

Análisis de riesgos y protocolos de seguridad en la producción de hidrógeno en la industria del
oil and gas

Andrea Manuela Rincón Vergel

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniera de Petróleos

Director

Germán González Silva

Ph. D en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería de Petróleos
Programa de Ingeniería de petróleoos
Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A Dios por sostenerme de su mano en cada momento de mi vida, por ser mi compañía y mi refugio. Que se haga siempre tu voluntad en mi vida y que en mi alma siempre este tu amor.

A mi amor más grande, mi madre: Myriam Cecilia Vergel Molina por su amor inquebrantable, por su apoyo incondicional y aliento inagotable a lo largo de este viaje académico. Gracias por creer en mi incluso más que yo, por ser luz cuando mi vida es oscuridad y por llenarme la vida de felicidad. De la mano siempre juntas, Te amo con todo mi corazón.

A mi amado padre: Andrés Rincón quien siempre ha sido un modelo de tenacidad y perseverancia, le agradezco profundamente por su apoyo constante en cada etapa de mi vida y por motivarme a dar lo mejor de mí a pesar de las dificultades. Te amo por siempre.

A mi vida entera mi tía Amalia, por ser una fuente constante de inspiración y aliento, gracias por cada oración en cada visita al santísimo, por ser guía cuando me desoriento, por tu disposición para escucharme y brindarme consejos. Tu presencia es el regalo más lindo de Dios.

A mi tío Janer, por su amor inquebrantable, por ser el ejemplo vivo del amor a la virgen. Gracias por mantenerme en tus oraciones, por alegrarte por cada triunfo y por ser fuerza cuando más lo he necesitado. Todo mi amor siempre.

Al amor de mi vida: Mamá mona, mi confidente, mejor amiga y mi razón de ser. Gracias por enseñarme que el verdadero amor traspasa cualquier límite de distancia y tiempo porque, aunque ya no estés físicamente tu amor ha sido tan grande que ha estado conmigo en cada momento. Gracias por inculcarme el amor a Dios y a la virgen, por cada oración y por hacerme la persona que soy hoy. Te amo con toda mi alma hasta cuando nos volvamos a encontrar.

A Chocolate mi mejor compañía y mayor inspiración.

Andrea Manuela Rincón Vergel

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por brindarme la sabiduría para la realización de este proyecto, acompañándome siempre y llenándome de su bendición en cada momento.

De igual modo agradezco a familiares y amigos por su apoyo incondicional durante mi etapa académica y sobre todo por ser un soporte fundamental en la culminación de mi carrera profesional.

Posteriormente, agradecer a la Universidad Industrial de Santander, de manera especial, a la escuela de Ingeniería de Petróleos por brindarme el ambiente de aprendizaje durante años y el conocimiento necesario para la finalización de este periodo académico.

También, agradecer al ingeniero Germán González Silva por su orientación, apoyo constante y por darme el conocimiento a lo largo de este proceso. Sin su guía, este logro no habría sido posible.

Finalmente, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los profesores Kathy Margarita Daza Brochero y Harving Diaz Consuegra por su compromiso con la evaluación de esta tesis, por su tiempo, revisión crítica y valiosas sugerencias. Sus comentarios y observaciones contribuyeron significativamente a su calidad.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	10
1 Planteamiento del problema	12
2 Justificación	14
3 Objetivos.....	15
3.1 Objetivo General	15
3.2 Objetivos Específicos	15
4 Marco Teórico.....	16
4.1 Métodos de producción de hidrógeno en la industria del petróleo y gas	16
4.2 Riesgos asociados a la producción del Hidrógeno en la industria del petróleo y gas	17
4.3 Impactos de los riesgos asociados a la producción del Hidrógeno en la industria del petróleo y gas.....	17
4.4 Análisis bibliométrico	18
4.5 VOSviewer.....	20
5 Metodología.....	21
5.1 Selección de base de datos.....	22
5.2 Criterios de búsqueda	23
5.3 Selección de los recursos bibliográficos.....	24
5.3.1 Filtrado de documentos.....	24
5.3.2 Extracción de datos.....	24
5.4 Análisis de datos	25
5.5 Análisis de artículos	25
6 Alcance	26
7 Análisis de los resultados	27
7.1 Textos encontrados por año	27
7.2 Resultados encontrados por base de datos.....	28
7.3 Análisis de redes bibliométricas	29
7.3.1 Análisis de coocurrencia de términos	29

