

Revisión sistemática de los factores que incidirían en la distribución del hidrógeno verde en el Valle del Cauca

A systematic review of the factors that would affect the distribution of green hydrogen in Valle del Cauca


Jenny Fernanda Díaz-Gómez¹, José Daniel Artunduaga-Cárdenas², Sebastián Hoyos-Martínez³, Diana Milena Caicedo-Concha⁴

Díaz-Gómez, J.F.; Artunduaga-Cárdenas, J.D; Hoyos-Martínez, S; Caicedo-Concha, D.M. Revisión sistemática de los factores que incidirían en la distribución del hidrógeno verde en el Valle del Cauca. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, número especial. Julio, 2024. XI Congreso Internacional en Inteligencia Ambiental, Ingeniería de Software, Salud Electrónica y Móvil (AmITIC). Pág. 98-107.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i6.7272>

1 Estudiante de Ingeniería Industrial. Universidad Cooperativa de Colombia, Campus Cali, Colombia

 jenny.diazgomez@campusucc.edu.co

 <https://orcid.org/0009-0007-9368-6783>

2 Estudiante de Ingeniería Industrial. Universidad Cooperativa de Colombia, Campus Cali, Colombia.

 jose.artunduagaca@campusucc.edu.co

 <https://orcid.org/0009-0005-6383-5544>

3 Estudiante de Ingeniería Industrial. Universidad Cooperativa de Colombia, Campus Cali, Colombia.

 sebastian.hoyosm@campusucc.edu.co

 <https://orcid.org/0009-0004-8048-4232>

4 Profesora titular de la Universidad Cooperativa de Colombia, e investigadora asociada Universidad Cooperativa de Colombia, Campus Cali, Colombia.

 diana.caicedoc@campusucc.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0003-4031-4568>

Palabras clave

Hidrógeno verde; biomasa; almacenamiento de hidrógeno; transporte de hidrógeno; bagazo de caña; energía sostenible.

Resumen

El hidrógeno se ha convertido en objeto de estudio como combustible para generar energía a través de fuentes renovables como la biomasa, desempeñando un elemento importante en el contexto de la transición hacia una economía con bajas emisiones de carbono. De esta manera, se presentan desafíos para la aplicación de este combustible como lo son los elementos logísticos para considerar en los proyectos que se buscan implementar. La presente propuesta de estudio se enfoca en una revisión para analizar factores de distribución del hidrógeno verde aplicado específicamente al uso de bagazo de caña que se genera en el Valle del Cauca, analizando entre los métodos de almacenamiento como el hidrógeno comprimido o de forma líquida, así mismo el transporte por medio de alternativas como las tuberías o tanques de gas comprimido.

Keywords

Green hydrogen; biomass; hydrogen storage; hydrogen transportation; sugarcane bagasse; sustainable energy.

Abstract

Hydrogen has become an object of study as a fuel to generate energy through renewable sources such as biomass, playing an important element in the transition towards a low-carbon economy. In this way, challenges arise for applying this fuel, such as the logistical elements to consider in the projects sought to be implemented. The present study proposal focuses on analyzing distribution factors of green hydrogen applied specifically to sugarcane bagasse generated in Valle del Cauca, analyzing between storage methods such as compressed or liquid hydrogen and transportation through alternatives such as compressed gas pipes or tanks.

Introducción

La crisis ambiental actual del planeta ocasionada en gran medida por la emisión de gases de efecto invernadero debido a la dependencia a los combustibles fósiles, que constituyen el 80% de la energía actual [1](IEA, 2022), ha creado la necesidad de buscar nuevos sistemas de producción de energía que tengan poca o nula emisión de estos gases contaminantes, por medio de innovaciones fuentes energéticas como el hidrogeno, contemplando su eficiencia energética y las etapas de la cadena de valor que puedan escalarse de manera nacional e internacional [2]. (Bill Gates, 2021)

El hidrógeno como elemento representa un gran potencial en múltiples ámbitos de aplicación, entre estos, la generación de una energía limpia y no contaminante. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, IEA, la demanda del hidrógeno como fuente de energía podría alcanzar los 115 Mt o Megatoneladas, para el año 2030, aportando significativamente en el objetivo global de cero emisiones [1].

