Por último, este tipo de tanques tienen una capacidad limitada y pueden no ser adecuados para aplicaciones que requieren grandes volúmenes de líquidos criogénicos.

En conclusión, los tanques con camisa de vacío son un componente esencial de los sistemas de almacenamiento y transporte de líquidos criogénicos, ya que pueden ofrecer un elevado aislamiento térmico, reducen la evaporación, aumentan la seguridad y son rentables, sin embargo, tienen limitaciones, como el peso y el tamaño, la capacidad limitada y los requisitos de mantenimiento, que los hacen poco rentables y peligrosos en diversas aplicaciones.[35][36][37]

Tanques de aislamiento multicapa

Los tanques de aislamiento multicapa (en adelante MLI: Multilayer Isolation) son un tipo de tanque de almacenamiento utilizado para el almacenamiento de fluidos criogénicos como nitrógeno, hidrógeno, helio y oxígeno líquidos. Debido a esto están diseñados para mantener las temperaturas extremadamente bajas necesarias para el almacenamiento de estos fluidos mediante el uso de múltiples capas de materiales aislantes de alto rendimiento.

El diseño de los tanques MLI consiste en varias capas de láminas metálicas reflectantes separadas por finas capas de material aislante, y estas láminas suelen ser de aluminio o acero inoxidable y están diseñadas para reflejar la radiación térmica emitida por el fluido criogénico. El material aislante utilizado en los tanques MLI suele ser un material de baja densidad, como la fibra de vidrio o el aerogel, que tiene una baja conductividad térmica y es capaz de atrapar moléculas de gas.

El uso de tanques MLI para el almacenamiento de fluidos criogénicos tiene varias ventajas sobre otros tipos de tanques, siendo una de las principales ventajas que los tanques MLI

tienen índices de fuga de calor muy bajos, lo que significa que pueden mantener las temperaturas extremadamente bajas necesarias para el almacenamiento de fluidos criogénicos durante largos periodos de tiempo sin necesidad de reponer constantemente el fluido criogénico. Esto los hace ideales para su uso en aplicaciones en las que es necesario almacenar el fluido criogénico durante largos periodos de tiempo, como en la exploración espacial o la investigación científica.

Otra ventaja de los tanques MLI es que son ligeros y pueden transportarse fácilmente, lo cual los hace atractivos para su uso en aplicaciones en las que es necesario transportar el tanque a diferentes lugares, como en el transporte de fluidos criogénicos para aplicaciones médicas o industriales.

En resumen, los tanques de aislamiento multicapa son un tipo especializado de depósito de almacenamiento utilizado para el almacenamiento de fluidos criogénicos y están diseñados para mantener temperaturas extremadamente bajas mediante el uso de capas de materiales aislantes de alto rendimiento, y presentan varias ventajas con respecto a otros tipos de tanques, como un bajo índice de fugas de calor y un diseño ligero.[38]

Microdepósitos

Los microdepósitos de hidrógeno son un tipo de sistema de almacenamiento diseñado para almacenar y transportar volúmenes pequeños o medianos de gas hidrógeno comprimido. Estos depósitos se utilizan habitualmente en diversas aplicaciones industriales y comerciales, como los vehículos de pila de combustible, el procesamiento de metales, la producción de vidrio y la fabricación de productos electrónicos.

El término "microdepósitos" hace referencia al tamaño del depósito, que suele ser de entre 450 y 6.000 litros, lo que los hace más grandes que las bombonas de gas comprimido tradicionales, pero más pequeños que los depósitos de almacenamiento tradicionales. Por ello, este tipo de tanques es excelente para aplicaciones que exigen un suministro fiable de hidrógeno, pero para las que no se requiere grandes volúmenes de gas.

Este tipo de tanque suele estar fabricado con materiales de alta resistencia, como el acero inoxidable, y están diseñados para soportar las altas presiones necesarias para almacenar gas hidrógeno comprimido, así como también están equipados con elementos de seguridad, como válvulas de alivio de presión y discos de ruptura, para evitar la sobrepresurización y posibles accidentes o problemas de seguridad.

Como es de esperar, este tipo de tanques tan pequeño trae consigo varias ventajas, una de ellas siendo su capacidad para proporcionar un suministro continuo de gas hidrógeno de gran pureza con unas necesidades de mantenimiento mínimas. De este modo, los depósitos pueden ser rellenados por un proveedor de hidrógeno gaseoso, lo que elimina la necesidad de cambiar frecuentemente las botellas o de realizar entregas continuas. Otra importante ventaja en comparación con otros tipos de tanques es que estos depósitos también ofrecen un ahorro de costes en comparación con los sistemas tradicionales de almacenamiento en botella, ya que requieren menos espacio para su almacenamiento y transporte, y el proceso de rellenado es más eficiente, lo que reduce el tiempo de inactividad y los costes de mano de obra.

En resumen, los microdepósitos de hidrógeno son una solución fiable y rentable para las necesidades de almacenamiento y transporte de hidrógeno gaseoso a pequeña y mediana escala. A medida que siga creciendo el uso del hidrógeno como fuente de combustible, se espera que aumente la demanda de microdepósitos, convirtiéndolos en un componente esencial de la cadena de suministro de hidrógeno.

Sin embargo, el mayor problema que presenta este método es que no puede almacenar grandes cantidades, lo cual impide su uso en centrales o industrias de tamaño mediano o grande. Este gran problema impide el uso de hidrógeno como almacenamiento de energía eléctrica para generar la suficiente electricidad como para alimentar las necesidades actuales.

[39]

5.2 ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO

En segundo lugar, tenemos el almacenamiento subterráneo, el cual es un método de almacenamiento de hidrógeno que consiste en inyectar el gas en formaciones geológicas como yacimientos de gas natural agotados, cavernas salinas o acuíferos. El almacenamiento subterráneo tiene la ventaja de ser rentable y relativamente seguro, ya que el hidrógeno puede almacenarse a bajas presiones y temperaturas.

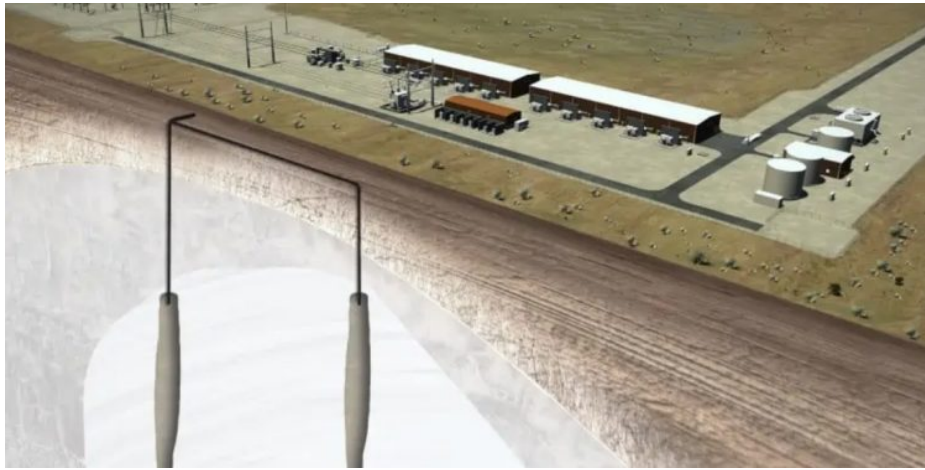


Figura 16: Electrolizadores en la superficie y cavernas para almacenar el hidrógeno que producen en el subsuelo (<https://h2businessnews.com/construyen-el-mayor-proyecto-de-almacenamiento-subterraneo-de-hidrogeno-del-mundo/>)

Una de las principales ventajas del almacenamiento subterráneo es que se pueden aprovechar infraestructuras ya existentes, como tuberías y pozos, que antes se utilizaban para el gas natural u otros hidrocarburos, y por consiguiente, se puede reducir significativamente el coste de construcción de nuevas instalaciones de almacenamiento e infraestructuras de transporte.

En los yacimientos de gas natural agotados, por ejemplo, se puede inyectar hidrógeno en el pozo agotado y almacenarlo en el depósito subterráneo, y esto es posible porque los yacimientos de gas natural suelen encontrarse a varios miles de metros de profundidad y están sellados por capas de roca impermeable que impiden la salida del gas, lo cual hace que

el hidrógeno puede inyectarse en el yacimiento y almacenarse del mismo modo que el gas natural.

En otro tipo de yacimientos como las cavernas de sal, el hidrógeno puede almacenarse en grandes cámaras subterráneas que se crean inyectando agua en un depósito de sal y bombeándola después hacia el exterior, dejando tras de sí una gran cavidad. En estas cavernas el hidrógeno puede inyectarse en la caverna y almacenarse a presiones relativamente bajas, normalmente entre 100 y 200 bares. Por último, existen otros yacimientos como los acuíferos, en los que el hidrógeno puede inyectarse en formaciones rocosas porosas saturadas de agua, ya que el hidrógeno desplaza el agua de la roca y se almacena del mismo modo que se almacenaba originalmente el gas natural.

Este tipo de almacenamiento tiene varias ventajas, entre ellas es que permite almacenar grandes cantidades de hidrógeno en un espacio relativamente pequeño, lo cual se debe a que el hidrógeno puede almacenarse a altas densidades cuando está comprimido o licuado, lo cual hace que el almacenamiento subterráneo sea una opción atractiva para aplicaciones a gran escala, como la generación de energía y el transporte. Otra ventaja del almacenamiento subterráneo es que es relativamente seguro, debido a que el hidrógeno puede almacenarse a bajas presiones y temperaturas, lo que reduce el riesgo de explosión o fuga, y, además, el almacenamiento subterráneo puede supervisarse y controlarse para garantizar que el hidrógeno almacenado permanezca seguro y protegido.

Sin embargo, el almacenamiento subterráneo también plantea algunos problemas, siendo el más evidente encontrar lugares adecuados para el almacenamiento. Las formaciones geológicas utilizadas para el almacenamiento subterráneo deben ser capaces de contener el hidrógeno de forma segura, sin riesgo de fugas o contaminación, por lo que es crítico llevar a cabo la realización de análisis y pruebas geológicas exhaustivas. Además, el almacenamiento subterráneo requiere importantes infraestructuras, como tuberías, pozos y equipos de control, lo que puede aumentar el coste de construcción y mantenimiento de las instalaciones de almacenamiento subterráneo.

Como conclusión de este tipo de almacenamiento, se puede decir que el almacenamiento subterráneo es un método prometedor para almacenar hidrógeno, sobre todo para aplicaciones a gran escala. Puede aprovechar la infraestructura existente y ofrecer una forma rentable y relativamente segura de almacenar hidrógeno, sin embargo, también requiere una planificación, un mantenimiento y una supervisión cuidadosas para garantizar la seguridad del hidrógeno almacenado.[35] [40]

5.3 ALMACENAMIENTO EN FORMA DE AMONÍACO O METANOL

Finalmente, el tercer método es el almacenamiento de hidrógeno en forma de amoníaco o metanol. Para comenzar, el amoníaco (NH_3) es un gas incoloro con un característico olor acre, que se utiliza mucho como fertilizante, pero que también puede emplearse como portador de hidrógeno. El amoníaco tiene un alto contenido de hidrógeno (17,6% en peso) y puede licuarse fácilmente a presión y temperatura moderadas, lo que lo convierte en una opción atractiva para el almacenamiento y transporte de hidrógeno. Además, el amoníaco ya se produce y transporta ampliamente en todo el mundo, por lo que su infraestructura ya existe, lo cual reduce la necesidad de investigación e inversión en infraestructura.

Uno de los principales retos que plantea el uso del amoníaco como portador de hidrógeno es su toxicidad e inflamabilidad, esto debido a que el amoníaco puede ser peligroso de manipular y transportar, por lo que se requieren medidas de seguridad especiales. Además, el proceso de síntesis del amoníaco consume mucha energía y requiere altas temperaturas y presiones, lo que puede contrarrestar las ventajas de su uso como portador de hidrógeno.

Para resolver estos problemas, los investigadores están estudiando el uso de materiales en estado sólido para almacenar y liberar amoníaco como portador de hidrógeno: por ejemplo, las amidas y los hidruros metálicos pueden utilizarse como materiales reversibles de almacenamiento de amoníaco. Estos materiales pueden adsorber el amoníaco a bajas temperaturas y liberarlo a temperaturas más altas, lo cual permite utilizar el amoníaco como portador de hidrógeno en una pila de combustible.

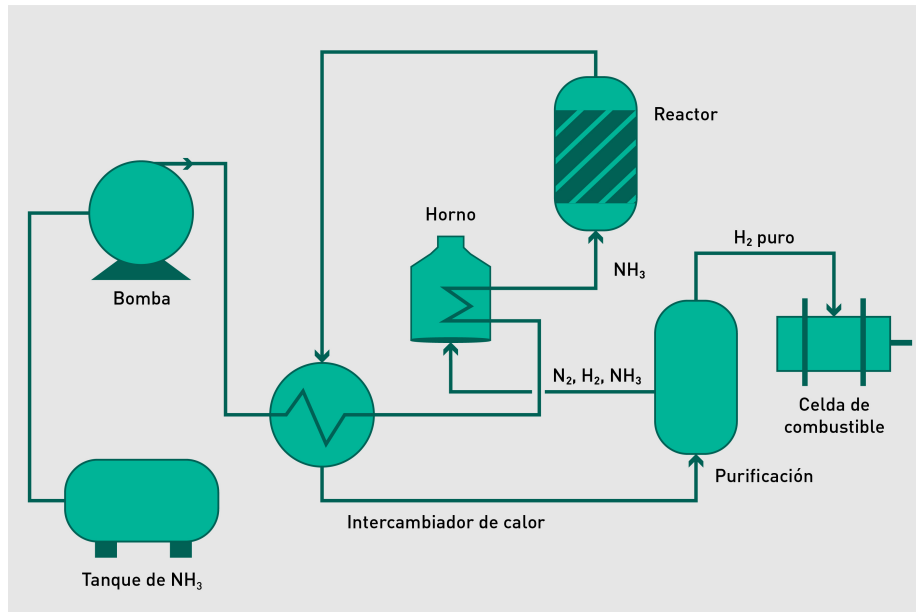


Figura 17: Proceso de transformación y almacenamiento del amoníaco en hidrógeno puro.

(<https://www.flexim.com/es/hydrogen-flowmeters-assisting-energy-transition/ammonia-hydrogen-carrier>)

El metanol (CH_3OH) es otro posible portador de hidrógeno: el metanol es un líquido incoloro con un olor suave y dulce y que tiene un alto contenido en hidrógeno (12,6% en peso) y puede almacenarse y transportarse fácilmente como líquido a temperatura y presión ambiente. El metanol también puede convertirse fácilmente en hidrógeno mediante un reformador, lo que lo convierte en una opción atractiva para el almacenamiento y el transporte de hidrógeno.

Una de las principales ventajas de utilizar metanol como portador de hidrógeno es su alta densidad energética, ya que el metanol tiene una densidad energética mucho mayor que el hidrógeno gaseoso, lo que lo convierte en una forma más eficiente de almacenar y transportar energía. Además, el metanol ya se utiliza ampliamente como combustible y materia prima química, por lo que su infraestructura ya existe, sin embargo, el uso del metanol como portador de hidrógeno también plantea algunos problemas. El metanol es tóxico e inflamable, por lo que requiere medidas de seguridad especiales y el metanol también requiere un reformador para convertirlo en hidrógeno, lo que añade complejidad y coste al sistema. [35][39][41]

6 SISTEMAS DE TRANSPORTE

El hidrógeno tiene unas características únicas que dificultan su transporte y almacenamiento, debido principalmente a que es un gas incoloro, inodoro y altamente inflamable que tiene una baja densidad y requiere infraestructuras y equipos especiales para su transporte. Por ello, existe una gran variedad de métodos y sistemas de transporte de hidrógeno, y estos a su vez tienen una alta gama de diferentes grados de seguridad y eficiencia.

Alguno de estos métodos tiene similitudes con los métodos de almacenamiento previamente explicados, o incluso son los mismos ya que varias de las tecnologías de transporte también pueden ser usadas como sistemas de almacenamiento ya que es necesario almacenar el hidrógeno para que pueda ser transportado. La principal diferencia es que mientras que los métodos de almacenamiento deben tener medidas de seguridad y ser lo suficientemente grandes como para manejar grandes cantidades de hidrógeno, los métodos de transporte pueden manejar cantidades mucho más pequeñas y deben centrarse en medidas de seguridad para transportar hidrógeno en movimiento. [42]

6.1 *HIDRÓGENO GASEOSO COMPRIMIDO*

El uso de gas de hidrógeno comprimido (en adelante CHG: Compressed Hydrogen Gas) es uno de los métodos más comunes de transporte de hidrógeno, ya que el hidrógeno es un gas a temperaturas y presiones estándar, por lo que se requieren altas presiones y bajas temperaturas para un almacenamiento y transporte eficientes. El sistema de almacenamiento y transporte de CHG comprime el gas hidrógeno en un volumen más pequeño, lo que hace que el transporte y el almacenamiento sean más fáciles y convenientes.

El sistema de almacenamiento de CHG usa tanques de alta presión para almacenar gas hidrógeno a presiones típicamente entre 350 y 700 bar (5000 a 10 000 psi) y para llegar a estas presiones los depósitos suelen estar hechos de acero de alta resistencia o materiales compuestos y están diseñados para soportar las altas presiones requeridas para el

almacenamiento de hidrógeno. Estos tanques son livianos y duraderos, lo que lo hace adecuado para su uso en vehículos y otras aplicaciones móviles.