7.3.2 Análisis por país	31
7.3.3 Análisis por autores	34
7.3.4 Análisis por documentos.....	35
7.3.5 Análisis por fuentes	37
7.3.6 Análisis por organizaciones	37
7.4 Identificación y definición de los riesgos	39
7.4.1 Riesgos.....	40
7.4.2 Prevención de riesgos y protocolos de seguridad	44
7.5 Incidentes y accidentes relacionados con el hidrógeno	48
7.6 Industrias involucradas	54
7.6.1 Industrial del petróleo y el gas	55
7.6.2 Generación de energía	58
7.6.3 Sin industria específica	61
7.6.4 Industria del hidrógeno	62
7.6.5 Otras industrias.....	63
8 Riesgos identificados, etapas del proceso y consecuencias	66
9 Conclusiones	75
Referencias bibliográficas	77

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Resumen de peligros y daños en accidentes con hidrógeno.	18
Tabla 2 Palabras clave utilizadas en la búsqueda.	23
Tabla 3 Artículos que abordan el tema de riesgos en la producción de hidrógeno.	42
Tabla 4 Normas técnicas relacionadas con el hidrógeno. Fuente: (Molkov, 2012).....	44
Tabla 5 Artículos que tratan de la prevención de riesgos o incidentes.	48
Tabla 6 Distribución de publicaciones según la industria.	56
Tabla 7 Generación de energía en diferentes sectores energéticos.	59
Tabla 8 Artículos sin enfoque industrial específico.	61
Tabla 9 Artículos que tienen al hidrógeno como industria.	63
Tabla 10 Artículos para otras industrias de menor representación entre los artículos.	64
Tabla 11 Artículos que tienen al hidrógeno como industria.	72

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Estadísticas de daños y lesiones en la producción del hidrógeno.	12
Figura 2 Resumen de métodos de producción.	16
Figura 3 Ejemplo de la visualización grafica para el análisis de datos bibliométricos.	20
Figura 4 Proceso de obtención de datos para el análisis bibliométrico.	21
Figura 5 Tendencia de publicaciones en el tiempo.	27
Figura 6 Proporción de publicaciones por fuente.	28
Figura 7 Agrupamiento por palabras clave en el estudio.	29
Figura 8 Relevancia de cada término en la búsqueda realizada.	30
Figura 9 Relaciones de coautoría entre los países con mayor relevancia.	32
Figura 10 Análisis de citas por país.	33
Figura 11 Análisis de pareado bibliográfico.	34
Figura 12 Análisis de co-citas por autor.	35
Figura 13 Análisis de relevancia por artículo según citas.	36
Figura 14 Análisis de autores por pareado bibliográfico.	36
Figura 15 Análisis de publicaciones citadas y co-citadas.	37
Figura 16 Organizaciones relevantes en la búsqueda.	38
Figura 17 Causas probables de incidentes relacionados con el hidrógeno. Fuente: F. Yang et al. (2021).	49
Figura 18 Factores que contribuyeron a los incidentes. Fuente: (H2 Tools, n.d.).	50
Figura 19 Causas probables para accidentes o incidentes con hidrógeno. Fuente: (H2 Tools, n.d.).	51
Figura 20 Daños y pérdidas ocasionadas por los incidentes Fuente: (H2 Tools, n.d.).	52
Figura 21 Distribución de publicaciones según la industria.	55
Figura 22 Etapas del hidrógeno.	68
Figura 23 Elementos relevantes de cada etapa del proceso.	69
Figura 24 Riesgos más importantes.	71

Resumen

Título: Análisis de riesgos y protocolos de seguridad en la producción de hidrógeno en la industria del oil and gas*

Autor: Andrea Manuela Rincón Vergel**

Palabras Clave: producción de hidrógeno, industria del petróleo, industria del gas, riesgos, prevención