A partir de la importancia del hidrógeno visualizada para el futuro energético, algunos países han estructurado planes con las iniciativas a corto y largo plazo. Para el caso de Colombia, la Hoja de Ruta de Hidrógeno emitida por el Ministerio de Minas y Energías, propone una

estrategia de transición energética, como compromiso al objetivo de alcanzar la neutralidad del carbono; esta presenta cinco pilares importantes que son: reducción de emisiones, crecimiento económico, transición justa, objetivo de país y comunidades locales [3].

Existen diferentes maneras de obtener hidrógeno a través de procesos fisicoquímicos, unos más eficientes que otros, de acuerdo con la IEA, el hidrógeno puede contribuir a la seguridad energética y acción en favor del clima debido a que comprende un ciclo de bajas emisiones. [1]. El hidrógeno se puede obtener de diferentes fuentes, y se clasifica por colores como el hidrógeno gris, que proviene de los hidrocarburos, el hidrógeno azul a partir del agua, y el hidrógeno verde proveniente de fuentes no convencionales como la biomasa, aprovechamientos hidroeléctricos y calor geotérmico [3].

La aplicación del hidrógeno puede estar en varios sectores, como energía eléctrica renovable para el uso de las industrias, el gas, la química, la movilidad o la electricidad. Cada uso implica un desafío logístico que puede ser más o menos complejo, de acuerdo con la infraestructura actual [4].

Para caracterizar las alternativas de almacenamiento y transporte, en el presente artículo se propone una revisión sistemática de las investigaciones e información disponible que se ha publicado durante los últimos años, esto con el fin de sintetizar la información que se aplica a la región del Valle del Cauca y facilite futuros análisis de viabilidad en la energética del hidrógeno verde como combustible producido por medio de biomasa. Para el Valle del Cauca que actualmente cuenta con 13 ingenios en su territorio, el bagazo representa un potencial energético, debido a que el 30% de la caña procesada para azúcar, se convierte en bagazo, que funciona como biomasa para la producción de hidrógeno [5].

Materiales y métodos

Teniendo en cuenta que el presente artículo corresponde a una investigación de tipo cualitativo con la revisión sistemática de la información disponible, se aplicará una metodología PRISMA para la revisión de la literatura, involucrando una evaluación exhaustiva para determinar la idoneidad de la información y estudios relacionados.

Se realiza una búsqueda inicial, combinando los términos “Hydrogen” y “transport” y “storage” en las bases de datos Scopus y Science-Direct, arrojando una cantidad considerable de resultados, brindando una visión general de la temática a nivel global.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo que representa la información en las fases de la revisión inicial realizada de manera sistemática, esta herramienta muestra la cantidad de recursos identificados, incluidos y descartados tomado como referencia la plantilla disponible en PRISMA [6].

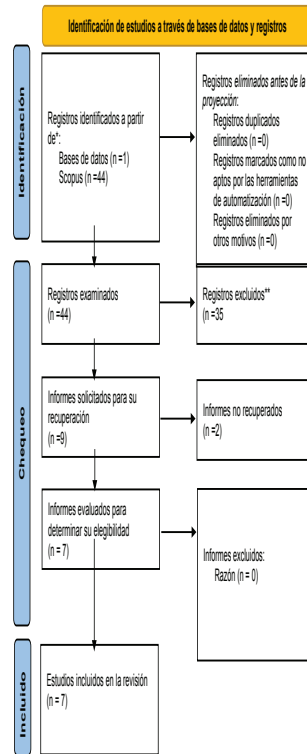


Figura 1. Diagrama Prisma.