Una de las ventajas del uso de CHG es que es una tecnología madura respaldada por años de investigación y desarrollo, porque los tanques de CHG se utilizan en diversas aplicaciones, como en vehículos de celdas de combustible y sistemas estacionarios de generación de energía, y tienen un historial comprobado de excelente seguridad y confiabilidad. Otra ventaja del almacenamiento de CHG es su costo relativamente bajo en comparación con otros métodos de almacenamiento de hidrógeno, como el hidrógeno líquido, criogénico o los hidruros metálicos. El costo de los tanques de almacenamiento de CHG se ha reducido significativamente a lo largo de los años, lo que los convierte en una opción atractiva para muchas aplicaciones.

Sin embargo, el almacenamiento de CHG también tiene algunos inconvenientes, siendo el más evidente la energía requerida para comprimir gas hidrógeno. La compresión requiere una gran cantidad de energía y puede aumentar el costo total de producción y el transporte de hidrógeno y además, el gas hidrógeno comprimido tiene una densidad energética menor que otros combustibles como la gasolina y el diésel, por lo que se requieren tanques de almacenamiento más grandes para lograr el mismo rango que los combustibles convencionales.

Otro desafío con el almacenamiento de CHG es el cuidado que hay que tener tanto en su manipulación como en su transporte, ya que el hidrógeno es un gas altamente inflamable y cualquier fuga o accidente en un tanque de CHG es peligroso. Como tal, los depósitos de almacenamiento de CHG deben diseñarse y mantenerse para garantizar un funcionamiento seguro, por lo que existen regulaciones para garantizar el transporte seguro de hidrógeno.

A pesar de estos desafíos, CHG sigue siendo una opción popular para el transporte de hidrógeno, es una tecnología madura con seguridad y confiabilidad comprobadas, y su coste es relativamente bajo en comparación con otros métodos de almacenamiento de hidrógeno. A medida que evolucionan la producción y la infraestructura de hidrógeno, el

almacenamiento de CHG puede desempeñar un papel importante en la adopción generalizada del hidrógeno como fuente de energía limpia.[43][44]

6.2 *HIDRÓGENO LÍQUIDO*

El hidrógeno líquido (en adelante LH2) es uno de los métodos más utilizados para transportar grandes cantidades de hidrógeno a largas distancias. Este proceso consiste en enfriar el hidrógeno gaseoso a una temperatura criogénica de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, momento en el que se vuelve líquido, y debido a que el hidrógeno líquido es solo 1/700 parte del volumen del gas lo convierte en un medio de transporte muy eficiente.

El LH2 tiene varias ventajas como medio de transporte, para comenzar, es un combustible denso en energía que es relativamente barato de almacenar y transportar, especialmente para el transporte de larga distancia a gran escala. Esto es especialmente atractivo para aplicaciones como la alimentación de vehículos con pilas de combustible, donde es necesario transportar grandes cantidades de hidrógeno a las estaciones de servicio. En segundo lugar, el LH2 es una forma muy pura de hidrógeno, con un alto contenido energético y pocas impurezas. Esto lo hace particularmente adecuado para su utilización en celdas de combustible que requieren una fuente de combustible de alta calidad para una generación de energía eficiente.

Sin embargo, usar LH2 como modo de transporte también presenta algunos desafíos importantes, siendo una de las principales razones el alto coste de fabricación y mantenimiento de los depósitos criogénicos necesarios para almacenar y transportar hidrógeno. Estos contenedores deben estar especialmente diseñados para soportar temperaturas extremas, por lo que su fabricación y mantenimiento pueden ser extremadamente costosos. Estos costes son sobre todo importantes en el proceso de conversión de hidrógeno en hidrógeno líquido, ya que este coste depende de varios factores, como la escala de producción y los métodos utilizados. La producción de hidrógeno líquido implica comprimir y enfriar el hidrógeno gaseoso a temperaturas extremadamente bajas y

este proceso requiere grandes cantidades de energía y sistemas de refrigeración especializados, lo que aumenta los costes.

Otra preocupación es la posibilidad de que el hidrógeno se evapore durante el transporte, especialmente si el contenedor o el sistema de tuberías utilizado para el transporte tiene fugas, lo que puede causar que la evaporación provoque la pérdida de combustible y esto puede suponer un peligro para la seguridad, ya que el hidrógeno gaseoso es muy inflamable y puede formar mezclas explosivas con el aire si se manipula de forma inadecuada.

Finalmente, existen ciertos problemas de seguridad que generan preocupaciones al manipular hidrógeno líquido, especialmente al pasar por áreas densamente pobladas. El hidrógeno líquido es un líquido criogénico y puede causar quemaduras graves y congelación si entra en contacto con la piel u otros materiales, aparte de que también es muy inflamable y puede representar un peligro grave en caso de accidente, como un derrame.

A pesar de estas dificultades, LH2 sigue siendo un método de transporte de hidrógeno prometedor para una variedad de aplicaciones, ya que, con investigación y desarrollo continuos, la industria continuará encontrando formas de hacer que el transporte de LH2 sea más eficiente, económico y seguro en los años venideros. [45][46]

6.3 *HIDRUROS METÁLICOS*

Los hidruros metálicos son una clase de materiales que se han estudiado ampliamente por su capacidad para almacenar y transportar hidrógeno gaseoso. Estos materiales consisten en una matriz metálica que puede absorber hidrógeno en su estructura de red y formar enlaces metal-hidrógeno, y este tipo de hidruros representan una alternativa para la retención de hidrógeno en estado sólido, sin requerir altas presiones y su viabilidad de almacenar hidrógeno a baja presión se sustenta en la unión química de las moléculas de hidrógeno en la matriz del compuesto metálico. Se ha demostrado que los hidruros metálicos tienen muchas ventajas como materiales de almacenamiento y transporte de hidrógeno, como alta densidad de almacenamiento de hidrógeno, baja inflamabilidad y excelente estabilidad

térmica, ya que las densidades aparentes de los hidruros metálicos oscilan entre el 1 y el 2 % en peso para algunos intermetálicos y entre el 18 y el 20 % en peso para los hidruros metálicos complejos.

Una de las principales ventajas de los hidruros metálicos como medio de transporte de hidrógeno es su alta densidad de almacenamiento, ya que los hidruros metálicos tienen la capacidad de retener hidrógeno a densidades superiores a las del hidrógeno líquido o gaseoso comprimido. Esto se debe a que el hidrógeno se aloja en la estructura entrelazada de la matriz metálica, en contraste con su almacenamiento en una fase líquida o gaseosa independiente.

Otra ventaja de los hidruros metálicos es su baja inflamabilidad, ya que, a diferencia del hidrógeno gaseoso comprimido o el hidrógeno líquido, los hidruros metálicos no presentan un peligro significativo de incendio o explosión, debido a que esta inflamabilidad está relacionada principalmente con la liberación de hidrógeno almacenado y su capacidad de reaccionar con el oxígeno presente en el aire.

Los hidruros metálicos también exhiben una buena estabilidad térmica, un factor importante en el almacenamiento y transporte de hidrógeno, debido principalmente a que los enlaces metal-hidrógeno en los hidruros metálicos son relativamente fuertes y no se rompen fácilmente por los cambios de temperatura y presión. Esto significa que los hidruros metálicos se pueden usar en una amplia gama de condiciones ambientales y no son tan sensibles a los cambios de temperatura y presión como el hidrógeno gaseoso comprimido o el hidrógeno líquido.

Tal como existen diferentes tipos de tanques, existen varios tipos de hidruros metálicos que se han investigado para su uso en el almacenamiento y transporte de hidrógeno, siendo uno de los tipos más estudiados los hidruros metálicos complejos, que consisten en un catión metálico y un anión complejo. Estos materiales tienen grandes capacidades de almacenamiento de hidrógeno y pueden diseñarse para exhibir una velocidad rápida de absorción y liberación de hidrógeno.

Los intermetálicos son otra clase de hidruros metálicos que se han estudiado para el almacenamiento y transporte de hidrógeno: estos materiales están formados por dos o más metales que forman una estructura de red cristalina, y pueden exhibir grandes capacidades de almacenamiento de hidrógeno y pueden diseñarse para exhibir tasas rápidas de absorción y liberación de hidrógeno.

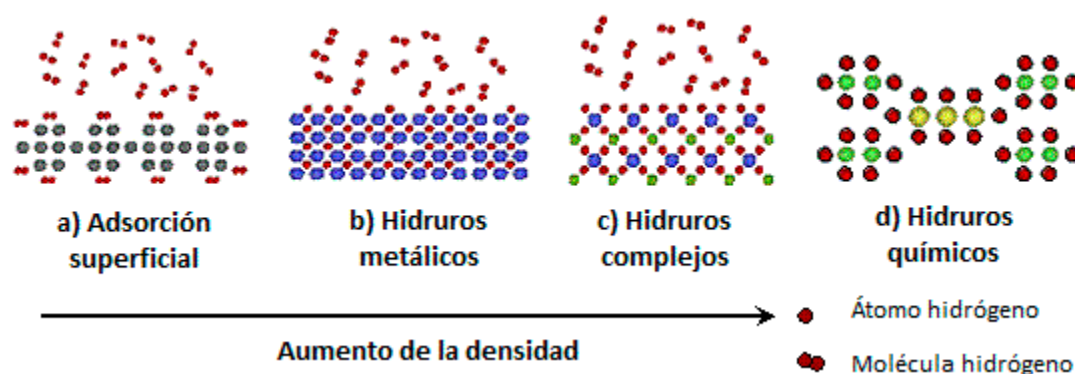


Figura 18: Distintas formas de almacenar hidrógeno en materiales
<https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/>

La absorción de hidrógeno en los hidruros metálicos ocurre cuando los átomos de hidrógeno se incorporan en la estructura cristalina del material, y este evento se logra mediante una reacción química en la cual los átomos de hidrógeno se combinan con los átomos de metal en el material, formando enlaces químicos fuertes, mientras que la liberación de hidrógeno ocurre cuando se proporciona energía al hidruro metálico. Esto puede lograrse mediante calentamiento, aplicación de presión o mediante reacciones químicas, y es durante este proceso que el hidruro metálico experimenta una contracción de volumen a medida que se libera el hidrógeno de su estructura.[35][47]

Recientemente se ha comenzado la investigación de las estructuras organometálicas (en adelante MOF: Metal-Organic Frameworks) que son una clase relativamente nueva de hidruros metálicos que se muestran prometedores para el almacenamiento y transporte de hidrógeno. Compuestos de iones metálicos y ligandos orgánicos, los MOF tienen grandes áreas de superficie y tamaños de poro ajustables, lo cual los hace ideales para el

almacenamiento y transporte de hidrógeno gaseoso y pueden diseñarse para altas capacidades de almacenamiento y rápidas tasas de absorción y liberación. [48]

Por todo esto es que los hidruros metálicos tienen muchas ventajas como medio de transporte de hidrógeno gaseoso, principalmente debido a que tienen altas densidades de almacenamiento, baja inflamabilidad, buena estabilidad térmica y pueden diseñarse para tasas rápidas de absorción y liberación de hidrógeno, sin embargo, el coste de los hidruros metálicos como sistema de almacenamiento de hidrógeno es la mayor barrera para su adopción a gran escala. A medida que avanza la investigación sobre estos materiales, los hidruros metálicos desempeñarán un papel cada vez más importante en el almacenamiento y transporte de hidrógeno gaseoso en el futuro.

6.4 GASODUCTOS

Los gasoductos son uno de los métodos más utilizados para el transporte de gases y líquidos como el gas natural, el petróleo crudo y los productos refinados del petróleo, y en nuestro caso, el hidrógeno, en cuyo caso pasan a denominarse hidroductos. Debido a la creciente demanda de fuentes de energía limpias y renovables en los últimos años, existe un interés creciente en el uso de tuberías como método de transporte de hidrógeno gaseoso, sin embargo, el transporte de hidrógeno a través de gasoductos presenta muchos desafíos técnicos y logísticos.

Por un lado, el hidrógeno es una pequeña molécula que puede escapar incluso de un pequeño bache en una tubería, esto significa que el tubo debe estar diseñado para ser altamente resistente a la fragilización por hidrógeno y al agrietamiento inducido por hidrógeno. Además, el hidrógeno puede reaccionar con algunos materiales, como determinados tipos de acero, causando corrosión y mayor fragilización.

Para mitigar estos riesgos, las líneas de transporte de hidrógeno deben construirse con materiales que sean resistentes a la fragilización y la corrosión, por ello normalmente los materiales que se han utilizado en la construcción de tuberías de hidrógeno incluyen acero

de alta resistencia, aluminio y compuestos. Además, las tuberías deben inspeccionarse y mantenerse cuidadosamente para garantizar que no tengan defectos y que el hidrógeno gaseoso pueda transportarse de manera segura.

Otro desafío con las tuberías de hidrógeno es que el gas de hidrógeno a menudo se transporta a presiones mucho más altas que el gas natural y que los productos derivados del petróleo, lo cual se debe a que la densidad del hidrógeno gaseoso es mucho más baja que la de otros gases. Eso significa que debe comprimirse a una presión más alta para lograr la misma densidad de energía que otros combustibles, por consiguiente, requiere que las tuberías estén diseñadas para soportar altas presiones, lo que puede aumentar el coste y la complejidad de la construcción, y la necesidad de inspecciones y mejores medidas de seguridad.

Sin embargo, el uso de estos hidroductos incluye varias ventajas, siendo una potencial de usar tuberías para transportar hidrógeno es que puede utilizarse para transportar grandes cantidades de gas a largas distancias. Esto es particularmente ventajoso cuando se transporta hidrógeno desde sitios de producción remotos, como plantas de energía renovable a áreas urbanas donde se puede emplear para vehículos de pilas de combustible y otras aplicaciones.

Aparte de los desafíos técnicos del transporte de hidrógeno a través de tuberías, también existen los desafíos logísticos asociados con la producción y distribución de hidrógeno gaseoso. El hidrógeno gaseoso generalmente se obtiene a partir de combustibles fósiles o por electrólisis, y estos procesos como ya se han explicado son costosos y consumen mucha energía. Además, en la actualidad, las instalaciones de producción de hidrógeno y las redes de distribución son limitadas y puede resultar difícil transportar hidrógeno gaseoso a zonas alejadas de las instalaciones de producción.

A pesar de estas dificultades, existe un interés creciente en los métodos de transporte de gas hidrógeno mediante tuberías, y debido a este interés los gasoductos de hidrógeno podrían desempeñar un papel cada vez más importante en el transporte de gas hidrógeno en el futuro a medida que la demanda de fuentes de energía limpias y renovables siga creciendo.[49]

6.5 PORTADORES DE HIDRÓGENO ORGÁNICO LÍQUIDO

Los portadores de hidrógeno orgánico líquido (en adelante LOHC: Liquid Organic Hydrogen Carrier) constituyen una tipología de medios de almacenamiento y transporte de hidrógeno que han recibido un interés creciente en los últimos años, principalmente debido a que el LOHC es un compuesto orgánico que puede secuestrar y liberar hidrógeno gaseoso de manera reversible, lo que permite transportarlo de manera segura y eficiente sin necesidad de almacenarlo a alta presión.

El concepto básico de LOHC es el uso de moléculas transportadoras líquidas que pueden tomar hidrógeno gaseoso y liberarlo según se requiera en condiciones relativamente suaves (normalmente a baja temperatura y presión). Las moléculas de soporte se pueden regenerar eliminando el hidrógeno, generalmente usando un catalizador y calor, y dado que este proceso se puede repetir muchas veces, la molécula portadora se puede usar varias veces para almacenar y transportar hidrógeno.

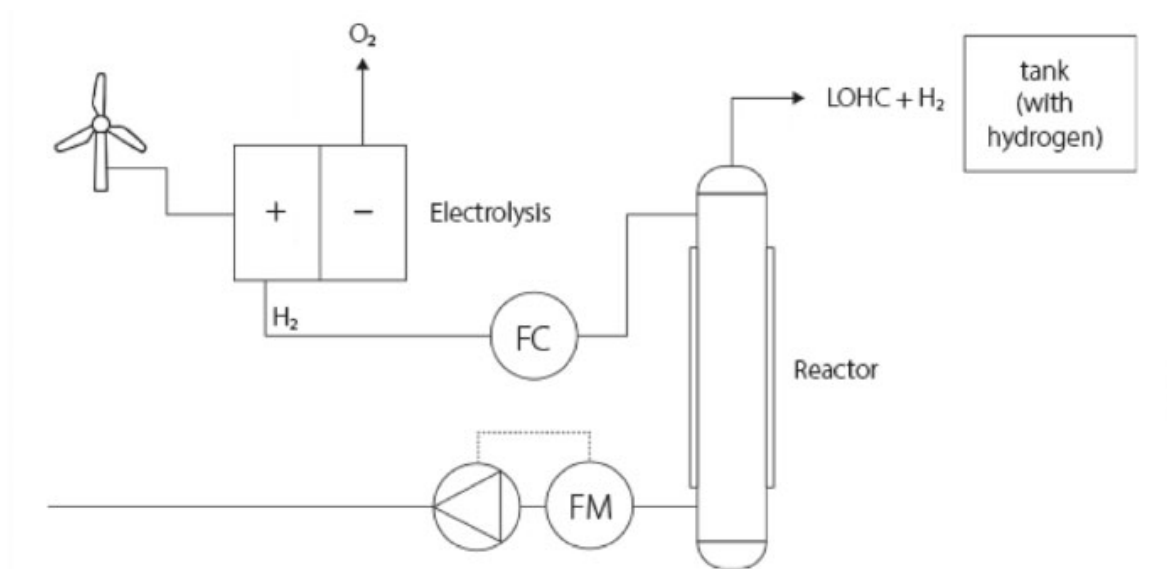


Figura 19: Diagrama de flujo: para almacenar hidrógeno en el tanque para su transporte (proceso de carga) <https://mecotech.it/es/almacenamiento-de-hidr%C3%B3geno-en-portadores-de-hidr%C3%B3geno-org%C3%A1nico-l%C3%ADquido-lohc/>

Una de las principales ventajas de LOHC como método de transporte de hidrógeno es que puede transportarse utilizando la infraestructura existente, como tuberías y camiones cisterna, sin necesidad de equipos o instalaciones especiales. Esto convierte a LOHC en una opción potencialmente atractiva para el transporte de hidrógeno a gran escala desde sitios de producción remotos hasta áreas donde se puede utilizar con fines energéticos o industriales.