Descripción: El hidrógeno se encuentra de manera abundante en la naturaleza y por tanto se considera una buena fuente de energía renovable para remplazar los combustibles fósiles. Sin embargo, tiene características inherentes como la capacidad de combustión, de detonación, fuga y difusión y debido a estas características, se puede considerar también una sustancia riesgosa. La industria del petróleo y el gas tienen una oportunidad en el aprovechamiento del hidrógeno debido a que en algunos casos se puede encontrar en los pozos de gas y petróleo y también se puede generar con estos dos combustibles fósiles. En este trabajo se busca identificar la literatura relevante relacionada con los riesgos de la producción de hidrógeno en las industrias del petróleo y el gas. Para esto, se identifican las propiedades que representan riesgo dentro de la producción y operación con el hidrógeno; También se identifican las causas más frecuentes para accidentes e incidentes en y las lecciones aprendidas de parte de estos eventos. Adicionalmente, se realiza una búsqueda en la literatura académica para conocer los estudios relevantes que se han hecho en este tema y se encuentra que recientemente ha incrementado la publicación de material científico relacionado con el hidrógeno y sus riesgos, sin embargo, los resultados encontrados no solamente se centraron en estas dos industrias, sino que también incluyen otros sectores económicos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ingeniería de Petróleos. Director: Ing. Germán González Silva. Ph. D. en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Risk analysis and safety protocols in hydrogen production in the oil and gas industry*

Author(s): Andrea Manuela Rincón vergel**

Key Words: hydrogen production, oil industry, gas industry, risks, prevention

Description: Hydrogen is present in abundance in nature. Therefore, it is considered a good source of renewable energy in order to replace fossil fuels. However, it has inherent characteristics like combustion capacity, detonation, leakage capacity, diffusion speed. These properties make it also a risky substance. The oil and gas industry has an opportunity to use this resource that can be sometimes found in the underground reservoirs where oil and gas are found and it can also be produced by using these two fossil fuels. This paper aims to identify relevant literature related to the risks present in hydrogen production in the oil and gas industry. In order to achieve that, the properties that pose a risk inside the production and operation of hydrogen are identified. The most common possible causes for accidents and incidents as well as lessons learnt from these events are identified. Additionally, an academic literature research is carried out in order to know the relevant studies that have been done in the subject. It was found that publication of scientific material related to hydrogen and its risk has increased in the latest years. However, the results found are not only focused on this industry but also include other economic sectors.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Chemistry Engineering. Petroleum Engineering School. Petroleum Engineering. Director: Germán Gonzales Silva. Ph. D. In Chemical Engineering.

Introducción

El hidrógeno es un elemento que se encuentra abundantemente en la naturaleza y por tanto tiene potencial para utilizarse como combustible debido a características como su baja energía de ignición, alta propagación, entre otras. Sin embargo, esas propiedades también lo convierten en un elemento de cuidado ya que hay riesgos asociados a su manejo que deben tomarse en cuenta en los procesos en los que se utiliza.

Entre las propiedades del hidrógeno su inflamabilidad, su alta capacidad de fuga, la baja energía que se requiere para su detonación y su alta velocidad de propagación, son considerados riesgosos ya que pueden causar incendios, explosiones, asfixia, entre otros problemas (F. Yang et al., 2021).

En la industria del petróleo y el gas, se tienen diferentes procesos que requieren hidrógeno o que producen hidrógeno y por tanto se considera que el aprovechamiento del hidrógeno en estas industrias puede ser beneficioso para la reducción de costos, pero también para reducir la huella de carbono asociada a la explotación de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero.

En el siguiente trabajo, se identifican los riesgos asociados al hidrógeno y se realiza búsqueda de documentos relacionados con este tema para compilar el conocimiento disponible en los últimos años en cuanto a los riesgos en la producción de hidrógeno en estas dos industrias. El resto del documento se encuentra distribuido de la siguiente manera: se exponen el planteamiento del trabajo que incluyen el problema, la justificación y los objetivos; luego se desarrolla el marco teórico que considera los fundamentos para la producción de hidrógeno y para el manejo de este en las industrias del petróleo y del gas, también se consideran los fundamentos teóricos de análisis