Se consideran dentro de la búsqueda sistemática 44 publicaciones, depurando aquellos cuyos títulos y resúmenes se enfocarán en el objetivo de esta investigación, a través de los siguientes criterios o paso a paso:

- Tipología del documento haciendo énfasis en “artículos” y “resúmenes”
- Fecha de publicación de los documentos a partir del año 2020 hasta el 2023.
- Países que presentan similitudes geográficas a las de nuestro territorio nacional.
- Que contenga información técnica de los métodos de almacenamiento.
- Contemplan estudios de casos.
- Que estudie varios métodos de almacenamiento, mencionando sus ventajas y desventajas.
- Que presente las alternativas de transporte de hidrógeno actuales.
- Que incluya costos y aspectos adicionales de investigación.
- Que describa los aspectos de cadena de suministro del hidrógeno.

Para el desarrollo de la investigación aplicada al sector de ingenios azucareros se analizan los proyectos piloto en campo de producción que lideran a nivel nacional las investigaciones a nivel nacional respecto a la producción de hidrógeno. Por lo anterior se propone esta revisión como insumo para las siguientes actividades:

- Identificar los parámetros fundamentales del hidrógeno como combustible tales como, inflamabilidad, fluidez, presión y temperatura.
- Revisar la literatura en alternativas de almacenamiento y transporte de hidrógeno para identificar las características de recubrimientos y materiales de las opciones actuales.

- Identificar y comparar las alternativas de almacenamiento y transporte que conserven la densidad energética del hidrógeno como combustible.
- Revisar la literatura de alternativas de almacenamiento y transporte de hidrógeno para identificar los costos de las opciones actuales.
- Evaluar las alternativas de almacenamiento y transporte identificadas, teniendo en cuenta las condiciones ambientales (humedad, presión, temperatura), topográficas y potencial de producción de hidrógeno del Valle del Cauca.
- Analizar la oferta y demanda de hidrógeno verde a partir del bagazo de caña en la región del Valle del Cauca.

El hidrógeno en Colombia

Colombia demuestra una dependencia energética actual de un 75% de combustibles fósiles, que, aunque ha dado lugar al desarrollo económico del país, representa un desafío ante las emisiones generadas y los compromisos ambientales adquiridos internacionalmente [7].

Los proyectos piloto son un primer paso para un despliegue a mayor escala y creación de cadenas de valor locales. La iniciativa gubernamental ha dado pie al desarrollo a varios proyectos piloto de Hidrógeno verde en Colombia, el sector privado ha realizado inversiones como base, principalmente utilizando electrolizadores, un ejemplo es el electrolizador de 50 kW en la refinería de Cartagena, desarrollado por Ecopetrol e Instituto Colombiano de Petróleo, también se hace visible la colaboración entre Ministerio de Ciencia, Ecopetrol y Tecnología e innovación de Colombia, estos proyectos representan un punto de partida para evaluar la tecnología y estado actual del país [8].

El Valle del Cauca es un departamento caracterizado por la producción de azúcar a gran escala generando como residuo agrícola el bagazo de caña correspondiente a un 30% de la caña utilizada, que podría ser insumo para la producción de hidrógeno verde, por medio de procesos físicos químicos como la pirolisis. Para esto, es necesario considerar los factores de distribución específicamente el almacenamiento y transporte en el contexto económico, logístico y de infraestructura que se encuentra en el Valle del Cauca; analizando distintas alternativas de almacenamiento y transporte con las que se cuenta actualmente, y teniendo en cuenta las tendencias tecnológicas y eficientes en un Nivel de Madurez Tecnológico, TRL, global que presenta un entre 3 para las tecnologías de almacenamiento físico y 5 para el hidrógeno líquido y 6 para el transporte por tuberías [9].

Considerando la demanda mundial y el potencial de producción que presentan los países de América Latina, desde la Agencia Internacional de Energía se propone el análisis de un escenario colaborativo utilizando la infraestructura de interconexión existente para el caso del gas natural, pues esto permitiría abordar de manera directa los obstáculos de desplegar la producción, distribución y comercialización del hidrógeno a gran escala en sus múltiples aplicaciones. En este escenario colaborativo la región de América Latina se vuelve una región con potencial de exportación, para el caso de Colombia, su ubicación geográfica podría considerar un papel clave en esta economía energética [8].