Otra ventaja de LOHC es que también se puede utilizar como medio de almacenamiento de hidrógeno, por lo que se puede almacenar de forma segura y eficiente sin tanques de alta presión. Esto ayuda a abordar algunos de los desafíos técnicos y logísticos asociados con el despliegue a gran escala de vehículos con celdas de combustible de hidrógeno y otras aplicaciones.

Para solucionar los desafíos del transporte de hidrógeno, se han desarrollado y estudiado varios tipos diferentes de LOHC, incluidos varios tipos de hidrocarburos, compuestos que contienen nitrógeno y otras moléculas orgánicas. Debido a esta amplia gama de LOHC, la elección del LOHC dependerá de una serie de factores, como la estabilidad, la capacidad de almacenamiento de hidrógeno y otras propiedades de la molécula.

Sin embargo, el empleo de LOHC como método de transporte y almacenamiento de hidrógeno también plantea algunos problemas, siendo uno de los principales retos es que la capacidad de almacenamiento de hidrógeno de las LOHC puede ser relativamente baja, lo que significa que pueden ser necesarias grandes cantidades de moléculas portadoras para transportar cantidades significativas de hidrógeno.

Como resumen, los LOHC representan un enfoque prometedor para el transporte y almacenamiento de hidrógeno, ya que ofrecen la posibilidad de transportar hidrógeno de forma segura, eficiente y rentable para una serie de aplicaciones energéticas e industriales. Es probable que la investigación y el desarrollo en curso en este campo conduzcan a nuevas mejoras en el rendimiento y la eficiencia de los LOHC como método de transporte de hidrógeno en los próximos años, claro está, si el hidrógeno evoluciona lo suficiente al mismo tiempo que los LOHC.[50]

7 CASOS DE USO

Existe una gran variedad de casos de uso del hidrógeno como vector para el almacenamiento de energía eléctrica, entre ellos los más discutidos y sobre los que más investigación se ha desarrollado son: el uso de pilas de combustible de hidrógeno, el equilibrio de redes eléctricas, la energía de reserva y como ayuda en el proceso de descarbonización.

7.1 PILAS DE COMBUSTIBLE

Las pilas de combustible de hidrógeno son un tipo de tecnología energética limpia que produce electricidad a partir de gas hidrógeno y oxígeno siguiendo los principios de la electrólisis: las pilas de combustible funcionan combinando hidrógeno y oxígeno en una reacción electroquímica que genera electricidad, agua y calor. Esta energía producida por las pilas de combustible de hidrógeno puede utilizarse para alimentar diversas aplicaciones, desde vehículos hasta viviendas y edificios.

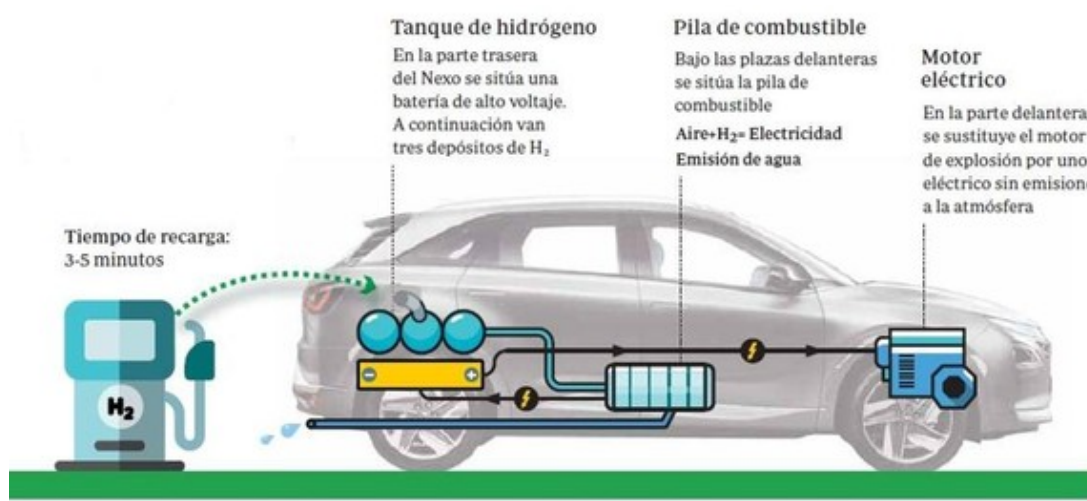


Figura 20: Coche con pila de combustible (https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-desmontando-mitos-sobre-coche-hidrogeno-201905060136_noticia.html)

Una de las principales ventajas de las pilas de combustible de hidrógeno es que son una fuente de energía limpia y eficiente: cuando el hidrógeno se utiliza como combustible, sólo produce agua y calor como subproductos, lo que lo convierte en una alternativa atractiva a los combustibles fósiles. Sin embargo, las pilas de combustible de hidrógeno no son muy eficientes, sobre todo en comparación con coches eléctricos actuales, ya que, pese a que convierten hacia el 60% de la energía contenida en el hidrógeno en electricidad utilizable, frente al 20-25% de eficiencia de un motor de gasolina tradicional, no son comparables a la mejor eficiencia que tienen los coches eléctricos.

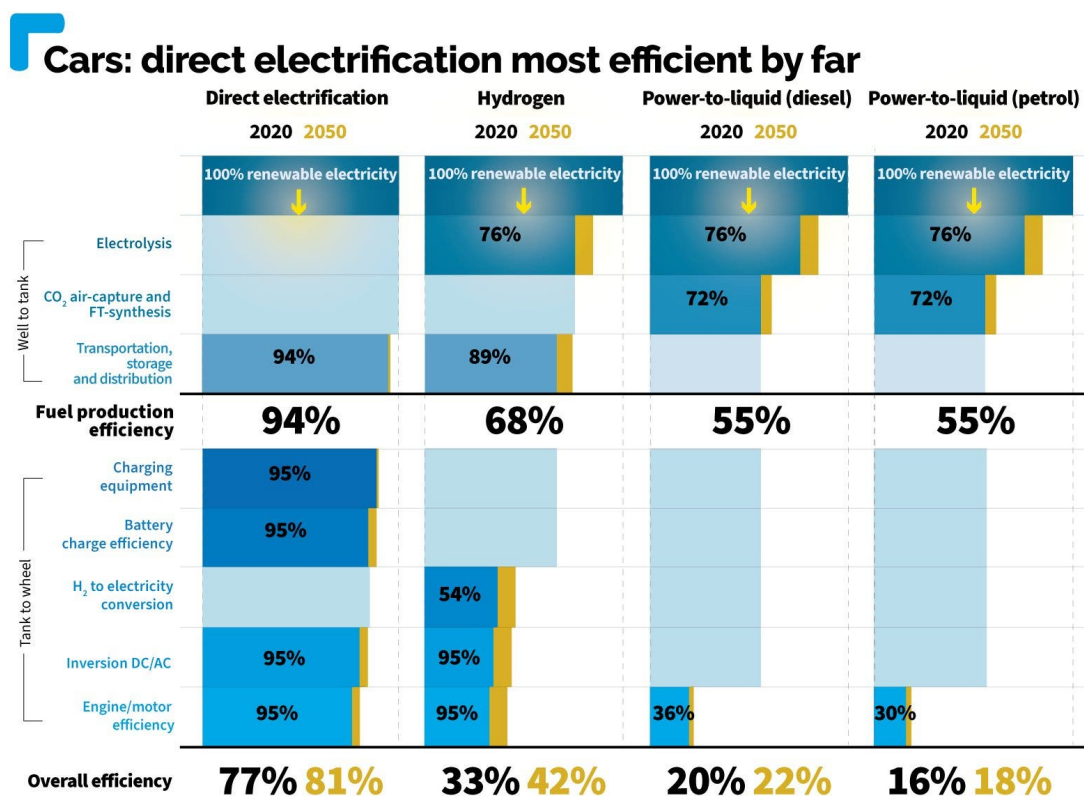


Tabla 2: Eficiencia de coches eléctricos y con pila de combustible

(<https://cleantechnica.com/2021/02/01/chart-why-battery-electric-vehicles-beat-hydrogen-electric-vehicles-without-breaking-a-sweat/>)

Las pilas de combustible de hidrógeno también ofrecen otras ventajas: por ejemplo, pueden repostar rápidamente, como un vehículo de gasolina tradicional, y recorrer distancias más largas que los vehículos eléctricos alimentados por baterías, además, el hidrógeno puede

producirse a partir de diversas fuentes, como el gas natural, la biomasa y el agua, lo que lo convierte en una fuente de energía versátil y flexible. A pesar de estas ventajas, las pilas de combustible de hidrógeno siguen enfrentándose a varios retos que limitan su adopción generalizada. Uno de los mayores siendo la falta de infraestructuras para producir, almacenar y distribuir hidrógeno combustible, debido a que, en la actualidad, existen relativamente pocas estaciones de servicio de hidrógeno, lo que dificulta la compra de vehículos de este tipo por parte de los consumidores. Además, la producción de hidrógeno puede ser muy cara y existen dudas sobre la seguridad de su manipulación y almacenamiento, por lo que otra clara desventaja es la baja eficiencia de las pilas de combustible en comparación con otros tipos de baterías y vehículos. [51][52][53]. En la imagen proporcionada a continuación, se puede observar una comparación entre dos vehículos, uno eléctrico y otro de hidrógeno, y cómo se compara la eficiencia total del vehículo y la infraestructura que ya ha sido construida para recargar cada vehículo. En esta comparación realizada por EVSE Australia, se observa el porqué de la inversión en pilas de combustible de hidrógeno es tan complicada y poco rentable: el coste para que la adopción de esta tecnología sea mundialmente aceptada es demasiado alto en comparación con simplemente invertir en otras tecnologías. [54]

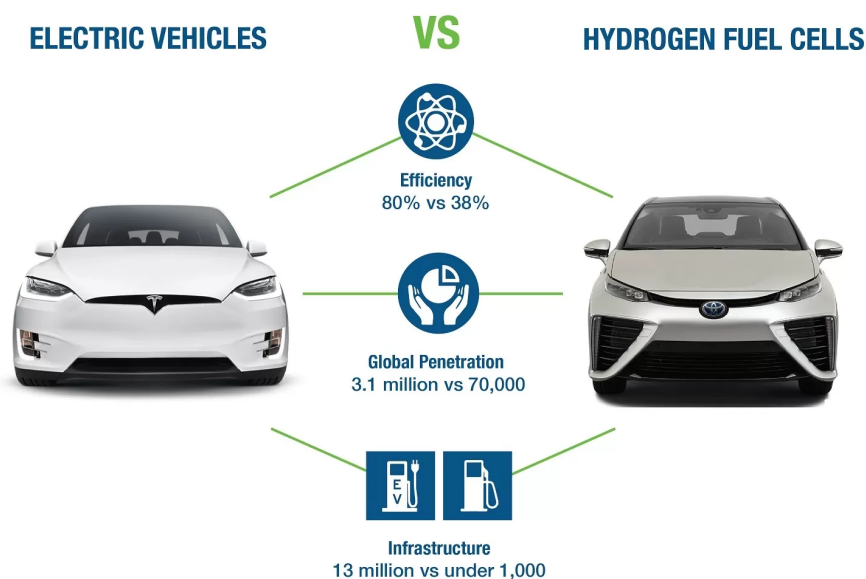


Figura 21: Comparación entre un coche eléctrico y un coche con pila de combustible
(<https://evse.com.au/blog/three-reasons-why-hydrogen-fuel-cells-wont-be-driving-our-future-mobility/>)

Por todas estas razones las pilas de combustible de hidrógeno constituyen una prometedora tecnología de energía limpia que ofrece muchas ventajas sobre los combustibles fósiles tradicionales. Sin embargo, aunque todavía quedan retos por resolver, la investigación y el desarrollo en curso están contribuyendo al avance de la tecnología y a hacerla más accesible a los consumidores.

7.2 EQUILIBRIO DE RED ELÉCTRICA

El hidrógeno también puede utilizarse como medio de almacenamiento de energía para ayudar a equilibrar la red eléctrica, lo que implica almacenar el exceso de energía durante los periodos de baja demanda y liberarla durante los de alta demanda para ayudar a equilibrar la red. En este caso, el hidrógeno se genera utilizando el exceso de electricidad durante las horas valle y se almacena en tanques o cavernas subterráneas, y cuando la demanda de electricidad es alta, el hidrógeno almacenado se convierte de nuevo en electricidad mediante pilas de combustible o motores de combustión. Este uso ha sido idealizado para funcionar en proyectos como el proyecto Prometeo, un proyecto liderado por Italia, España, Países Bajos y Suiza que propone un sistema innovador basado en la electrólisis de alta temperatura para la producción de hidrógeno verde y la estabilización de redes eléctricas. [57]

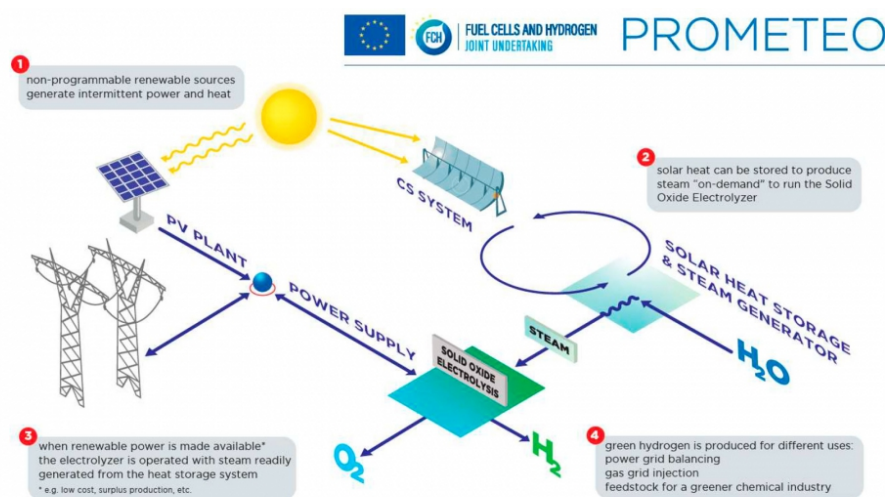


Figura 22: Proyecto Prometeo (<https://www.interempresas.net/Energia/Articulos/346548-Proyecto-PROMETEO-hidrogeno-verde-partir-del-agua-sol-para-industria-cero-emisiones.html>)

El uso de hidrógeno para equilibrar la red eléctrica tiene varias ventajas, siendo las más importantes la estabilidad y fiabilidad de la red, el ahorro de costes, la flexibilidad, la escalabilidad y el hecho de que existen cero emisiones en el almacenamiento de hidrógeno.

Hablando en temas de mejora de estabilidad y fiabilidad de la red, se puede exponer que, al almacenar el exceso de energía en forma de hidrógeno, la red puede gestionar mejor las fluctuaciones de la oferta y la demanda, lo que puede ayudar a evitar apagones y caídas de tensión. Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno también pueden ayudar a reducir los costes asociados a los periodos de máxima demanda, ya que, durante los periodos de mayor demanda, los precios de la energía pueden aumentar significativamente, pero al almacenar el exceso de energía durante los periodos de menor demanda, los proveedores de energía pueden reducir su dependencia de las costosas fuentes de generación de energía en los picos de demanda.

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno también ofrecen un alto grado de flexibilidad en términos de suministro y demanda de energía, debido a que el hidrógeno puede generarse utilizando el excedente de electricidad de cualquier fuente, incluidas las fuentes de energía renovables como la eólica y la solar. En otras palabras, los sistemas de almacenamiento de hidrógeno pueden utilizarse para equilibrar la red sin depender de los combustibles fósiles, ya que, además, son altamente escalables, lo que significa que pueden utilizarse para almacenar grandes cantidades de energía durante largos periodos de tiempo, lo cual es especialmente útil en situaciones en las que la demanda de energía es impredecible, como en zonas propensas a fenómenos meteorológicos extremos.

Por último, cuando el hidrógeno se convierte de nuevo en electricidad mediante pilas de combustible o motores de combustión, el único subproducto es el agua, y en consecuencia los sistemas de almacenamiento de hidrógeno han pasado a ser una opción atractiva para los proveedores de energía que buscan reducir su huella de carbono.

Sin embargo, el uso del hidrógeno para equilibrar la red eléctrica también plantea algunos problemas, entre los cuales figuran los siguientes: la infraestructura, el coste total de la red y los problemas de seguridad que pueden suceder cuando se usa hidrógeno de esta manera.