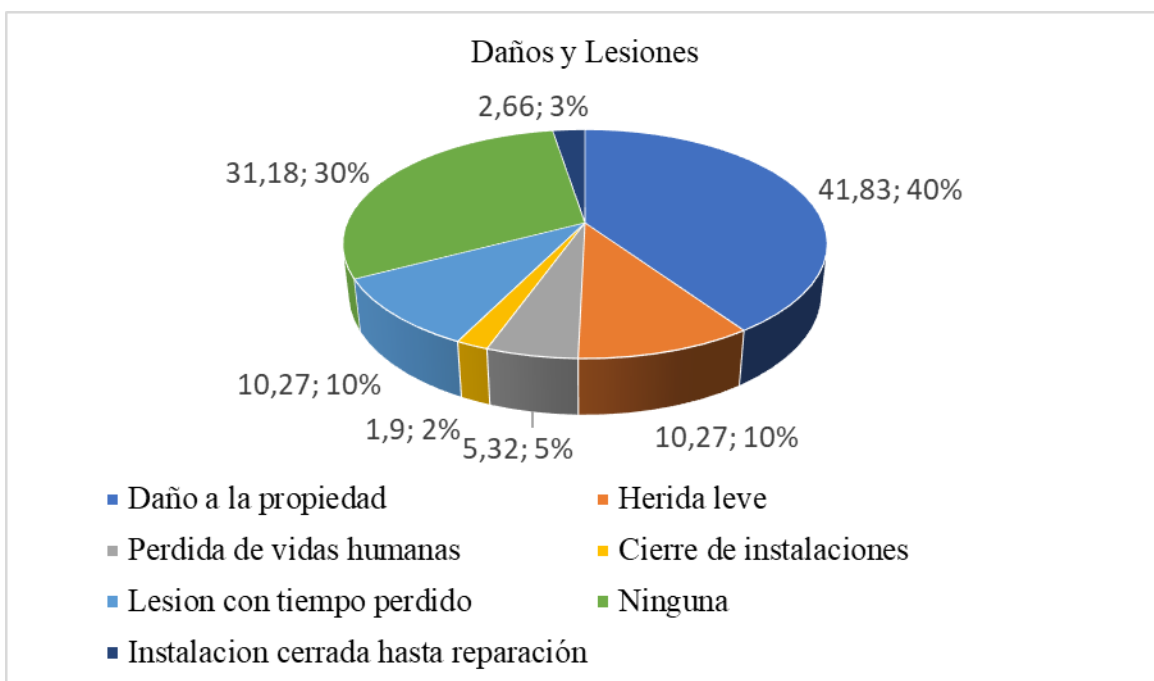
bibliográfico que se usaran en este trabajo; el siguiente punto se encarga de definir la metodología del trabajo o los pasos que se deben dar, seguido del análisis de la información encontrada. Finalmente se hace una discusión acerca de los resultados obtenidos y se sacan conclusiones de lo aprendido.

1 Planteamiento del problema

Una de las grandes preocupaciones al hacer uso del hidrógeno como fuente de energía alternativa, es los múltiples incidentes que se han presentado entorno a la producción, la cual es causada en su gran mayoría por las propiedades inherentes del hidrogeno, así como las propiedades relacionadas con la fuga, ignición, difusión y explosión.

Figura 1

Estadísticas de daños y lesiones en la producción del hidrógeno.



Según un estudio detallado (Abohamzeh et al., 2021) de las especificaciones de los incidentes del hidrógeno se ha determinado que una de las causantes principales son las fallas del equipo representando un 35.78% y como se puede observar en la figura presentada con

anterioridad el daño a la propiedad es uno de los principales inconvenientes con una representación 41.83%.

Por lo tanto, procurar la seguridad debe ser preeminente para la utilización del hidrogeno, esto mediante la implementación de estrategias que permitan abordar los peligros y riesgos en su totalidad, así como contar con los protocolos necesarios de seguridad que permitan ayudar a controlar estos incidentes de manera adecuada.

Aunque en la industria del *Oil and Gas* la implementación de las buenas prácticas y protocolos de seguridad en la producción del hidrogeno, son temas cruciales, hoy en día hay una gran necesidad de profundizar en el área de investigación para abordar de una forma más completa este campo en la industria del *Oil and Gas*.