Almacenamiento y transporte de hidrógeno

Almacenamiento de Hidrógeno

El almacenamiento del hidrógeno es fundamental en la cadena de suministro para garantizar una estabilidad en la industria y sostener la eficiencia de la producción. Para establecer una infraestructura de hidrógeno estable e íntegra, se debe tener en cuenta los siguientes principales factores para caracterizar un sistema de almacenamiento de hidrógeno adecuado [10].

- Densidad gravimétrica (5,5%)
- Densidad volumétrica (0,04 kg H₂/l)
- Temperatura (-40° a 60°C)
- Ciclo de vida (1500 ciclos)
- Tiempo de llenado del Sistema

Después de producido el hidrógeno existen diferentes métodos con los que este se almacena y transporta. Los sistemas de almacenamiento se pueden definir en físicos, basado en materiales portadores que se pueden unir a los átomos de hidrógeno, y almacenamiento físico o químico que contribuyen a la densidad y seguridad según corresponde [11].

Almacenamiento de hidrógeno comprimido (CGH₂): el hidrógeno en estado gaseoso normalmente es almacenado bajo altas presiones dentro de un rango entre 200 y 700 bar, este método implica almacenar hidrógeno en cilindros o tanques a alta presión, que contienen un revestimiento interior hecho de polímero cubierta con fibra continua de grafito y capas de reforzamiento. Estos tanques son usados de manera efectiva para el gas metano a alta presión y se busca extender la aplicación a tanques de hidrógeno, sin embargo, es necesario desarrollar una barrera que no permita la permeabilidad del hidrógeno [12].

El almacenamiento de hidrógeno comprimido tiene una densidad energética relativamente baja en comparación con otros métodos de almacenamiento. Según el Departamento de Energía de los Estados Unidos, el almacenamiento de hidrógeno comprimido a 350 bar tiene una densidad energética de aproximadamente [13].

Este método de almacenamiento presenta grandes retos correspondientes a la baja densidad energética que puede presentar, el coste del sistema y la resistencia de impacto; como base a la tecnología se referencia los tanques usados para almacenar metano a alta presión. Existen varios proyectos de diseños de tanques que consideran los atributos del hidrógeno en empresas y universidades que implementan una tecnología compatible con las propiedades del hidrógeno [12].

Dentro de este método de almacenamiento se encuentran distintas alternativas como los recipientes a presión y almacenamiento subterráneo; el tipo de recipiente a utilizar dependería del campo de aplicación, equilibrando el rendimiento técnico y costo, es ideal para el almacenamiento in situ como un gas para las industrias, existen 4 tipos de recipientes Tipo I,II, III,IV que los diferencia principalmente el material y los recubrimientos que estos pudieran tener; algunos de estos son ideales para un almacenamiento estacionario a baja presión en estaciones de servicio, y los demás son ideales para almacenamiento de alta presión facilitan el transporte en remolque para el tipo III y IV [11].

El otro tipo de almacenamiento en esta categoría es el subterráneo, donde se usan cavernas naturales de sal, acuíferos y depósitos de gas existentes y agotados, se usa en el almacenamiento a largo plazo y con gran volumen. Para esta alternativa es necesario evaluar las condiciones geológicas ideales, pues vienen en juego criterios y aspectos que permitan el sellamiento

correcto en las cavidades mencionadas. Existe un mayor riesgo de fugas o fallas debido a la característica porosa de estas cavernas y reacciones químicas con minerales de las rocas. Yang expone la lista algunos países que tienen proyectos en este tipo de almacenamiento, en los que se encuentra el Reino Unido y Estados Unidos, Alemania, Francia, República Checa, Austria y Argentina, este último usando una reserva de gas natural agotada y que es aprovechada para disponer del hidrógeno producido [11]. (Yang et al., 2023)

Almacenamiento de hidrógeno líquido: el hidrógeno en su estado líquido, conocido como hidrógeno criogénico, se obtiene por medio de la licuefacción que se genera al modificar las condiciones de presión y temperatura, Fernández Bolaños explica el proceso de licuefacción donde se utilizan sistemas de compresión, intercambiadores de calor y válvulas de expansión, el proceso de licuefacción funciona en gases como el nitrógeno que solo es de a comparación de los que tiene el hidrógeno [12].