La infraestructura necesaria para el almacenamiento y la distribución de hidrógeno aún no está ampliamente disponible, lo que supone un obstáculo importante para la adopción generalizada de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno para equilibrar la red eléctrica. Esta infraestructura incluye la construcción de instalaciones de almacenamiento de hidrógeno y tuberías, así como el desarrollo de pilas de combustible de hidrógeno y motores de combustión, y de hidrogeneras, las cuales en España no hay más de 11 activas.[58]

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno también pueden tener un coste elevado de construcción y de operación, lo que limita su adopción por parte de los proveedores de energía. Sin embargo, a medida que avance la tecnología y aumente la producción, se espera que disminuya el coste del almacenamiento de hidrógeno, aunque la cantidad de tiempo para que este cambio de precios aparezca aún no es más que especulación. Además, no debemos olvidar que el hidrógeno es un gas altamente inflamable, por lo que su almacenamiento y transporte requieren estrictas medidas de seguridad, entre las que se incluye el uso de tanques y tuberías de almacenamiento especializados, así como el desarrollo de protocolos de seguridad para el funcionamiento de las instalaciones de almacenamiento de hidrógeno, como sensores e inspecciones regulares.

A pesar de estos retos, el uso de hidrógeno para equilibrar la red eléctrica ofrece una solución prometedora para los proveedores de energía que buscan mejorar la estabilidad y fiabilidad de la red, reduciendo al mismo tiempo su huella de carbono. A medida que la tecnología avance y la producción aumente, se espera que el coste del almacenamiento de hidrógeno disminuya, lo que hará que los sistemas de almacenamiento de hidrógeno sean más accesibles para los proveedores de energía. Con una inversión continua en investigación y desarrollo, los sistemas de almacenamiento de hidrógeno pueden desempeñar un papel importante en la transición hacia un sistema energético más limpio y sostenible, sin embargo, la mayor dificultad a la que esta inversión tiene que hacer frente es que el interés por la misma no es seguro y por consiguiente puede conllevar problemas futuros si el hidrógeno, por ejemplo, no es capaz de sustituir a otras fuentes de energía como el uso de combustibles fósiles. [55][56]

7.3 ENERGÍA DE RESERVA

El hidrógeno ha ido ganando terreno como prometedora reserva energética debido a su potencial para ofrecer energía limpia y renovable, y ya que el hidrógeno es un gas incoloro, inodoro y no tóxico que puede producirse mediante diversos procesos, como la electrólisis del agua, el reformado del metano con vapor y la gasificación de la biomasa, como se ha explicado previamente, este gas puede utilizarse como combustible en estado puro o mezclado con otros combustibles para alimentar distintas aplicaciones. Por ello existen varios casos en los que el uso del hidrógeno como reserva energética puede ser beneficioso, y ayudar a su vez a equilibrar la red como se ha explicado en el apartado anterior.

El primero de estos casos es en la generación de energía, puesto que el hidrógeno puede utilizarse en pilas de combustible para producir electricidad destinada a aplicaciones estacionarias de generación de energía, en otras palabras, pueden utilizarse para generar energía para hogares, empresas e industrias, proporcionando una fuente de electricidad limpia y fiable. Las pilas de combustible tienen un rendimiento superior al de las tecnologías tradicionales de generación de energía basadas en la combustión, y pueden funcionar con una amplia gama de tamaños y capacidades, lo que las hace adecuadas para diversas aplicaciones.

Como segundo caso, el hidrógeno también puede utilizarse como medio de almacenamiento de fuentes de energía renovables como la eólica y la solar, ya que el exceso de energía de estas fuentes puede utilizarse para producir hidrógeno mediante electrólisis del agua, y el hidrógeno puede almacenarse para su uso posterior. Cuando se necesita energía, el hidrógeno puede volver a convertirse en electricidad mediante pilas de combustible u otras tecnologías, y como consecuencia de esto, el almacenamiento de energía de hidrógeno tiene el potencial de ofrecer una solución escalable y flexible al problema de la intermitencia de las fuentes de energía renovables.

Como tercer caso, el hidrógeno puede utilizarse como materia prima en diversos procesos industriales, como la producción de productos químicos, fertilizantes y acero, y ya en la

actualidad, muchos de estos procesos dependen de combustibles fósiles que producen importantes emisiones de gases de efecto invernadero. Utilizando hidrógeno en lugar de combustibles fósiles, estos procesos pueden ser mucho más limpios y sostenibles, y, además, muchas industrias generan hidrógeno como subproducto, por lo que puede utilizarse como combustible o fuente de energía.

Por último, el hidrógeno puede utilizarse como combustible para aplicaciones de calefacción y calentamiento de agua, ya que las calderas de hidrógeno pueden ofrecer una alternativa limpia y eficiente a las calderas de gas tradicionales, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorando la calidad del aire. Asimismo, el hidrógeno puede mezclarse con gas natural para reducir la huella de carbono de los sistemas de calefacción de gas.

Por ello, el hidrógeno tiene una amplia gama de usos como reserva energética, que van desde el transporte y la generación de electricidad hasta el almacenamiento de energía y las aplicaciones industriales. A medida que el mundo avanza hacia un sistema energético más sostenible y con bajas emisiones de carbono, es probable que el hidrógeno desempeñe un papel cada vez más importante en la satisfacción de nuestras necesidades energéticas, sin embargo, la adopción generalizada del hidrógeno como reserva energética requerirá importantes inversiones en infraestructuras, investigación y desarrollo. [56][59][60]

7.4 DESCARBONIZACIÓN

El hidrógeno está ganando interés como combustible potencial para la descarbonización en diversos sectores debido a su capacidad para producir energía con cero emisiones de carbono, ya que las emisiones de carbono, dañinas para los seres humanos, se han disparado en los últimos años. Los sectores del transporte, la industria y la energía son algunas de las principales áreas en las que el hidrógeno se considera una opción viable para la descarbonización. El sector del transporte contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo los vehículos propulsados por motores de combustión interna una fuente importante de emisiones, ya que el transporte fue el responsable de cerca de una cuarta parte de las emisiones de CO₂ en la UE en 2022, de las cuales el 71,7% %

provino del transporte por carretera, según el informe de la Agencia Europea del Medio Ambiente (31 agosto 2022). [64]. Los vehículos de pila de combustible de hidrógeno (FCV) son una alternativa a los vehículos convencionales propulsados por gasolina o gasóleo, ya que sólo producen agua como subproducto. Su autonomía es mayor que la de los vehículos eléctricos de batería, lo que los hace más adecuados para viajes de larga distancia, y el hidrógeno también puede utilizarse como combustible para el transporte marítimo y la aviación, como se ha comentado en anteriores apartados.

Por otra parte, el sector industrial es responsable de una parte sustancial de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, y el hidrógeno puede ayudar a reducir estas emisiones sustituyendo a los combustibles fósiles utilizados en diversos procesos industriales. El hidrógeno puede utilizarse como materia prima para la producción de productos químicos y fertilizantes o como combustible para procesos industriales como la calefacción, la refrigeración y la generación de electricidad, y con ello al sustituir los combustibles fósiles por hidrógeno, las industrias pueden reducir su huella de carbono. En el caso de la producción de energía, el hidrógeno también puede utilizarse para producir electricidad con cero emisiones mediante pilas de combustible, ya que estas pueden utilizarse para generar electricidad para edificios, hogares y redes eléctricas, y del mismo modo el hidrógeno también puede utilizarse en centrales eléctricas para generar electricidad, sustituyendo a los combustibles fósiles y reduciendo las emisiones de carbono, siendo estos casos mostrados en la siguiente imagen proporcionada.

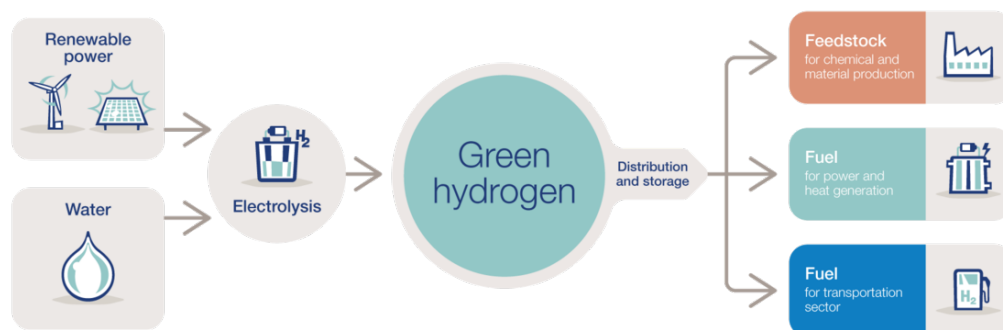


Figura 23: Como el hidrógeno limpio es creado y usado (<https://www.alfalaval.com/industries/energy-and-utilities/sustainable-solutions/sustainable-solutions/clean-energy/green-hydrogen/>)

Sin embargo, uno de los principales retos del uso del hidrógeno para la descarbonización es el coste de su producción, debido a que, en la actualidad, el hidrógeno se produce principalmente a partir del gas natural mediante el proceso de reformado de metano al vapor, que genera emisiones de carbono. Como ya se ha mencionado, existen métodos alternativos que son cada vez más viables como la electrólisis, ya discutida anteriormente, que utiliza electricidad renovable para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno. Existen también otros retos relacionados al excesivo coste de mantenimiento del hidrógeno, entre ellos, la necesidad de realizar importantes inversiones en infraestructuras para transportar y almacenar el hidrógeno de forma segura es de los retos más importantes.

Estando en un periodo de crisis general y economía en recesión, es complicado asegurar el papel del hidrógeno en el futuro de la descarbonización, pero lo que es seguro es que los planes que se tienen para en 2050 llegar a realizar un mundo de carbón neutro pueden describir los métodos más eficaces en los que el hidrógeno puede ayudar. Estos métodos son la recuperación y reducción de emisiones, en otras palabras, reducir las emisiones y recuperar sobre lo que se ha emitido. Esto puede ayudar a la descarbonización en un futuro en el que el hidrógeno sea más usado, ya que el carbono es dañino para los humanos y por ello es necesario descarbonizar, y el hidrógeno es producido sin emisiones al tener solo como subproducto en la producción de energía eléctrica el agua.

En conclusión, el hidrógeno tiene potencial para desempeñar un papel importante en la descarbonización de diversos sectores de la economía. Aunque hay retos que superar, los avances tecnológicos y el apoyo político están impulsando el crecimiento de la economía del hidrógeno, convirtiéndola en una opción cada vez más atractiva para reducir las emisiones de carbono, sin embargo, si el hidrógeno no es capaz de presentar la suficiente generación eléctrica necesaria para sustituir a las fuentes actuales, la inversión económica en esta nueva tecnología podría ser un gasto enorme e innecesario. [61][62][63]

8 DISEÑOS DE PLANTA

Durante este capítulo se harán referencias a los diseños de planta mostrados en el Anexo I de este proyecto.

Una planta de hidrógeno verde es una instalación que utiliza energía renovable para producir hidrógeno mediante la electrólisis del agua. Esta tecnología es muy prometedora ya que el hidrógeno verde se considera un vector energético limpio y versátil que puede ser utilizado en múltiples sectores, como el transporte, la industria y la generación de energía.

Sin embargo, es importante destacar que actualmente la eficiencia de las plantas de hidrógeno verde es relativamente baja en comparación con otras tecnologías de producción de energía. Esto se debe a que la electrólisis del agua es un proceso que consume mucha energía y tiene una eficiencia energética relativamente baja, lo que hace que la producción de hidrógeno verde sea muy cara.

En los últimos se han aprobado la construcción de numerosas plantas de hidrógeno, y varias ya han sido terminadas e inauguradas. Las plantas de hidrógeno más importantes son las que trabajan con hidrógeno verde, ya que es este tipo de hidrógeno el que puede ayudar al proceso de descarbonización, por ello es por lo que en países como España ha habido un auge de plantas, como la más reciente de Puertollano, Ciudad Real, siendo esta una planta de 20MW de la compañía española Iberdrola, que fue construida con un presupuesto de 150 millones de euros y puesta en marcha en 2022. [65]

8.1 ESTRUCTURA DE LAS PLANTAS

La estructura de una planta de hidrógeno verde puede variar dependiendo de su tamaño y capacidad de producción, pero en general consta de las siguientes secciones: un sistema de generación de energía renovable, electrolizador y rectificador, tanques de almacenamiento e hidrogeneras.

El componente más importante es el sistema de generación de energía renovable: este sistema puede consistir en paneles solares, turbinas eólicas, o cualquier otra fuente de energía renovable que se utilice para generar electricidad. El sistema debe ser lo suficientemente grande como para suministrar la energía necesaria para la electrólisis del agua, es decir, es necesaria una gran inversión en energías renovables para poder generar una cantidad de hidrógeno aceptable, tal como se observa en la imagen proporcionada.

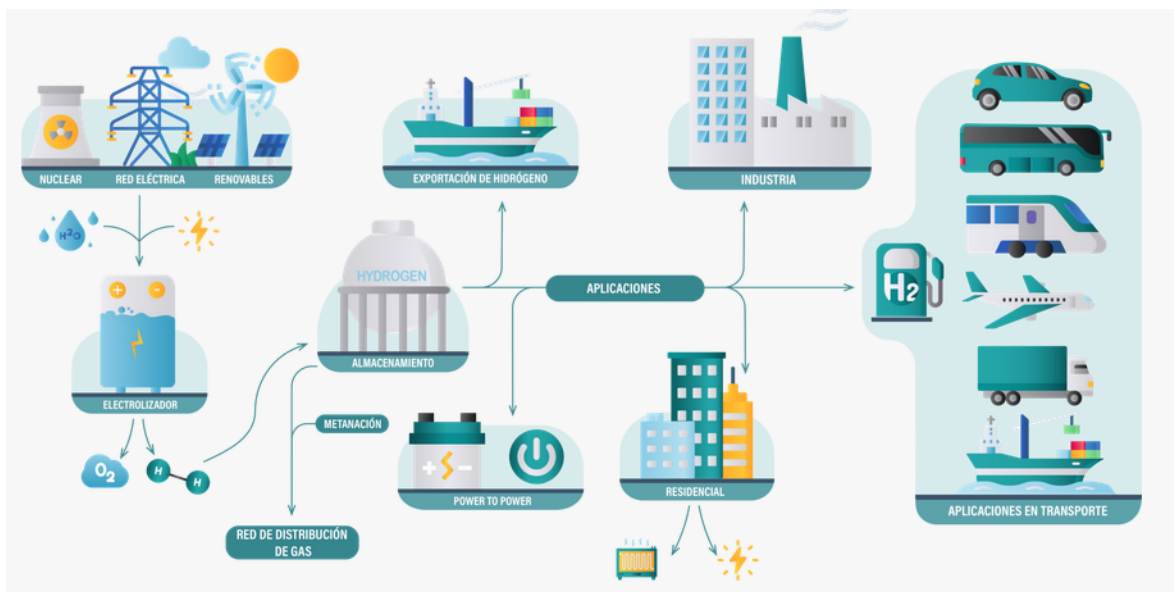


Figura 24: La cadena de valor del hidrógeno (<https://www.ariema.com/la-cadena-de-valor-del-hidrogeno>)

Este proceso de electrólisis se realiza en un electrolizador y rectificador (elemento (2) de la primera planta del Anexo I), donde se aplica una corriente eléctrica al agua para separar el hidrógeno del oxígeno. El hidrógeno se recoge y se almacena en tanques para su uso posterior, después se distribuye a través de tuberías a las hidrogeneras, donde se utiliza para abastecer los vehículos de hidrógeno.

El uso de hidrogeneras en plantas de hidrógeno tiene numerosos desafíos, siendo el mayor de ellos el coste, debido principalmente a que la construcción de una infraestructura de hidrogeneras es costosa, lo que hace que sea un desafío para las empresas que buscan invertir en esta tecnología. Además, las hidrogeneras requieren una gran cantidad de energía para

comprimir y almacenar el hidrógeno, lo que puede aumentar los costos de operación de la planta de hidrógeno.

Por último, cabe destacar el uso de pilas de combustible en las plantas de hidrógeno. En una planta de hidrógeno, las pilas de combustible se utilizan para producir electricidad a partir del hidrógeno. El hidrógeno se alimenta a las pilas de combustible, donde se combina con el oxígeno del aire para producir electricidad, agua y calor, y la electricidad generada puede utilizarse directamente para alimentar sistemas eléctricos o almacenarse en baterías para su uso posterior. Sin embargo, las pilas de combustible pueden ser muy caras y difíciles de fabricar y mantener, y sumado a esto, el almacenamiento y transporte de hidrógeno puede tener un mantenimiento muy caro y requerir infraestructuras específicas, lo cual aumenta aún más su coste.

Estos elementos se pueden observar en varios de los diseños mostrados en el Anexo I, dando a entender la simpleza de cada planta, ya que el uso de hidrógeno es una tecnología que aún está en una edad temprana, y que aún le queda mucho por demostrar. La primera planta del Anexo I muestra un diseño simple mostrando tan solo los más básicos elementos usados para la producción de hidrógeno, mientras que la segunda planta muestra un diseño más complejo, con más elementos y medidas de seguridad. Sin embargo, la simpleza del diseño sigue estando presente, ya que todos los añadidos en comparación con la primera planta son mayores medidas de seguridad y tanques para diferentes tipos de electricidad, ya que esta planta produce una mayor cantidad de energía que la primera.

8.2 PROBLEMAS DE LAS PLANTAS

Es cierto que la evolución en los diseños de las plantas de hidrógeno verde y la arquitectura de almacenamiento ha sido relativamente lenta, y esto puede ser visto como algo negativo. Una de las principales preocupaciones es que la falta de innovación en estas áreas puede limitar la adopción generalizada de la tecnología de hidrógeno verde.