En consecuencia, es de suma importancia abordar esta problemática a través de una investigación minuciosa, para poder identificar y estimar todos los posibles riesgos que están asociados a la producción de hidrógeno en la industria del petróleo y gas, de igual forma debe ser de consideración el análisis crítico de los protocolos, reglamentos y normativas existentes y plantear mejoras basadas en el conocimiento científico proporcionado en la bibliografía, por lo que el análisis bibliométrico será una parte fundamental en la implementación de la metodología, ya que permitirá examinar la literatura existente teniendo en cuenta la tendencia actual, y proporcionar recomendaciones que ayuden a fortalecer la seguridad y mitigar los riesgos en esta área de la ingeniería de petróleos.

2 Justificación

Actualmente en la industria del petróleo y gas, la aplicación e implementación de energías alternativas como el hidrógeno han cobrado mucha importancia, debido a la creciente demanda de fuentes de energía que sean más sostenibles, sin embargo, el uso de este ha traído consigo diversos retos en cuanto a la seguridad para su producción ocasionando daños irreparables y múltiples accidentes.

En este sentido gran parte de estas fallas se deben a las características connaturales del hidrogeno, siendo este una de las sustancias más inflamables y con propiedades como la ausencia del color y olor lo cual dificulta la detección de fugas. Por lo tanto, con el fin de afianzar la seguridad en su uso se busca el conocimiento y análisis de los aspectos fundamentales tanto físicos como químicos que pudieran afectar el proceso de producción de hidrogeno exponiendo a riesgos de desastres. Esto, mediante el estudio de los casos que han presentado problemas de seguridad y por ende accidentes ya reportados, además de analizar los protocolos de seguridad y normativas existentes con el fin de estudiar su eficacia y presentar las estrategias que contribuyan a la mitigación de exposición de riesgos para futuros procesos de producción de hidrogeno.

Con esta investigación se espera aportar a profesionales de la industria, empresas y entidades a la ampliación de conocimientos y sugerencias de modo prácticas que ayuden a reforzar las buenas implementaciones de actividades y la seguridad en la producción de hidrógeno en el sector.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Analizar los riesgos y medidas de seguridad en la producción de hidrógeno en la industria del Oil and Gas, garantizar la protección de los trabajadores, las instalaciones y el entorno utilizando análisis bibliométrico.

3.2 Objetivos Específicos

- Definir los riesgos asociados a las diferentes etapas del proceso de producción de hidrógeno en la industria del Oil and Gas, identificando las posibles fuentes de peligro, los eventos potenciales y las consecuencias para los trabajadores y las instalaciones reportados en la bibliografía.
- Desarrollar las búsquedas claves, referentes a riesgos del proceso del hidrógeno y su relación con la industria de los hidrocarburos en diferentes bases de datos para su análisis mediante programas de análisis bibliométrico.
- Comparar los principales incidentes y accidentes ocurridos en la producción de hidrógeno en la industria del petróleo y gas, investigando las causas subyacentes y las lecciones aprendidas.