En este método permite una densidad gravimétrica y volumétrica mucho más alta comparado a su forma comprimida hasta cuatro veces más denso. Sin embargo, implica un proceso con mayor complejidad, pues consume mayor energía que la compresión del hidrógeno, teniendo en cuenta que se requieren temperaturas muy bajas, alrededor 20K [14] [11].

El hidrógeno líquido ocupa mucho menos espacio que el hidrógeno gaseoso, lo que lo hace adecuado para aplicaciones donde se requieren grandes cantidades, especialmente en las industrias. El almacenamiento de hidrógeno en forma líquida a temperaturas muy bajas puede ser costoso debido a la necesidad de mantener estas temperaturas criogénicas.

El almacenamiento de hidrógeno líquido tiene una densidad energética mucho mayor que el almacenamiento de hidrógeno comprimido, el hidrógeno a 20 K de temperatura tiene una densidad energética de aproximadamente . Los tanques criogénicos utilizados en esta alternativa cuentan con una tecnología que evoluciona para hallar una eficiencia en el proceso, este presenta un desafío frente a la pérdida de ebullición y el consumo de energía asociado. [15].

Alemania es un país pionero en este tipo de almacenamiento, actualmente tienen una planta de licuefacción de hidrógeno con capacidad de 5.5 toneladas métricas por día, mTPD, desde el 2007, este sistema consume alrededor de 10kWh de electricidad para licuar 1 kg de hidrógeno, este consumo de energía se podría reducir si se aumenta la capacidad de producción a 100 mTDP, favoreciendo en gran manera los costos asociados a este tipo de almacenamiento [11].

Almacenamiento de hidrógeno en materiales sólidos: este método implica almacenar hidrógeno en materiales sólidos, como hidruros metálicos, que liberan hidrógeno cuando se calientan. Este tipo de almacenamiento tiene la ventaja de que los materiales sólidos son más seguros que el hidrógeno gaseoso o líquido y pueden ser transportados y almacenados más fácilmente. Además, el uso de hidruros metálicos para almacenar hidrógeno puede ser más económico que otras formas de almacenamiento [14].

El almacenamiento de hidrógeno en materiales sólidos, como hidruros metálicos, también puede tener una densidad energética alta, dependiendo del material utilizado, se ha informado que algunos hidruros metálicos tienen una densidad energética de aproximadamente [15].

Según los análisis anteriores, cada método de almacenamiento tiene sus propias ventajas y desventajas en términos de eficiencia de almacenamiento, costo y seguridad. Por ejemplo, el almacenamiento de hidrógeno líquido puede ser más eficiente en términos de densidad energética, pero también puede ser más costoso debido a la necesidad de mantener temperaturas criogénicas. El almacenamiento de hidrógeno comprimido es comúnmente utilizado debido a su bajo costo, pero también tiene limitaciones en términos de densidad energética y seguridad.

Almacenamiento en otros portadores: existen además tecnologías de almacenamiento de hidrógeno combinado química o físicamente con materiales líquidos orgánicos como portadores, cuyos enlaces permiten almacenar las moléculas de hidrógeno con reacciones químicas de hidrogenación y deshidrogenación. Este método cuenta con ventajas como la seguridad y la facilidad en el transporte, de igual manera brinda una estabilidad química que permite menor consumo de energía en la deshidrogenación, para esta alternativa se cuenta con una infraestructura madura para el almacenamiento de tipos de gases similares [11].