La tecnología de hidrógeno verde se considera un componente importante en la transición a una economía baja en carbono, y se espera que su adopción aumente significativamente en las próximas décadas. Sin embargo, si la tecnología de hidrógeno verde no avanza lo suficientemente rápido, puede haber limitaciones en su capacidad para cumplir con las expectativas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Además, la falta de evolución en los diseños de las plantas de hidrógeno verde y la arquitectura de almacenamiento también puede tener un impacto en la eficiencia y los costes, ya que las tecnologías más antiguas pueden ser menos eficientes y más costosas que las tecnologías más avanzadas, lo que puede desalentar la inversión y la adopción.

Otro desafío es que la falta de evolución en estos diseños puede limitar la capacidad de la tecnología para adaptarse a las necesidades cambiantes del mercado y los requisitos de los clientes, lo cual puede limitar la capacidad de la tecnología de hidrógeno verde para competir con otras fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, o con otras fuentes no renovables como son el carbón, los combustibles fósiles o la energía nuclear.

Una de las principales limitaciones de almacenamiento de hidrógeno líquido es la baja eficiencia energética que se requiere para producir hidrógeno líquido en primer lugar. Como ya se ha explicado en capítulos anteriores, la producción de hidrógeno líquido requiere enfriar el hidrógeno gaseoso a una temperatura extremadamente baja (-253°C), lo que requiere una gran cantidad de energía. Además, el hidrógeno líquido es propenso a la evaporación y requiere un enfriamiento constante para mantenerse en estado líquido, lo que también requiere energía adicional.

Además, la arquitectura de almacenamiento de hidrógeno líquido es relativamente sencilla en comparación con otros métodos de almacenamiento de hidrógeno, como la compresión de hidrógeno gaseoso. Los tanques de hidrógeno líquido están diseñados típicamente como tanques de almacenamiento aislados con una estructura interna sencilla que ayuda a mantener el hidrógeno líquido en estado líquido, sin embargo, estos tanques también pueden ser relativamente grandes y pesados, lo que puede limitar su capacidad de transporte y aplicación en algunas situaciones.

Por otra parte, el uso de tanques de hidrógeno líquido es el más común en las plantas de hidrógeno, como se puede ver en los elementos (6) de la primera planta del Anexo I. El uso de estos tanques tiene que ver con su capacidad para almacenar grandes cantidades de hidrógeno en un espacio relativamente pequeño y con alta densidad de energía. Además, el hidrógeno líquido puede almacenarse por períodos prolongados de tiempo, lo que permite que la planta de hidrógeno opere de manera constante y confiable, incluso durante períodos de baja demanda.

Por último, podemos observar los problemas que trae consigo el uso de pilas de combustible: los gastos en pilas de combustible en plantas de hidrógeno son muy altos en comparación con otras formas de generación de energía. Sumado a esto, la tecnología de las pilas de combustible todavía está en desarrollo, lo que significa que hay muchos problemas técnicos y de seguridad que deben abordarse antes de que pueda ser una fuente de energía confiable y económica. La producción de hidrógeno requiere una gran cantidad de energía, lo que significa que la energía neta generada por una planta de hidrógeno puede ser baja en comparación con otras formas de energía, y también hay problemas con el almacenamiento y distribución del hidrógeno, lo que agrega aún más costos y complejidad al sistema.

Todos estos problemas de gastos, costes, complejidad de sistemas y seguridad, se unen entre ellos para crear una situación muy poco favorable para el futuro del hidrógeno. En las últimas décadas, se ha observado muy poca evolución en los diseños de planta, y si en el futuro esto no cambia, la idea de que el hidrógeno puede sustituir a las tecnologías y fuentes de energía actuales y convencionales no será más que una moda pasajera.

8.3 FUTURO DE LAS PLANTAS

Como se ha explicado en capítulos anteriores, uno de los mayores riesgos para la evolución del hidrógeno como vector para el almacenamiento de energía eléctrica son los problemas de seguridad que conlleva el trabajar con un gas tan inflamable. A continuación, se describen algunos de los posibles accidentes que pueden ocurrir tanto en la producción, como en el almacenamiento y transporte de hidrógeno.

El hidrógeno es altamente inflamable y puede explotar si se acumula en concentraciones peligrosas, por lo que también pueden ocurrir incendios si se produce una chispa o una llama en presencia de hidrógeno, y las fugas de hidrógeno también pueden causar incendios si el gas entra en contacto con fuentes de calor.

Las fugas de hidrógeno pueden ser peligrosas ya que el gas es altamente inflamable y puede acumularse en áreas confinadas. Estas fugas pueden ocurrir en cualquier punto de la cadena de producción, desde la producción hasta el almacenamiento y el transporte por lo que es importante desarrollar tecnologías de detección confiables e implementar protocolos rigurosos de inspección y mantenimiento, ya que el hidrógeno puede causar corrosión en los materiales utilizados en la planta, como tuberías, tanques y otros equipos. Por último, el hidrógeno líquido puede congelar y expandirse si no se maneja adecuadamente, lo cual puede causar graves fallas en los equipos y tuberías.

Estos problemas no solo afectan a los aparatos y elementos de las plantas, también afectan seriamente a los trabajadores y posibles usuarios de hidrógeno. Por ello, el primer paso en el uso seguro del hidrógeno es aumentar drásticamente las medidas de seguridad presentes en las plantas de hidrógeno. Ya se puede observar esto con elementos como el número (51) o el número (6) de la segunda planta mostrada en el Anexo I; sin embargo, estas medidas no son suficientes para asegurar que el manejo de hidrógeno es seguro.

El futuro de las plantas es dependiente del futuro del hidrógeno como tecnología para la creación de energía eléctrica. Podemos analizar si este futuro es seguro o no comparando las predicciones de uso de gas natural con el uso de hidrógeno de aquí a 2050. Según el Informe Mundial de Energía 2022 de la Agencia Internacional de Energía (AIE), se espera que la demanda mundial de gas natural aumente un 24% de 2020 a 2050, y que su uso como combustible de transporte aumente a medida que se desarrollan vehículos de gas natural y se expanden las infraestructuras de suministro. Sin embargo, también se espera que la producción de gas natural alcance su punto máximo en la década de 2030 y disminuya después, a medida que las reservas se agoten y la transición a fuentes de energía más limpias se acelere.[66]

En cuanto al hidrógeno, se espera que su demanda aumente significativamente en las próximas décadas como una forma de almacenar y transportar energía renovable, así como para su uso en la industria pesada y el transporte. Según el informe "Perspectivas de desarrollo de un mercado global de hidrógeno " de la Instituto Vasco de Competitividad, se espera que la demanda mundial de hidrógeno alcance alrededor de 530 millones de toneladas en 2050, con una participación significativa de hidrógeno verde producido a partir de fuentes renovables.[67]

En términos de predicciones de consumo de energía primaria, el hidrógeno representaría alrededor del 7% de la energía primaria en el mundo en 2050, mientras que el gas natural representaría alrededor del 21%, según el escenario de la AIE de "Alto Liderazgo Climático" en su informe "Resumen Ejecutivo 2021".[68]

Es importante destacar que las predicciones para el gas natural y el hidrógeno pueden variar significativamente en función de muchos factores, como el desarrollo de nuevas tecnologías, los cambios en las políticas energéticas y la evolución de los precios de los combustibles fósiles y las energías renovables. Viendo estos datos y porcentajes, queda claro que la evolución de hidrógeno no es lo suficientemente rápida como para sustituir a las tecnologías convencionales de producción de energía eléctrica, ya que, tan solo comparando el gas natural, vemos que su uso en 2050 se predice que sea más de 3 veces el uso de hidrógeno en la misma industria.

Por último, compararemos el tamaño de las plantas de hidrógeno en las que se está trabajando con el tamaño de plantas convencionales nucleares, para comprobar si esta tecnología tiene alguna habilidad de sustituir a las energías convencionales usadas hoy día en España en el futuro. La razón por la que se ha elegido la energía nuclear para comparar es tan solo porque la energía nuclear tiene un porcentaje importante en la producción de energía para alimentar la demanda actual de España, tal como se puede ver en la imagen proporcionada.

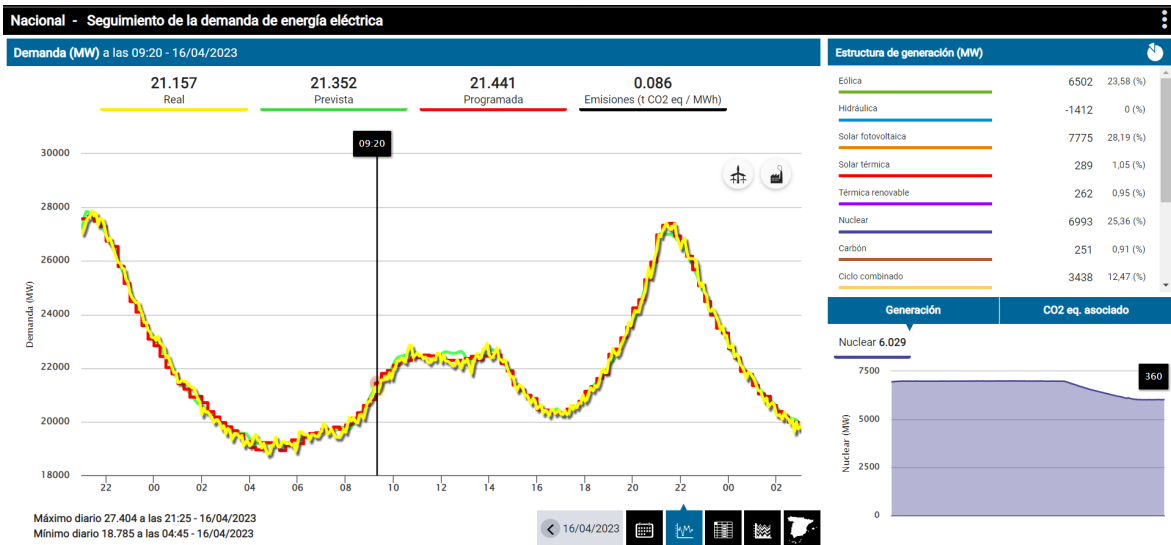


Figura 25: Demanda eléctrica de la Península Ibérica
(<https://demanda.ree.es/visiona/peninsula/nacional/total>)

Las plantas nucleares tienen una capacidad de producción eléctrica que varía desde unos pocos cientos de megavatios hasta varios gigavatios. Por ejemplo, la central nuclear más grande del mundo, la central nuclear de Kashiwazaki-Kariwa en Japón, tiene una capacidad de producción de 8212 MW eléctricos. En promedio, las plantas nucleares suelen tener una capacidad de producción eléctrica de alrededor de 1.000 a 1.500 MW. Una planta nuclear típica puede tener varios reactores nucleares, y la capacidad de producción de cada reactor puede variar desde unos pocos cientos de megavatios hasta más de 1.000 MW.

En comparación, las plantas de hidrógeno actuales trabajan tan solo con unos 10 MW de producción, ya que se piensa en ellas como almacenamiento y como apoyo a la regulación secundaria (tensión/frecuencia) en determinados nodos de la red como alternativa a los ciclos combinados. Esta cantidad es extremadamente baja, y muestra la imposibilidad de que el hidrógeno sustituya a otras energías como la energía nuclear. En España la energía nuclear representa alrededor de un 25% de la demanda total, como se puede observar en la imagen proporcionada, siendo proporcionado por 7 reactores de agua ligera, con una potencia eléctrica instalada de 7.398,77 MW, y sabiendo que en 2035 culminará el cierre total de energía nuclear en España, la necesidad de energías que sustituyan a la nuclear está creciendo cada día más.[69][70]

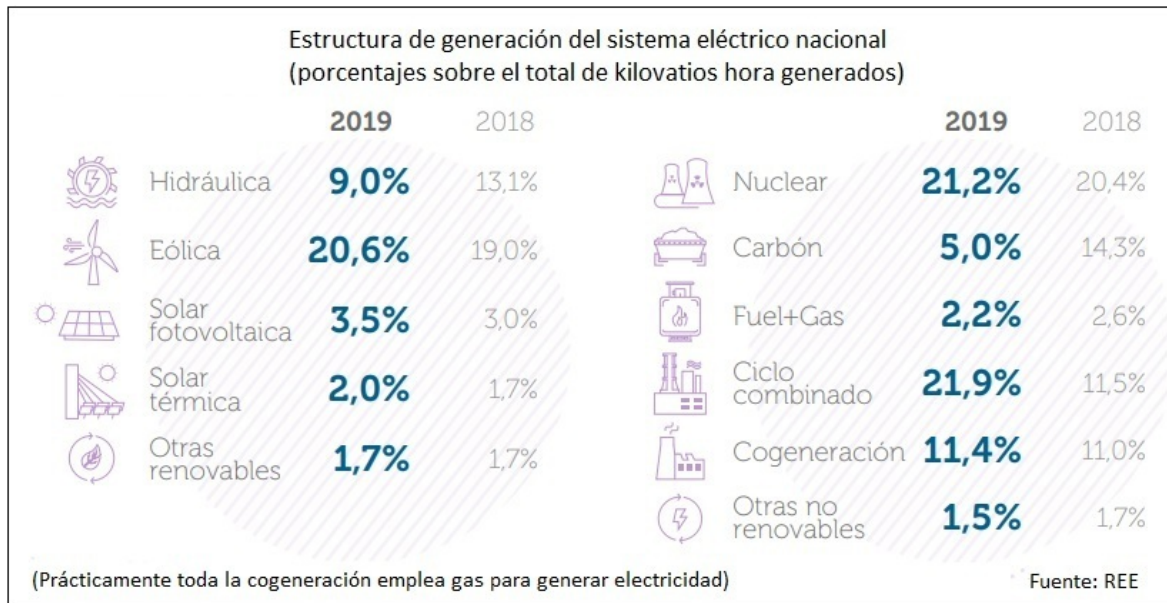


Figura 26: Estructura de generación del sistema eléctrico nacional (<https://www.energias-renovables.com/panorama/espana-2020-el-pais-con-110-000-20200124>)

Para continuar con el ejemplo, la planta de hidrógeno verde de Puertollano mostrada en el Anexo I, que es conocida por ser la mayor planta de hidrógeno verde para uso industrial en Europa, tan solo es capaz de producir 20 MW. Como se puede observar en las figuras proporcionadas, la cantidad de energía nuclear que se tiene a disposición actualmente en comparación con el hidrógeno es enorme. Esta cantidad de hidrógeno es demasiado baja, y explorando proyectos futuros, podemos fijarnos en el país más activo en la producción de hidrógeno verde del mundo, EE.UU., que planea la construcción de una de las más grandes plantas de hidrógeno del mundo en California (mostrada en el Anexo I), la cual tendrá una capacidad de tan solo 130 MW, y no será operativa hasta 2025 si no existen imprevistos. El hecho de que un proyecto tan grande y caro apenas pueda llegar al 15% de la producción anual de una sola central nuclear muestra lo lejos que esta esta tecnología de ser viable. España tiene como plan llegar a los 4000MW de hidrógeno verde en 2030, sin embargo, eso no es suficiente como para sustituir a la energía nuclear, y por ahora no hay ninguna certeza de que llegue a esa marca, pese a planes del gobierno de aumentar la producción de hidrógeno, a menos que este de más ayudas gubernamentales e incentive a la investigación

para que la iniciativa privada ayude no hay razón de creer que se llegará a esas marcas.
[71][72]

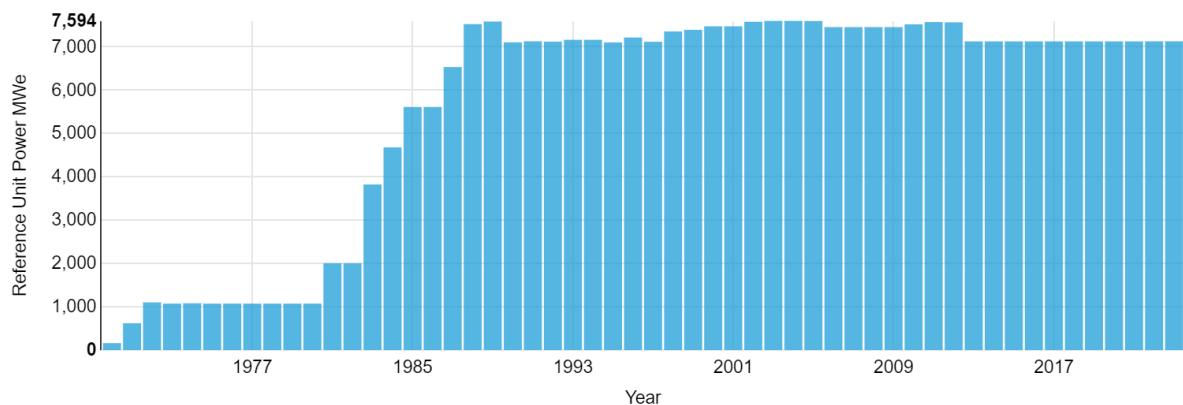


Figura 27: Energía nuclear operable en España (<https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/spain.aspx>)

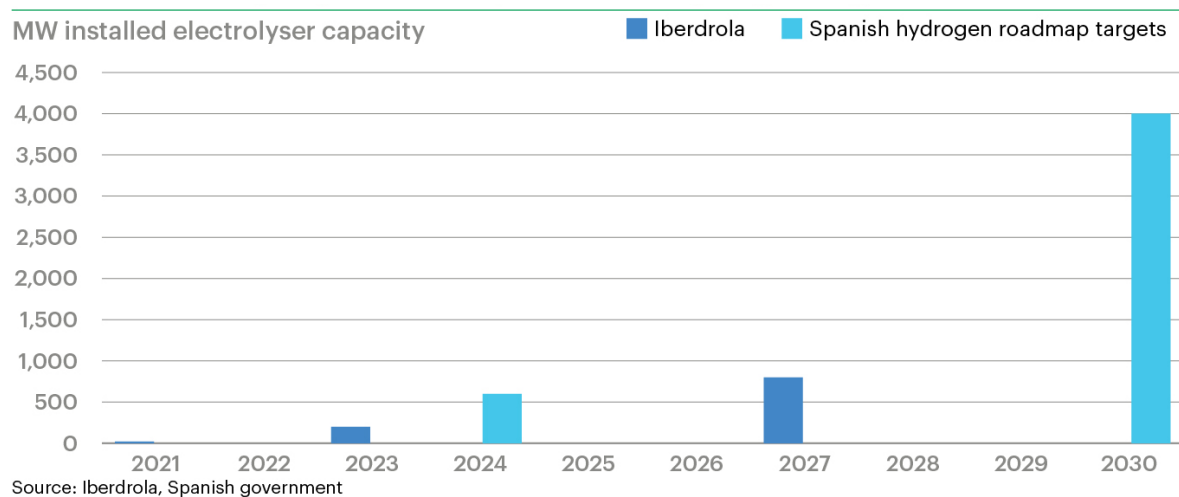


Figura 28: Capacidad de electrolizadores instalados en MW
(<https://www.icis.com/explore/resources/news/2020/11/24/10578433/spain-strengthens-green-hydrogen-position/>)

9 ANÁLISIS DE COSTES

A continuación, se realizará un análisis de costes para comprobar si el coste de producción de hidrógeno en una planta es aceptable o no. Para ello se calculará, teniendo en cuenta los precios de hidrógeno y demanda eléctrica actuales, el coste de producción de hidrógeno en una planta de hidrógeno común de 10 MW con electrolizadores de 10MW, con un periodo de amortización común de 30 años.