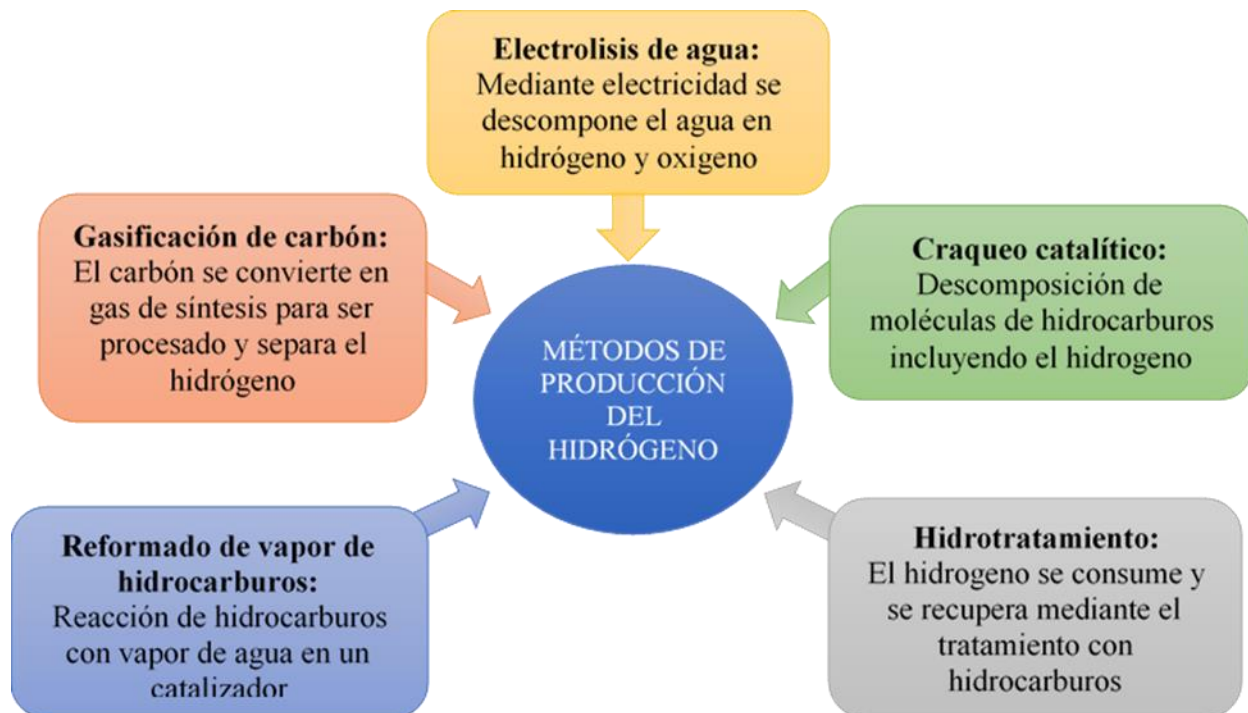
4 Marco Teórico

4.1 Métodos de producción de hidrógeno en la industria del petróleo y gas

La elección de los métodos que se utilizan para la producción del hidrógeno en la industria del petróleo y gas, depende de varios factores como la disponibilidad de la materia prima, infraestructura y requisitos específicos para purificar el hidrógeno requerido para diferentes aplicaciones (Chang et al., 2019).

Figura 2

Resumen de métodos de producción.



4.2 Riesgos asociados a la producción del Hidrógeno en la industria del petróleo y gas

Fugas de gas: la presencia de fuga en la producción del hidrógeno puede ocurrir en tuberías y equipos incluidos los de almacenamiento, esto debido a sobrepresión del proceso generacional, fatiga del equipo y corrosión (Chang et al., 2019).

Incendios y explosiones: el hidrógeno es altamente inflamable, ya que requiere de una energía de ignición mínima para lograr explotar en el aire, esto a través de la presencia de una fuente de combustión, como una chispa eléctrica, una llama abierta o incluso una temperatura elevada. Cabe mencionar que la explosión genera un aumento en la temperatura y presión por lo que el riesgo a daños o lesiones graves es mayor (F. Yang et al., 2021).

4.3 Impactos de los riesgos asociados a la producción del Hidrógeno en la industria del petróleo y gas

Los impactos asociados a los peligros de la producción del hidrógeno no solo tienen un alto riesgo operativo sino también afecta a la seguridad de los trabajadores, a la infraestructura, el medio ambiente y también surgen impactos económicos ya que estos pueden ser significativos para las empresas y la industria en general (Abohamzeh et al., 2021).

Dentro de los peligros fisiológicos se encuentran la asfixia y las quemaduras térmicas, los cuales son los más comunes dentro de los peligros directos hacia los trabajadores. Cabe destacar que el hidrógeno es considerado como una sustancia no tóxica, siempre y cuando en caso de inhalación no se haga en grandes cantidades ya que podría generar los daños mencionados

anteriormente, así como ciertos síntomas secundarios, esto normalmente se da cuando se expone en espacios cerrados (Najjar, 2013).

Tabla 1

Resumen de peligros y daños en accidentes con hidrógeno.

Peligros	Síntomas	Prevención
Incendio y Explosión	Extremadamente inflamable. Muchas reacciones pueden producir incendio o explosión. Las mezclas gas/aire son explosivas.	Usar controles apropiados en el proceso.
Inhalación	Vértigo. Dolor de cabeza. Asfixia.	Evitar espacios cerrados.
Piel	Congelación	Guantes protectores del frío.
Ojos	En Contacto con gas.	Utilizar protección facial.