De acuerdo con Yang, otras propiedades además a considerar además de la densidad de almacenamiento son: baja temperatura de disociación y presión, bajo calor de formación para minimizar la energía, estabilidad del ciclo, bajo costos de infraestructura de reciclaje y carga [11].

Transporte de Hidrógeno

El hidrógeno se considera una sustancia química peligrosa por su inflamabilidad y su cuidadosa reacción con otras sustancias, por lo tanto, debe analizarse los métodos de transporte que se encuentran disponibles y en desarrollo para la cadena de distribución de esta sustancia y que aporten a la sostenibilidad de la economía del H₂ [15].

Es así como actualmente existen dos categorías principales las cuales se basan en los sistemas de transporte: por carretera, por gasoductos.

Transporte por carretera: El transporte por carretera presenta algunas ventajas como lo es potencial intercontinental, una cadena logística madura en tierra, para el caso de transporte de hidrógeno en forma gaseosa comprimido la presión del hidrogeno normalmente se mantiene entre 20 y 50 MPa, lo que significa que puede transportarse entre 200 y 1000 kg de hidrogeno. [11].

Para este método se puede considerar el hidrógeno en composición física tanto gaseoso como líquido, para el caso del gas comprimido, el transporte en recipientes a presión es una forma sencilla de transporte considerando los tipos mencionados en el apartado del almacenamiento. Así mismo para el hidrógeno en forma líquida, el suministro mediante remolques, Yang presenta el caso de una planta de licuefacción central que es transportada en cantidades mayores a comparación del hidrógeno gaseoso [11].

Transporte por gasoductos: también conocido como transporte por tuberías, en el cual el hidrogeno Está en estado gaseoso, siendo la forma más económica de transportar grandes cantidades y así satisfacer las grandes demandas en regiones densamente pobladas e industrializadas. Pero a causa de la caída de presión en las tuberías a larga distancia, la densidad de almacenamiento puede reducirse, el transporte de hidrogeno es menos eficiente energéticamente que el del gas natural [11].

Este método es una opción que presenta un gran potencial para distribuir el hidrógeno, pues se puede entrar al análisis de la infraestructura actual de la red de gas natural existente, para el cual se deberá analizar el cálculo del número de Reynolds para caracterizar el movimiento del fluido del hidrógeno en los conductos dispuesto que se tendrá en la inyección del hidrógeno, esto con base a las propiedades de este elemento adquiridas en la gasificación. De igual manera, al considerar una mezcla inicial con gas natural se podrán reducir las emisiones convencionales de los hidrocarburos. En países europeos como Alemania, se considera esta opción en mezcla de pequeñas proporciones entre el gas y el hidrógeno [4].

Conclusiones

Actualmente existen diversas investigaciones y publicaciones relacionadas al hidrógeno y su potencial energético, para el análisis de los componentes logísticos de distribución del hidrógeno, dentro de la revisión se encontraron tres métodos principales que dependen de la estructuración física y química que puede tener el hidrógeno.

El hidrógeno en su fase gaseosa da lugar al método de almacenamiento en tanques de gas comprimido y al mismo tiempo al transporte por tubería, en el que se analiza la infraestructura de gasoducto actual que tiene la región del Valle del Cauca que cuenta con gasoductos que requieren el análisis de compatibilidad, donde se hace necesario; este método hasta el momento se considera uno de los más viables por los costos asociados, sin embargo, los aspectos de seguridad y eficiencia energética aún falta abordarlos de manera efectiva.

Para el hidrógeno en fase líquido se tienen alternativas de almacenamiento con mayor densidad energética, los costos corresponden al doble de la alternativa de gas comprimido, pero a mayor capacidad de almacenamiento y densidad energética.

Finalmente, el almacenamiento y transporte de hidrógeno en materiales sólidos y/o portadores líquidos, también representa una alternativa llamativa, pues puede tener una densidad energética alta, dependiendo del material utilizado y contienen características o ventajas representativas en la economía del hidrógeno como energía, específicamente en los costos asociados.