Para describir los precios de uso de una planta de hidrógeno verde de 10 MW, es necesario tener en cuenta varios factores. Primero, el costo de construcción de la planta, que puede variar significativamente según el diseño y la ubicación geográfica de la planta. El coste de inversión para la construcción de una planta de 10 MW con electrolizadores de 10 MW puede variar según el tipo de electrolizador y la tecnología utilizada. Según reportes hechos por la Asociación del Hidrógeno y la Pila de Combustible de España, el coste de inversión para una planta de estas características oscila entre los 4.500 y 6.000 €/kW, por lo que, en nuestro caso, la inversión inicial podría rondar los 40-55 millones de euros (para simplificar los cálculos utilizaremos una inversión de 40 millones de euros).[73]

Una vez que la planta está construida, los costes de operación y mantenimiento son los principales factores que determinan los precios de uso. Estos costes incluyen la energía eléctrica necesaria para producir hidrógeno a través de la electrólisis del agua, el coste de los electrodos y otros consumibles, y los costes de mantenimiento del equipo y las instalaciones.

En promedio, el coste de producción de hidrógeno verde según la Agencia Internacional de la Energía es alrededor de 3 a 8 euros por kilogramo, lo que equivale a 3.000 a 8.000 euros por tonelada. Sin embargo, los precios de uso pueden variar significativamente dependiendo de la demanda del mercado y los costos de los combustibles fósiles. [76]

Para realizar el análisis, tomaremos en cuenta los siguientes supuestos: para comenzar supondremos que una planta de 10 MW tiene una capacidad de producción de 200 kg de

hidrógeno por hora, teniendo en cuenta que la planta de Puertollano es capaz de generar 360 kg/hora por tener una capacidad de 20MW.[75]

El coste de electricidad es de 0,13€ por kWh, según los datos de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) en marzo de 2023 (fecha de la realización de este análisis), y el coste de los electrolizadores es de 800€ por kW, según datos del informe "Hidrógeno verde en España: oportunidades y desafíos" elaborado por la consultora PwC en 2021.[74]

Podemos aproximar los costes de mantenimiento y operación al 5% del coste de los equipos por año, una vida útil de los electrolizadores de 30 años equivalente al periodo de uso, y la tasa de amortización del 3,3% para una planta de 30 años de vida útil.

A continuación, vamos a proceder al cálculo del coste normalizado del hidrógeno (LCOH: Levelized Cost Of Hydrogen). En primer lugar, vamos a calcular la producción de hidrógeno y el consumo de energía eléctrica necesaria por los electrolizadores en base a los siguientes parámetros:

- Electrolizador con potencia de 10MW con una eficiencia de 50KWh/Kg de hidrógeno, lo cual se traduce en que la planta es capaz de producir 200Kg/h trabajando a pleno rendimiento.
- Precio de la electricidad: 0,13€/kWh.
- Factor de capacidad (f): cociente entre el consumo real y el máximo posible. Tomamos un valor del 90%.

$$f = \frac{\text{Energía en un año}}{(\text{Potencia del Electrolizador}) \cdot (1 \text{ año})}$$

Figura 29: Fórmula del factor de capacidad (<https://afs-services.com/hidrogeno-verde-3/>)

- Tasa de descuento (r): 9%
- Vida útil de la planta (VU): 30 años

Estos parámetros crean las condiciones para producir 1,752M de kilos de hidrógeno si la planta se mantiene trabajando 24 horas al día durante los 365 días del año. [74]

Ahora procedemos al cálculo del LCOH siguiendo la siguiente fórmula:

$$LCOH = \frac{\text{Coste electrolizador} + \sum_{t=1}^{VU} \frac{\text{Coste anual de la electricidad}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{VU} \frac{\text{Cantidad de } H_2 \text{ producida al año}}{(1+r)^t}}$$

Figura 30: Fórmula del LCOH (<https://afs-services.com/hidrogeno-verde-3/>)

Para ello calculamos el coste anual de la electricidad, siendo este 0,13€/KWh x 10MW = 1300€/h, lo cual supone que, si se trabaja 24 horas al día, 365 días al año, supone un coste de 11,388M€. La planta requiere 10 MW de capacidad de los electrolizadores para la producción de hidrógeno. Por lo tanto, el coste del consumo eléctrico de los electrolizadores sería de 800€ por kW x 10.000 kW = 8M€.

$$LCOH = \frac{8M€}{(f \times 1.752.000Kg) \times \sum_{t=1}^{VU} \frac{1}{(1+r)^t}} + \frac{11,388M€}{1.752.000Kg}$$

Figura 31: Cálculos iniciales del LCOH

El segundo término se puede calcular directamente dando un resultado de 6,5, mientras que para el primer término es necesario resolver el sumatorio de la siguiente manera:

$$\sum_{t=1}^{VU} \frac{1}{(1+r)^t} = \frac{1 - (1+r)^{-VU}}{r}$$

Figura 32: Conversión del sumatorio del LCOH (<https://afs-services.com/hidrogeno-verde-3/>)

Una vez hecho esto podemos sustituir los datos que tenemos y ver el resultado obtenido:

$$LCOH = \frac{8M€}{(0,9 \times 1.752.000Kg) \times \frac{1 - (1 + 0,09)^{-30}}{0,09}} + 6,5 = 6,99€/Kg$$

Figura 33: Cálculo final del LCOH

Después, calcularemos los costes de mantenimiento y operación, siendo estos el 5% del coste de los equipos por año. Por lo tanto, el coste anual de mantenimiento y operación sería de $8\text{M€} \times 5\% = 400\text{k€}$ por año.

Para la amortización tendremos en cuenta la tasa de amortización, siendo esta como se ha comentado anteriormente del 3,3% suponiendo una vida útil de la planta de 30 años. Por lo tanto, la amortización anual sería de $40\text{M€} \times 3,3\% = 1,32\text{M€}$ por año.

Ahora calcularemos la amortización, más el coste de mantenimiento y operación sobre la cantidad de hidrógeno producida:

$$\frac{400\text{k€ (coste de mantenimiento y operación)} + 1,32\text{M€ (amortización)}}{1.752.000\text{Kg}} = 0,98\text{€ /Kg}$$

Figura 34: Cálculos de la amortización y costes de mantenimiento y operación

Finalmente, calcularemos los costes totales de producción de 1 kg de hidrógeno, siendo estos la suma de los costes de los equipos, electricidad, mantenimiento y operación, y amortización. El coste total anual sería de:

Costes de producción de hidrógeno por kilogramo

$$\begin{aligned} &= LCOH + \frac{\text{Coste de mantenimiento y operación} + \text{Amortización}}{\text{Producción de hidrógeno}} \\ &= 6,99 + 0,98 = 7,97\text{€ /Kg} \end{aligned}$$

Figura 35: Coste final del hidrógeno

Esto nos muestra que el coste de producción de hidrógeno verde es de aproximadamente 7,97 euros por kilogramo de hidrógeno, mostrando un aproximado a los 3-8 euros calculados por la Agencia Internacional de la Energía. Es importante tener en cuenta que estos cálculos son solo estimaciones y que los costes reales pueden variar dependiendo de muchos otros factores, como los precios de los materiales, los costes de transporte, de mano de obra y otros costes indirectos, y estos cálculos no incluyen cosas como los costes adicionales que suponen la compresión del hidrógeno o su almacenamiento. Teniendo en cuenta la inversión inicial de la planta de 40-55 millones de euros, esto muestra que es una inversión demasiado alta

que no parece salir rentable si la capacidad de producción de hidrógeno verde no aumenta considerablemente en los próximos 30 años. Para que la inversión fuera interesante, sería necesario que el valor en euros/kg de H₂ bajara a los 1,5 euros/kg, algo que no parece viable en los próximos años. Sin embargo, cabe mencionar que la presidenta de la Comisión Europea, Ursula Von der Leyen ha afirmado que el coste del hidrógeno verde podría bajar de 1,8 euros/kg en 2030.[77] Estos cálculos claro está no tienen en cuenta los intangibles de publicidad, relevancia, acceso a subvenciones, etc. Aunque estos valores no salgan sí que cuantificamos la publicidad y la imagen de marca, por lo que puede llegar a tener sentido la inversión inicial, sin embargo, la disparidad entre beneficios e inversión sigue siendo evidente, por lo que, aunque la tecnología aumente considerablemente en los 30 próximos años, para ese entonces la planta ya habrá sido amortizada, y su vida útil ya habrá pasado.

10 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La conclusión de este trabajo consiste en una reflexión sobre todo lo mostrado hasta ahora, y, una vez hecha, se procederá a responder la pregunta que se planteó al comienzo de este proyecto: ¿es viable la implementación del hidrógeno como vector para el almacenamiento de energía eléctrica en el futuro cercano?

Para ello, se comenzarán listando los mayores desafíos que enfrenta el hidrógeno en su camino para sustituir a las energías convencionales de las que dependemos hoy en día. Para comenzar, el hidrógeno tiene un muy alto coste, ya mostrado en el Capítulo 9, y la rentabilidad del uso de una planta es muy cuestionable, puesto que la inversión inicial sumada al coste de producción anual de hidrógeno menos las ganancias anuales no parecen llegar a ser lo suficiente como para cubrir la vida útil de una planta común, al menos no hasta que se pueda aumentar radicalmente la capacidad de estas plantas. Por ello es que el coste de hidrógeno por kilogramo no es rentable, ya que para que fuera rentable sería necesario que el precio bajara a los 1,5 euros por kilogramo, sin embargo, la probabilidad de que eso ocurra en la próxima década no es segura, ya que depende de muchos factores fuera del control de investigadores, ya que el principal coste es el precio de la electricidad usada en el proceso, por lo que, si ese precio no disminuye de aquí a 2030, el precio del hidrógeno no verá una disminución importante. A su vez, la complejidad asociada con su producción, almacenamiento y distribución empeora la situación, ya que esta tecnología está en una muy temprana edad, la inversión en millones de euros hecha con la idea de que en 2030 el hidrógeno será la fuente de energía principal del planeta es tan solo una desilusión.

La producción de hidrógeno a partir de fuentes de energía renovable, como la energía solar o eólica, es muy cara y requiere grandes cantidades de energía, lo cual a su vez requiere una gran inversión en infraestructuras y estructuras de almacenamiento para ser capaz de producir, almacenar y distribuir hidrógeno. Además, la tecnología actual de almacenamiento de hidrógeno es costosa y poco eficiente, lo que significa que solo una pequeña fracción de la energía utilizada para producir hidrógeno se puede recuperar en forma de energía eléctrica.

También es importante destacar que, aunque el hidrógeno puede producir energía limpia, su producción y almacenamiento también pueden generar emisiones de gases de efecto invernadero si se utilizan combustibles fósiles para producir hidrógeno o si el almacenamiento de hidrógeno no se realiza adecuadamente. Este es un problema serio, ya que el objetivo principal del uso de hidrógeno verde es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la calidad del aire, en otras palabras, ayudar al efecto de descarbonización.

Otro tema importante del que reflexionar es la seguridad del hidrógeno, y cómo las medidas de seguridad actuales en plantas de hidrógeno no tienen en cuenta la facilidad que tiene el hidrógeno de causar accidentes. Como se puede observar en la figura proporcionada, el hidrógeno es el combustible que menos energía necesita para comenzar una ignición, y esa ignición puede llevar a una explosión en el vehículo o planta, por lo que es necesario añadir muchas más medidas de seguridad como la verificación de fugas, la capacitación adecuada y las inspecciones regulares, como el uso de mejores sensores de llamas y fugas para reducir las posibilidades de explosión o ignición del hidrógeno.

HYDROGEN IGNITION ENERGY AS COMPARED TO OTHER COMMON FUELS

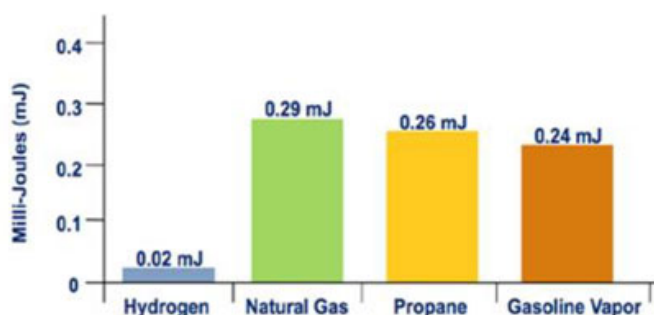


Figura 36: Energía necesaria para la ignición de combustibles

<https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-compared-other-fuels>

Por otra parte, si comparamos los métodos convencionales de almacenamiento de energía eléctrica, que suelen usar baterías, con el almacenamiento de energía eléctrica mediante

hidrógeno, que suele implicar el uso de pilas de combustible, podemos darnos cuentas de varias desventajas por parte del uso de hidrógeno. Entre ellas, está la eficiencia de pilas de combustible en comparación con por ejemplo vehículos eléctricos, siendo esta una eficiencia del 38% en contra de un 80% respectivamente.

Es evidente viendo estas que la inversión en un vehículo eléctrico es mucho más rentable por parte de un consumidor corriente que la inversión en un vehículo de hidrógeno. No solo eso, también el coste excesivo de hidrogeno en comparación con otros tipos de combustible muestra la dificultad que un usuario común encuentra cuando intenta usar hidrógeno en vez de otros combustibles más comunes como el gas natural o el carbón. Por ello, es que uno de los mayores problemas del hidrógeno en uso camino hacia la existencia como una energía limpia, eficiente y rentable es la existencia de mejor competencia en los demás sectores. Desde el punto de vista de un usuario común, la inversión en esta tecnología cuando ya existen mejores alternativas y más eficientes es muy complicada.[78]

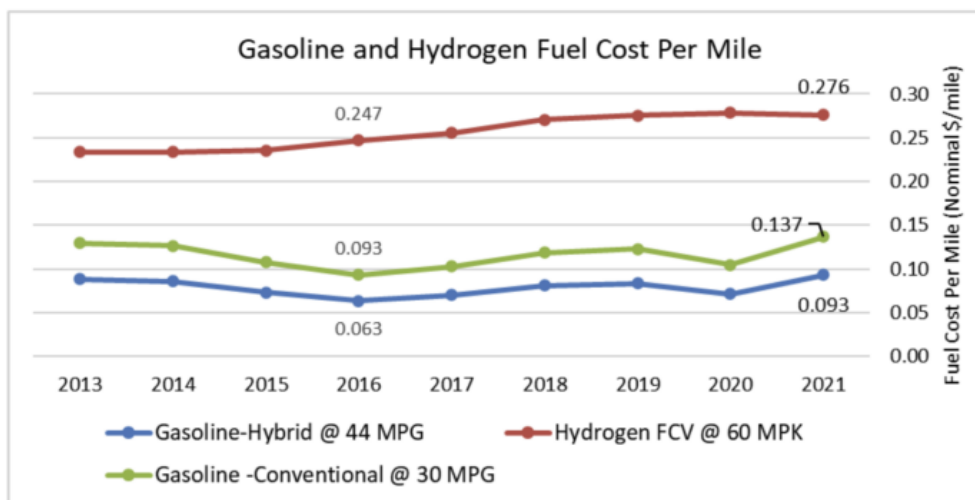


Figura 37: Coste de gasolina e hidrógeno por milla (<https://stillwaterassociates.com/how-does-the-cost-of-hydrogen-stack-up-against-gasoline/>)

Tabla 3: Costo actual de los combustibles industriales

Combustible	Poder calorífico superior	Precio	Precio para 1 MMBTU	Eficiencia	Precio del H ₂ para competir
	[Kcal/kg]	[US\$/kg]	[US\$/MMBTU]	[%]	[\$/kg]
Gas natural	13100	0,64	13	80	1,76
LPG	11082	0,63	13,2	79	1,8
Diésel	10900	0,82	19	85	2,2
Carbón	7000	0,29	10,4	80	1,4
FO5	10300	0,46	11,3	83	1,6
FO6	10300	0,46	11,3	83	1,6
Pellets	4300	0,19	11	80	1,5
Chips	2350	0,072	11	70	1
PDM	3068	0,062	5,1	57,8	0,75
Hidrógeno verde	33916	8	59	75	-

Tabla 3: Coste anual de los combustibles industriales (<https://www.induambiente.com/informe-tecnico/calderas/claves-del-hidrogeno-verde#:~:text=Para%20producir%201%20kg%20de%20hidr%C3%B3geno%20por%20electr%C3%B3lisis%20se%20necesitan,eficiencia%20del%20equipo%20>)

Por último, podemos hablar de los costes de almacenamiento y uso del hidrógeno. Actualmente, el coste de almacenar energía utilizando hidrógeno es mucho más elevado que el uso de pilas. Esto se debe a que las pilas de combustible de hidrógeno son todavía una tecnología relativamente nueva, y la infraestructura necesaria para el almacenamiento y la distribución de hidrógeno no está tan desarrollada como la de las pilas. Esto es evidente en la cantidad de hidrogeneras disponibles para usuarios en España, siendo esta cuantía minúscula en comparación con el número de gasolineras o estaciones de carga de vehículos eléctricos, existiendo tan solo 11 hidrogeneras activas en España.