4.4 Análisis bibliométrico

La bibliometría es una disciplina que utiliza métodos cuantitativos y modelos matemáticos, con el fin de estudiar la cantidad de producción de documentos bibliográficos registrados, el impacto de su difusión, el uso de estos escritos y la selección y agrupación de autores interesados en temas específicos de aplicación científica.

Según Pritchard (1969) quien fue el primero en establecer el concepto de bibliometría, ésta se basa en medir y cuantificar la recopilación de recursos bibliográficos, así como las citas, las referencias bibliográficas y los índices de revistas a través de una búsqueda de palabras claves que proporcionen ayudas para la comprensión de la actividad científica en diferentes temas y áreas de conocimiento.

Para el correcto estudio de la metodología con análisis bibliométrico, se tienen en cuenta la implementación de las leyes bibliométricas, estas no infringen en las leyes físicas o químicas. Existen diversas leyes bibliométricas, pero estas se pueden dividir en dos:

Ley de Bradford: esta ley estudia la distribución de publicaciones y la productividad en revistas científicas.

Ley de Lotka: la tendencia de la productividad de los autores en las publicaciones ha sido estudiada por Lotka, quien hace una comparación entre autores con una gran representación de publicaciones contra autores que han iniciado con pocas publicaciones.

Esto demuestra que la relación trabajos/autor es inversamente proporcional y constante según ciertos criterios, ya que la información de la tendencia obtenida de un autor con una publicación, puede predecir el comportamiento del número de autores con “n” publicaciones, mediante la siguiente ecuación (Camps, 2008).

$$A_n = \frac{A^1}{n^2} \quad (1)$$

Donde,

A_n : es la cantidad de autores con “n” trabajos publicados

A^1 : es la cantidad de autores con un trabajo publicado

n^2 : es la cantidad de trabajos publicados

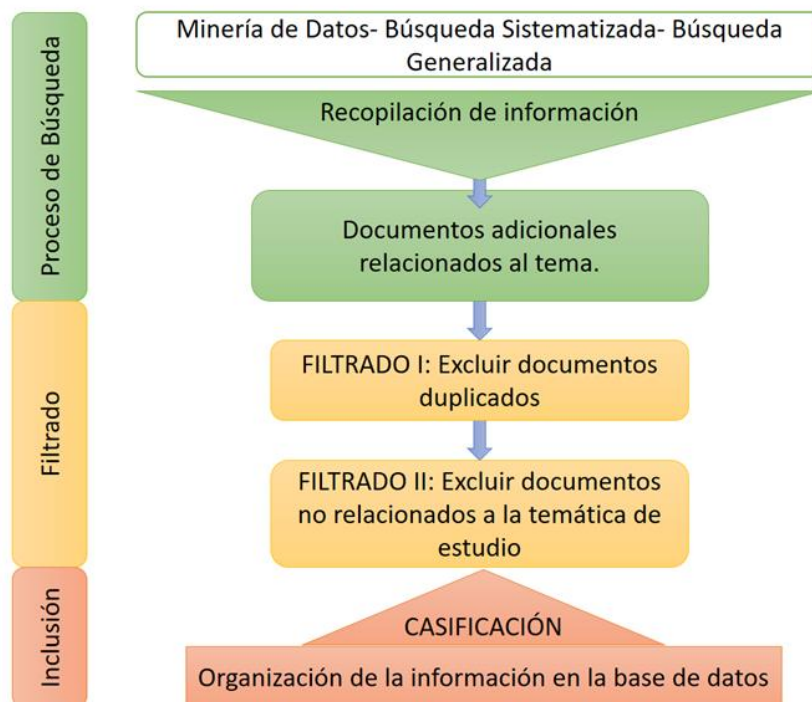
Cabe mencionar que esto no solo se trata de cuantificar el número de autores bajo ciertas condiciones, sino determinar cuáles de los autores son más representativos para el tema de interés.