Aunque hay tecnología existente para el uso de hidrógeno como combustible y se han adelantado diversas investigación, el mayor desafío logístico y de viabilidad es convertir su producción y cadena de suministro a gran escala, pues actualmente los proyectos pilotos que demuestran viabilidad técnica se ven limitados por la viabilidad económica, pues al no estar masificada su producción o demanda los costos se elevan, por lo tanto según lo mencionado en el estudio de Yang, es esencial determinar una infraestructura eficiente, que conlleve a la reducción de costes y que permita su aplicación adecuada [11].

Referencias

- [1] IEA. (2022). Resumen ejecutivo – World Energy Outlook 2022 – Analysis - IEA. Paris. de: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary?language=es>
- [2] Bill Gates. (2021). Cómo evitar un desastre climático: Las soluciones que ya tenemos y los avances que aún necesitamos. <https://revistas.comillas.edu/index.php/razonyfe/article/view/17147>
- [3] Ministerio de Minas y Energía. (2021). Hoja Ruta Hidrógeno Colombia. https://www.minenergia.gov.co/documentos/5861/Hoja_Ruta_Hidrogeno_Colombia_2810.pdf
- [4] Muñoz Fernandez, J. A., Beleño Mendoza, W. A., & Diaz Consuegra, H. (2022, January 1). Análisis del potencial del uso de hidrógeno verde para reducción de emisiones de carbono en Colombia. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/13502/12564>
- [5] Asocaña. (2022). Informe de Sostenibilidad 2020-2021. <https://www.asocana.org/modules/documentos/17612.aspx>
- [6] Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *BMJ*, 339(7716), 332–336. <https://doi.org/10.1136/BMJ.B2535>
- [7] BP. (n.d.). Statistical Review of World Energy. Retrieved November 26, 2023, de: www.bp.com/statisticalreview.
- [8] IEA. (2021). Hidrógeno en América Latina De las oportunidades a corto plazo al despliegue a gran escala. Recuperado de: https://iea.blob.core.windows.net/assets/8bad1e39-1587-4770-b60a-c9368e6347ae/IEA_HydrogeninLatinAmerica_Fullreport_Spanish.pdf
- [9] Dattatray Dhawale, Mandar Risbud, Nawshad Haque, & Sarbjit Giddey. (2022). Informe preliminar propuesta bienes servicios asociados tecnologías hidrogeno verde azul Cir_10_2022. In CSIRO. Recuperado de: https://www1.upme.gov.co/ServicioCiudadano/Documents/Proyectos_normativos/Informe_preliminar_propuesta_bienes_servicios_asociados_tecnologias_hidrogeno_verde_azul_Cir_10_2022.pdf

- [10] Dutta, S. (2014). A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. In *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (Vol. 20, Issue 4, pp. 1148–1156). Korean Society of Industrial Engineering Chemistry. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.07.037>
- [11] Yang, M., Hunger, R., Berrettoni, S., Sprecher, B., & Wang, B. (2023). A review of hydrogen storage and transport technologies. *Clean Energy*, 7(1), 190–216. <https://doi.org/10.1093/ce/zkad021>
- [12] Badía, C. F.-B., & Ramón Velázquez Vila, D. (2005). *Energética del Hidrógeno. Contexto, estado actual y perspectivas de futuro*. Ubicación: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3823/>
- [13] Energy Efficiency & Renewable Energy. (n.d.). Almacenamiento de hidrógeno | Departamento de Energía. Retrieved September 2, 2023, de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
- [14] Sedai, A., Dhakal, R., Gautam, S., Sedhain, B. K., Singh Thapa, B., Moussa, H., & Pol, S. (2023). Wind energy as a source of green hydrogen production in the USA. 7(1), 8–22. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac075>
- [15] Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (n.d.). GUÍAS PARA MANEJO SEGURO Y GESTIÓN AMBIENTAL DE 25 SUSTANCIAS QUÍMICAS Libertad y Orden. https://www.minambiente.gov.co/wpcontent/uploads/2021/10/guia_manejo_25_sustancias_quimicas.pdf