En temas de uso de hidrógeno, como se puede comprobar en la figura 39, el precio de uso del hidrógeno por milla comparado con el precio de la gasolina por milla es muy superior, y por tanto menos rentable para el usuario medio. Esto supone un gran problema para posibles usuarios, ya que un porcentaje muy pequeño de la población es capaz de pagar los gastos de viaje de un combustible tan caro que llega a ser casi 3 veces más caro que la gasolina.

El hidrógeno, siendo un elemento capaz de producir energía eléctrica sin emisiones de carbono es sin duda un posible vector energético, que puede ayudar al proceso de descarbonización y ayudar a la Unión Europea a llegar a tener una economía con cero emisiones para 2050 siguiendo los métodos de reducción y recuperación sobre emisiones, sin embargo, no es realista que llegue a estos objetivos sin ayudas privadas y gubernamentales en los próximos años.

En resumen, almacenar energía eléctrica con hidrógeno tiene el potencial de ser un método de almacenamiento de energía más eficiente y respetuoso con el medio ambiente que las pilas convencionales. Sin embargo, el coste del almacenamiento, producción y uso del hidrógeno, sumado a la baja eficiencia en comparación con otras fuentes de energía, los problemas de seguridad y la escasa infraestructura existente, crean una situación en la que la inversión en esta tecnología es de muy alto riesgo y poco segura. Por ello es por lo que la implementación del hidrógeno como vector para el almacenamiento de energía eléctrica en un futuro cercano es muy complicada, y más aún si es planeado que esta tecnología sustituya a energías de las que dependemos hoy día para alimentar la alta demanda eléctrica. Es por ello por lo que nos encontramos ante una tecnología potencialmente sustitutiva de energías basadas en combustibles fósiles pero que se enfrenta a diversos problemas que deben resolverse a corto-medio plazo si se quiere que sea esa una alternativa real, ya que los problemas de seguridad, coste y competencia que trae consigo esta tecnología hacen que la inversión en ella sea de alto riesgo y no muy segura. Es necesario entonces la mejora continua de esta tecnología en esos aspectos, por lo que la total dependencia del hidrógeno en el futuro cercano no es posible a menos que estas mejoras ocurran.

Por último, se mencionarán algunas de las áreas de investigación que podrían impulsar el desarrollo del uso del hidrógeno como vector para el almacenamiento de energía eléctrica en el futuro.

Para empezar, se puede impulsar la investigación en tecnología de producción de hidrógeno ya que se necesitan nuevas tecnologías para producir hidrógeno de manera más eficiente y económica. Por ejemplo, se podrían explorar tecnologías como la electrólisis de alta

temperatura y la producción de hidrógeno a partir de biomasa o residuos. Esto también podría impulsar soluciones para reducir el coste de producción de hidrógeno, ya que este coste hoy día es demasiado elevado. Esto es evidente en el análisis de costes realizado, gracias al cual podemos concluir que el mayor problema en este coste es el precio de la electricidad, y justo como dice Javier Brey, presidente de la Asociación Española del Hidrógeno: “el coste de producción será directamente proporcional al de la electricidad empleada en el proceso”, por ello rebajar ese coste sería monumental en la mejor viabilidad del hidrógeno.

También se puede investigar la tecnología de almacenamiento de hidrógeno: por ejemplo, se podrían explorar tecnologías como la adsorción en materiales porosos, el almacenamiento criogénico o el almacenamiento en forma de hidruros metálicos. Otra área donde investigar es en la tecnología de conversión de hidrógeno en energía eléctrica, ya que se necesitan nuevas tecnologías para que la conversión sea de manera más eficiente y económica, como las celdas de combustible de alta temperatura y las celdas de combustible de óxido sólido. El estudio de estas áreas podría hacer que el hidrógeno se convierta en esa energía limpia, eficiente y barata que todo el mundo desea, pero hasta ese entonces en el que esta tecnología salga de su periodo de infancia, la inversión que se realice en ella será más peligrosa que en otras energías, pese a que el uso de hidrógeno sigue siendo posible si los problemas discutidos se solucionan.

11 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rheinland, T. Ü. V. (s/f). El hidrógeno verde como vector energético del futuro. Tuv.com. <https://www.tuv.com/landingpage/es/hydrogen-technology/main-navigation/allgemein/>
- [2] Centro Nacional de Hidrógeno. *Hidrógeno - Centro Nacional de Hidrógeno*. 2019, febrero 6. <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>
- [3] *Hidrógeno: propiedades, usos, características y riesgos*. (s/f). <https://humanidades.com/hidrogeno/>
- [4] Dincer Ibrahim, and Haris Ishaq. Renewable Hydrogen Production. Elsevier Science, 2021. Páginas 18-21.
- [5] Martino, Marco, and Concetta Ruocco, editors. Catalysts for Sustainable Hydrogen Production: Preparation, Applications and Process Integration. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022. Páginas 12-20.
- [6] Casteleiro Roca, José Luis, et al. *Hidrógeno y su almacenamiento: El futuro de la energía eléctrica*. Universidade da Coruña, 2021. Páginas 83-94.
- [7] Plaza, D. 2022, mayo 25. *¿Qué es el hidrógeno verde? Qué beneficios tiene y cuánto cuesta*. Motor.es. <https://www.motor.es/que-es/hidrogeno-verde>
- [8] Junta de Castilla y León. (s/f). *Cómo obtener hidrógeno*. Jcyl.es. <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/como-obtener-hidrogeno.html>
- [9] Yan, Xing L., and Ryutaro Hino, editors. Nuclear Hydrogen Production Handbook. CRC Press, 2011.
- [10] Pilas de Combustible - Centro Nacional de Hidrógeno. 2019, febrero 7. Centro Nacional de Hidrógeno. <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>
- [11] Spiegel, Colleen. PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab. Elsevier Science, 2008. Páginas 12-24.
- [12] Junta de Castilla y León. (s/f-a). Aplicaciones de las pilas de combustible. Jcyl.es. <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/aplicaciones-pilas-combustible.html>

- [13] Hidrogeno (H) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. (s/f). Lenntech.es. <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/h.htm>
- [14] Navneet Kumar, THE HYDROGEN ECONOMY: The Fuel Of The Future. 2021, 29 abril. Páginas 10-12
- [15] Fuels - higher and lower calorific values. (s/f). Engineeringtoolbox.com. https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html
- [16] Hidrógeno. (s/f). Quimica.es. <https://www.quimica.es/enciclopedia/Hidr%C3%B3geno.html>
- [17] Sankir, Mehmet, and Nurdan Demirci Sankir, editors. Hydrogen Storage Technologies. Wiley, 2018. Páginas 71-75.
- [18] LA SEGURIDAD EN LA INDUSTRIA DEL HIDRÓGENO VERDE. 2021, julio 15. MAPFRE Global Risks. <https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/la-seguridad-en-la-industria-del-hidrogeno-verde/>
- [19] Los peligros del hidrógeno. (s/f). Crowcon Detection Instruments Ltd. <https://www.crowcon.com/es/blog/the-dangers-of-hydrogen/>
- [20] De Aragón, E. 2023, enero 2. Fugas de hidrógeno: un aspecto aún por estudiar y determinar. Hidrogeno verde. <https://hidrogeno-verde.es/hidrogeno-verde-estudios-sobre-fugas/>
- [21] Pezzi, S. 2021, septiembre 30. Del gris al verde, los colores del hidrógeno. Good New Energy; Enagas. <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/del-gris-al-verde-los-colores-del-hidrogeno/>
- [22] Pascual, C. A. 2022, octubre 27. Del verde al azul: qué significan los colores del hidrógeno. Newtral. <https://www.newtral.es/tipos-hidrogeno-colores-verde-azul-rosa-barmar/20221027/>
- [23] Corporativa, I. (2019, noviembre 15). Almacenamiento de energía: la clave de un futuro descarbonizado. Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/almacenamiento-de-energia-eficiente>
- [24] Laura Ojea, El volante de inercia quiere liderar el mercado de almacenamiento de energía renovable (S/f-b). Elperiodicodelaenergia.com. <https://elperiodicodelaenergia.com/el-volante-de-inercia-quiere-liderar-el-mercado->

- [de-almacenamiento-de-energia-renovable/#:~:text=Los%20volantes%20de%20inercia%20son,de%20nuevo%20en%20el%20sistema](#)
- [25] Álvarez, D. O. (s/f). *Batería*. Concepto. <https://concepto.de/bateria/>
- [26] Qué es el sistema de almacenamiento de energía en batería y cómo funciona. (s/f). Enel X. <https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/what-is-battery-energy-storage>
- [27] De devolver dicha energía posteriormente casi en su totalidad, B. es un S. de A. de E. E. P. E. y. Q. T. la C., & de veces., C. Q. P. R. un D. N. (s/f). 7.Baterías para Almacenamiento de Energía. Biblus.us.es. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70692/fichero/10+Baterias+para+Almacenamiento+de+Energ%C3%ADa.pdf>
- [28] Cryospain. (2023, abril 24). Amoniac verde, la solución al transporte y almacenamiento de hidrógeno renovable. Cryospain. <https://cryospain.com/es/amoniac-verde-solucion-al-transporte-y-almacenamiento-de-hidrogeno-renovable>
- [29] Alcalde, S. (2022, septiembre 15). Estos son los principales proyectos para producir hidrógeno verde en España. National geographic. https://www.nationalgeographic.com.es/economia-circular/estos-son-principales-proyectos-para-producir-hidrogeno-verde-espana_18710
- [30] Alfonso Barquín Díaz, Anexo B: El hidrógeno como vector para el almacenamiento de energía eléctrica, casos de uso y diseños de planta más relevantes
- [31] Bockris, J. O. M. (2013). The hydrogen economy: Its history. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(6), 2579–2588. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.026>
- [32] Liquid hydrogen--the fuel of choice for space exploration. (2015). <https://www.nasa.gov/content/liquid-hydrogen-the-fuel-of-choice-for-space-exploration>

- [33] Dubois, René A. ; Roberto Perazzo ; Walter E. Triaca. “Hidrógeno y la energía del futuro.” ANCEFN,
<https://www.ancefn.org.ar/user/FILES/PUBLICACIONES/hidrogeno.pdf>.
- [34] Geier, J. (s/f). INFORME sobre una estrategia europea para el hidrógeno. Europa.eu. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2021-0116_ES.html
- [35] Pérez, L. (s/f). Métodos de almacenamiento del hidrógeno. Synerhy.com.
<https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/>
- [36] Physical hydrogen storage. (s/f). Energy.gov.
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage>
- [37] Confinamiento del hidrógeno. (s/f). Energiasostenible.net.
http://www.energiasostenible.net/almacenamiento_y_transporte_de_hidrog.htm
- [38] Stochl, R. J., & Knoll, R. H. (s/f). Thermal performance of a liquid hydrogen tank multilayer insulation system at warm boundary temperatures of 630, 530 and 152 °R. Nasa.gov.
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19910015845/downloads/19910015845.pdf>
- [39] Nachtane, M., Tarfaoui, M., Abichou, M. A., Vetcher, A., Rouway, M., Aâmir, A., Mouadili, H., Laaouidi, H., & Naanani, H. (2023). An overview of the recent advances in composite materials and artificial intelligence for hydrogen storage vessels design. *Journal of Composites Science*, 7(3), 119.
<https://doi.org/10.3390/jcs7030119>
- [40] Baquero, R. P. (2019, julio 23). *Almacenamiento de Hidrógeno*. ARIEMA; ARIEMA Energía y Medioambiente. <https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2>
- [41] Ilaria Lucentini, Producción de hidrógeno a partir de amoníaco en reactores de paredes catalíticas. Institut de Tècniques Energètiques, Departament d'Enginyeria Química, Universitat Politècnica de Catalunya. 2021, Octubre.
- [42] Miranda, Paulo Emilio, editor. *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies: Hydrogen Production and Practical Applications in Energy Generation*. Elsevier Science, 2018. Páginas 221-236.

- [43] Assessment of hydrogen delivery options. (s/f). Europa.eu. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/system/files/2021-06/jrc124206_assessment_of_hydrogen_delivery_options.pdf
- [44] Blanco, H. (2022, mayo 5). What's best for Hydrogen transport: ammonia, liquid hydrogen, LOHC or pipelines? Energy Post. <https://energypost.eu/whats-best-for-hydrogen-transport-ammonia-liquid-hydrogen-lohc-or-pipelines/>
- [45] Emonts, Bernd, and Detlef Stolten, editors. Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems, and Technology. Wiley, 2016. Páginas 59-80.
- [46] Cde, B. 2. (2022, julio 19). HORIZONTE EUROPA: Desarrollo de la contención de LH2 a gran escala para el transporte marítimo. CDE Almería - Centro de Documentación Europea - Universidad de Almería; Centro de Documentación Europea de Almería. <https://www.cde.ual.es/horizonte-europa-desarrollo-de-la-contencion-de-lh2-a-gran-escala-para-el-transporte-maritimo/>
- [47] Sankir, Nurdan Demirci, and Mehmet Sankir, editors. Hydrogen Storage Technologies. Wiley, 2018. Páginas 4-33.
- [48] Berger, M. (2018, octubre 22). MOF Metal Organic Framework - definition, fabrication and use. Nanowerk.com. <https://www.nanowerk.com/mof-metal-organic-framework.php>
- [49] Hidroductos: las “autopistas” necesarias para conseguir una verdadera economía del hidrógeno. (2023, enero 30). Good New Energy; Enagas. <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/hidroductos-las-autopistas-necesarias-para-conseguir-una-verdadera-economia-del-hidrogeno/>
- [50] PRECISION FLUID CONTROLS. (2021, agosto 18). ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN VECTORES DE HIDRÓGENO ORGÁNICO LÍQUIDO (LOHC). MECotech; GISI. <https://mecotech.it/es/almacenamiento-de-hidr%C3%B3geno-en-portadores-de-hidr%C3%B3geno-org%C3%A1nico-l%C3%ADquido-lohc/>
- [51] Use of hydrogen - U.S. Energy Information Administration (EIA). (s/f). Eia.gov. <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/use-of-hydrogen.php>

- [52] Spiegel, Colleen. PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab. Elsevier Science, 2008. Páginas 12-24.
- [53] Hoxha, Dritan. Modern Devices Thermodynamics: Batteries, Fuel Cells and Supercapacitors. Arcler Education Incorporated, 2019. Páginas 99-119.
- [54] Korkees, S. (2021). Three reasons why Hydrogen Fuel Cells wont be driving our future mobility - EVSE Australia. <https://evse.com.au/blog/three-reasons-why-hydrogen-fuel-cells-wont-be-driving-our-future-mobility/>
- [55] F. Gutiérrez-Martín, M.T. Domínguez-De Juan, M. Ruiz-Pastrana, Hidrógeno electrolítico para la gestión de la red eléctrica. 2011 Marzo/Abril. https://oa.upm.es/11645/1/INVE_MEM_2011_102854.pdf
- [56] Analizan si el hidrógeno puede mejorar la gestión de la red eléctrica. (s/f). Agencia SINC. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Analizan-si-el-hidrogeno-puede-mejorar-la-gestion-de-la-red-electrica>
- [57] Prometeo project. (s/f). Prometeo-Project.Eu. <https://prometeo-project.eu/>
- [58] de Benito, J. L. (2023, enero 9). HIDROGENERAS 2023: Dónde están y cómo funcionan las estaciones en las que cargar un coche de hidrógeno. Movilidad Eléctrica. <https://movilidadelectrica.com/hidrogeneras-2023-donde-estan-y-como-funcionan-las-estaciones-en-las-que-cargar-un-coche-de-hidrogeno/>
- [59] “Hydrogen from renewable power.” International Renewable Energy Agency (IRENA). Septiembre 2018.
- [60] Schoenfish, M., & Dasgupta, A. (s/f). Grid-Scale Storage. IEA. <https://www.iea.org/reports/grid-scale-storage>
- [61] Hydrogen Roadmap Europe: A Sustainable Pathway for the European Energy Transition. Publications Office of the European Union, 2016.
- [62] El hidrógeno verde: la energía del futuro clave en la descarbonización. (s/f). Acciona.com. https://www.acciona.com/es/hidrogeno-verde/?_adin=11551547647
- [63] El hidrógeno verde ¿la clave para descarbonizar la industria? (s/f). Sostenibilidad.com. https://www.sostenibilidad.com/desarrollo-sostenible/hidrogeno-verde-descarbonizar/?_adin=11551547647

- [64] Reducing greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles in Europe. (2022, agosto 31). European Environment Agency.
<https://www.eea.europa.eu/publications/co2-emissions-of-new-heavy>
- [65] Ramón Roca, Iberdrola inaugura en Puertollano la mayor planta de hidrógeno verde de Europa para uso industrial. 2022, Mayo 13. Elperiodicodelaenergia.com.
<https://elperiodicodelaenergia.com/el-volante-de-inercia-quiere-liderar-el-mercado-de-almacenamiento-de-energia-renovable/#:~:text=Los%20volantes%20de%20inercia%20son,de%20nuevo%20en%20el%20sistema>
- [66] Resumen ejecutivo – World Energy Outlook 2022 – Analysis. (s/f). IEA.
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary?language=es>
- [67] “PERSPECTIVAS DE DESARROLLO DE UN MERCADO GLOBAL DE HIDRÓGENO.” Orkestra Instituto Vasco de Competitividad, 16 September 2020,
<https://www.orkestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/210006-Perspectivas-desarrollo-mercado-global-hidr%C3%B3geno-COMPLETO.pdf>
- [68] Executive summary – Global Hydrogen Review 2021 – Analysis. (s/f). IEA.
<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021/executive-summary>
- [69] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico - Centrales Nucleares en España. (s/f). Gob.es.
<https://energia.gob.es/nuclear/Centrales/Espana/Paginas/CentralesEspana.aspx>
- [70] Page, D. (2023, abril 15). España avanza hacia el apagón nuclear y descarta retrasar los cierres de centrales. El Periódico de España.
<https://www.epe.es/es/activos/20230415/espana-avanza-apagon-nuclear-cierre-centrales-86017223>
- [71] Corporativa, I. (s/f). Iberdrola construye la mayor planta de hidrógeno verde para uso industrial en Europa. Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/puertollano-planta-hidrogeno-verde>

- [72] City of Lancaster, CA. (2023, enero 24). Element Resources to build one of California's largest renewable hydrogen production facilities in the City of Lancaster, CA. PR Newswire. <https://www.prnewswire.com/news-releases/element-resources-to-build-one-of-californias-largest-renewable-hydrogen-production-facilities-in-the-city-of-lancaster-ca-301728691.html>
- [73] Resiliencia, I., & Prieto, P. (2020, diciembre 7). Un breve análisis de la eficiencia de ciclo completo de la economía del hidrógeno verde. 15/15\15; Instituto Resiliencia. <https://www.15-15-15.org/webzine/2020/12/07/un-breve-analisis-de-la-eficiencia-de-ciclo-completo-de-la-economia-del-hidrogeno-verde/>
- [74] Hidrógeno verde 3. (s/f). Afs-services.com. <https://afs-services.com/hidrogeno-verde-3/>
- [75] Verbo, M. L. (2020, julio 24). Iberdrola pone en marcha la mayor planta de hidrógeno verde de Europa. Expansion. <https://www.expansion.com/empresas/energia/2020/07/24/5f1aa9d6468aebc0518b4572.html>
- [76] *Precio del Hidrógeno*. (2021, febrero 22). Hidrogeno verde. <https://hidrogeno-verde.es/precio-del-hidrogeno/>
- [77] De Aragón, E. (2021, noviembre 30). El coste del hidrógeno verde podría bajar de 1,8 €/kg en 2030. Hidrogeno verde. <https://hidrogeno-verde.es/coste-del-hidrogeno-verde/>
- [78] "Hydrogen Insights." 2021, Febrero. Hydrogen Council, <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf>

ANEXO I

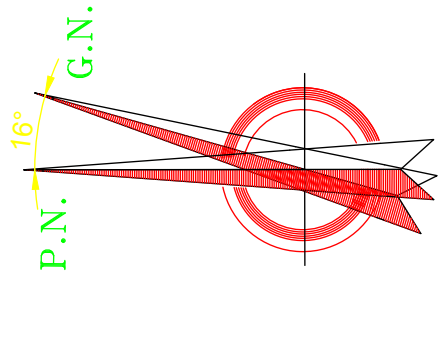
En este apartado se mostrarán los diseños de planta discutidos en el Capítulo 8. Para comenzar se enseñarán algunas imágenes de planta reales que han sido inauguradas (Iberdrola en Puertollano) o están en periodo de diseño (Element Resources en California). El primer diseño de una planta que se enseñará será el de una planta de 5 MW situada en Bahía de Algeciras, seguido de varios planos de una planta de 6 MW situada en Tenerife.



Planta de Element
Resources en
Lancaster,
California
(Estados Unidos
de América)

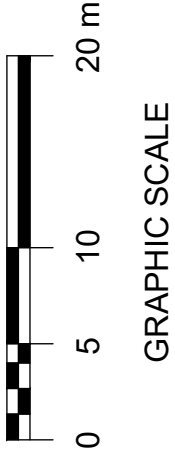


Planta de
Iberdrola en
Puertollano,
Ciudad Real
(España)



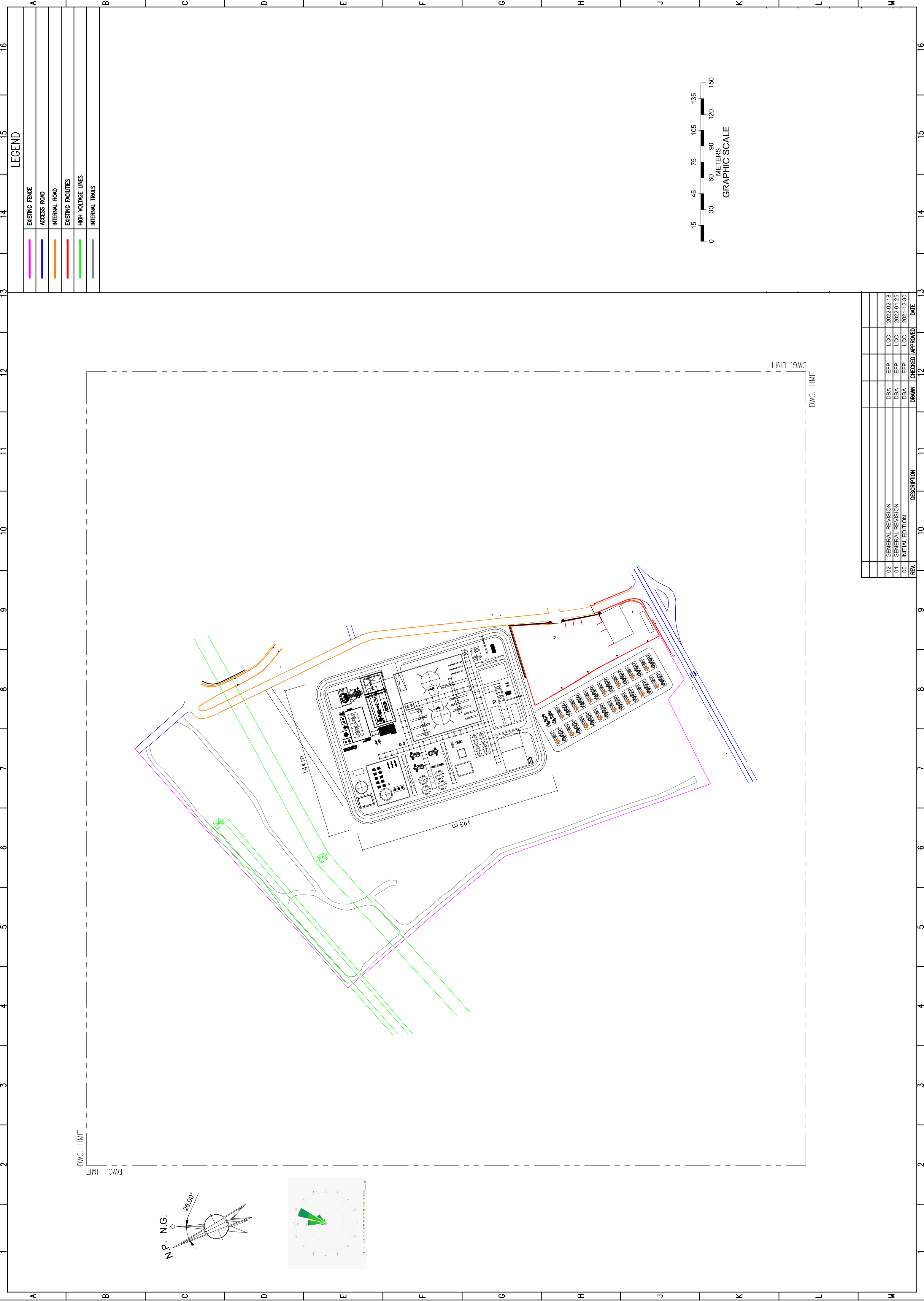
G.N.: GEOGRAPHIC NORTH
P.N.: PLANT NORTH

TP-008

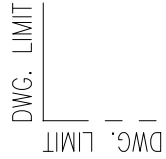


LEYENDA	
ITEM	DESCRIPCIÓN
1	EDIFICIO ELÉCTRICO Y DE CONTROL
2	ELECTROLIZADOR Y RECTIFICADOR
3	ARQUETA DE CONTROL DE EFLUENTES
4	PARKING
5	COMPRESORES DE HIDRÓGENO
6	TANQUES DE HIDRÓGENO
7	PTA
8	SISTEMA DE PCI
9	TANQUE DE AGUA BRUTA
10	TANQUE DE AGUA DEMI
11	EDIFICIO DE SERVICIOS AUXILIARES/ALMACÉN
12	SISTEMA DE REFRIGERACIÓN
13	ADMINISTRACIÓN
14	CONTROL DE ACCESO
15	ÁREA RESERVADA DE CONTRATAS
16	RACK DE TUBERÍAS
17	ACCESO PRINCIPAL
18	SALIDA DE EMERGENCIA
19	ACCESO VEHÍCULOS DE EMERGENCIA
20	ESPACIO RESERVADO PARA GENERADOR ELÉCTRICO DE EMERGENCIA
21	MEDIDOR FISCAL
22	BUFFER TANK
23	O2 PURIFICATION SYSTEM

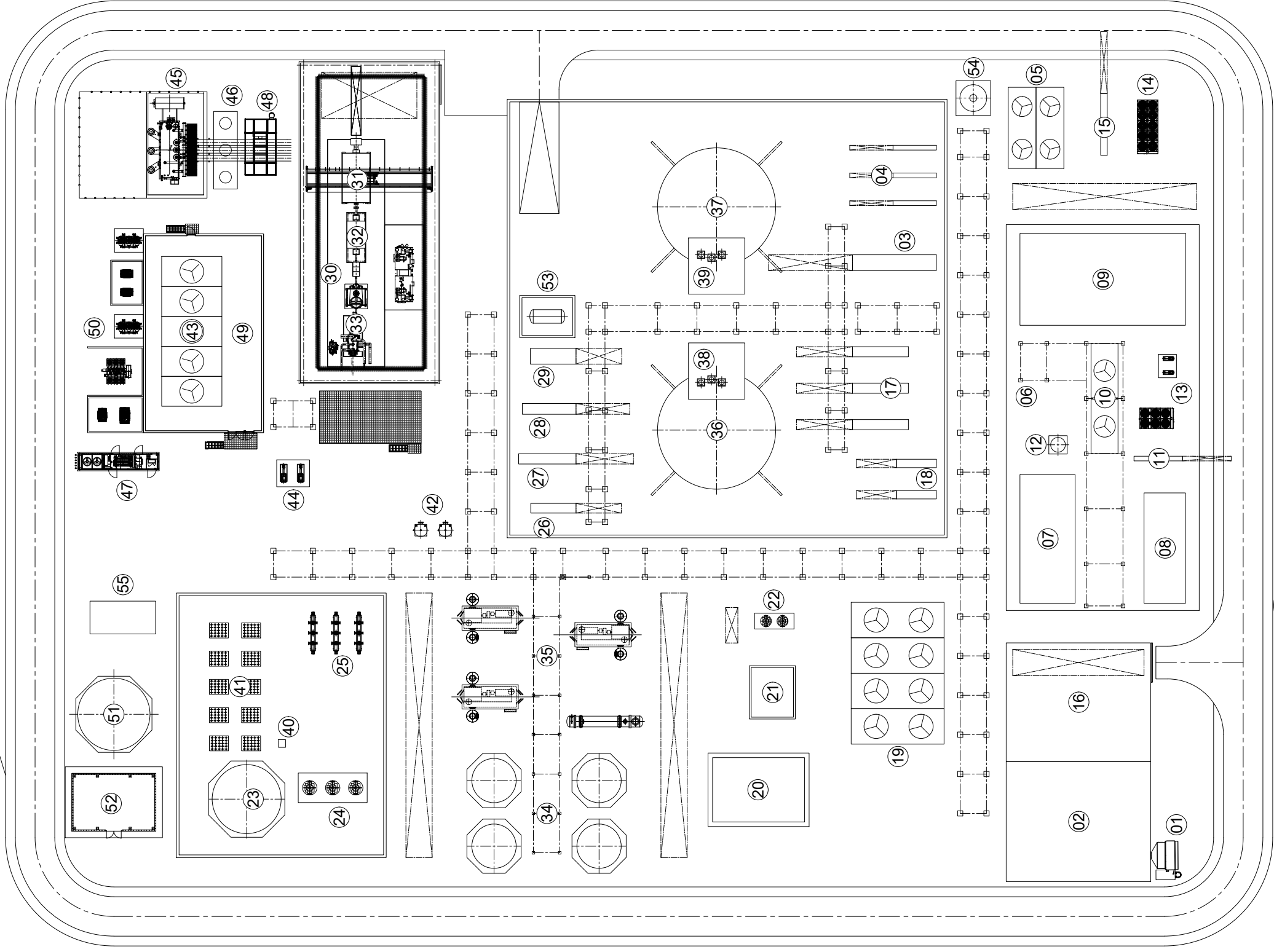
- LÍNEA H2
- LÍNEA O2
- LÍNEA ELÉCTRICA AÉREA
- LÍNEA ELÉCTRICA ENTERRADA
- RED DE EFLUENTES
- RED DE PLUVIALES
- RED DE AGUA BRUTA
- RED DE AGUA DEMI
- LÍNEA NITRÓGENO
- AIRE COMPRIMIDO



REV.	DESCRIPTION	DRAWN	CHECKED	APPROVED	DATE
02	GENERAL REVISION	DBA	EFF	LCC	2022-02-18
01	GENERAL REVISION	DBA	EFF	LCC	2022-01-25
00	INITIAL EDITION	DBA	EFF	LCC	2021-12-30



144 m



193 m



DWG. LIMIT

[illegible]

ITEM	DESCRIPTION
01	MAIN AIR INLET FILTER
02	MAIN AIR COMPRESSOR (MAC) BUILDING
03	MAC RECOVERY HEAT EXCHANGER
04	MAC RECUPERATOR HEAT EXCHANGER
05	MAC BALANCE COOLER
06	AIR PURIFICATION UNIT (APU)
07	PRIMARY APU UNIT (PA)
08	SECONDARY APU UNIT (SA)
09	SA COMPRESSORS (SAC)
10	SAC HR AIR COOLER
11	SA SUBCOOLER
12	SA KOD
13	150 TR CHILLER & PUMPS
14	230 RT CHILLER
15	APU INLET COOLER
16	RECYCLE AIR COMPRESSOR (RAC) BUILDING
17	RAC HEAT RECOVERY HEAT EXCHANGER
18	RAC RECUPERATOR HEAT EXCHANGER
19	RAC BALANCE COOLER
20	CRYOGENIC EXPANDER
21	COLD BOX (CB)
22	CRYOGENIC TRANSFER PUMPS
23	LIQUID AIR STORAGE VESSEL
24	CRYOGENIC FEED PUMP
25	EVAPORATOR
26	HEAT EXCHANGER 1 (HX01)
27	HEAT EXCHANGER 2 (HX02)
28	HEAT EXCHANGER 3 (HX03)
29	HEAT EXCHANGER 4 (HX04)
30	POWER RECOVERY UNIT (PRU) BUILDING
31	GENERATOR PRU
32	FLYWHEEL PRU
33	TURBINE PRU
34	HIGH GRADE COLD STORE (HGCS) VESSELS
35	HIGH GRADE COLD STORE (HGCS) BLOWERS
36	HTTS HOT TANK
37	HTTS COLD TANK
38	HTTS HOT CIRCULATION PUMPS
39	HTTS COLD CIRCULATION PUMPS
40	LIQUID AIR STORAGE PRESSURE RAISING VAPORISER
41	INSTRUMENTAL/SEAL GAS AMBIENT AIR HEATER
42	COMPRESSED AIR TANKS
43	MACHINERY COOLING SYSTEM BALANCE COOLER
44	MACHINERY COOLING SYSTEM PUMP SET
45	GSU TRANSFORMER
46	CURRENT LIMITING REACTOR
47	EMERGENCY DIESEL GENERATOR
48	GENERATOR CIRCUIT BREAKER
49	ELECTRICAL BUILDING
50	AUXILIARY TRANSFORMERS
51	FIRE FIGHTING TANK
52	FIRE FIGHTING PUMPS BUILDING
53	MOLTEN SALT DRAINAGE TANK
54	APU INLET KNOCK-OUT DRUM
55	WORKER SPACE (50m2)
56	BEES