5 Metodología

Para el cumplimiento de la investigación propuesta para este trabajo de grado se desarrollará una metodología basada en el análisis bibliométrico; lo cual facilitará la recopilación y clasificación de la información relacionada con los aspectos fundamentales en el proceso de producción del hidrogeno, además de identificar cuáles podrán ser de mayor utilidad para la investigación. Esto permitirá cumplir con los objetivos propuestos y facilitará el análisis de la literatura científica existente sobre los riesgos y protocolos de seguridad en la producción del hidrógeno en la industria del *Oil and Gas* para el estudio bibliométrico.

Figura 4

Proceso de obtención de datos para el análisis bibliométrico.



Utilizando el proceso de búsqueda propuesto en la figura 4, se realizará una revisión de la literatura y un estudio de tipo bibliométrico, respecto a estudios científicos previos.

5.1 Selección de base de datos

La búsqueda respecto al tema propuesto se tomó inicialmente en cuenta cuatro bases de datos disponibles en acceso abierto: Medline, Web of Science, PubMed y Scopus.

Para la selección se realizó una revisión de diferentes artículos en las bases de datos mencionadas anteriormente, sin embargo, se descartaron a Medline y PubMed ya que estas recogen la información por título y tipo de documento, pero no se alinea al tema de interés para la presente investigación. Por lo tanto, las bases de datos seleccionadas para realizar la búsqueda por autores, títulos de artículos, años de publicación y países con mayores publicaciones serán Web of Science y Scopus. Estas bases de datos abordan los documentos científicos necesarios para el análisis bibliométrico respecto a la seguridad de la producción del hidrógeno.

Múltiples autores a nivel global en diferentes áreas de estudio recomiendan las bases de datos Web of Science y Scopus debido a su versatilidad y accesibilidad a las investigaciones, así mismo Google Scholar se implementará para la recolección de información clave para la investigación (artículos, tesis de investigación, revistas científicas) (Castellanos-Garzón et al., 2020; Cevallos et al., 2021; Cuevas-Molano et al., 2019).

5.2 Criterios de búsqueda

Esta investigación se realizó con la ayuda de la aplicación de los siguientes criterios de búsqueda.

i. El uso de las palabras claves para la recopilación de documentos científicos asociados a la seguridad en la producción del hidrógeno en las bases de datos seleccionadas. En cuanto a las palabras claves, la se tuvieron en cuenta los siguientes términos:

Tabla 2

Palabras clave utilizadas en la búsqueda.

Tema	Seguridad	Riesgos identificados	Industry
Palabras términos	Riesgo	Fuga	Gas
	Peligro	Exposición eléctrica	Petróleo
	Amenaza	Fuego	Industria
	Seguridad	Explosión	Negocio
	Seguro	Inflamación	Sector
		Falla del sistema de monitoreo	
		Llama	
		Deflagración	
		Detonación	
		Combustión	

ii. Resumen de la búsqueda de la información científica obtenida con la implementación de las palabras claves y un periodo de análisis del 2019 hasta el 2023, esto con el fin de asegurar una obtención de resultados lo más actual posible con un rango no mayor a cinco años.

iii. La Ingeniería como área de dominio seleccionada para enfocar la búsqueda en el tema de investigación.

iv. Exclusión de términos no relevantes para la investigación como el ácido sulfídico y temas relacionados.

5.3 Selección de los recursos bibliográficos

5.3.1 Filtrado de documentos.

Para el filtrado de los documentos se postula la revisión de los títulos y resúmenes de los documentos obtenidos en la búsqueda bibliográfica, con la finalidad de descartar los documentos que no se ajusten al tema de investigación y/o al criterio de selección como se realizó en el artículo de (Ramezani & Aghaie, 2023).

5.3.2 Extracción de datos.

Por medio de una revisión sistemática de literatura encontrada en la búsqueda, se identifican y seleccionan los artículos relevantes asociados al tema de estudio, con base en los riesgos identificados como los protocolos de seguridad con sus respectivos análisis y las conclusiones obtenidas de los estudios seleccionados.

Este análisis permite categorizar la información extraída por factores basados en la incidencia e importancia en el proceso de búsqueda, resultando en título, nombre de autores, cantidad de publicaciones respecto al tema por cada autor, año de publicación, país con mayor número de estudios y publicaciones sobre el tema.

Por último, se realizó el análisis de los casos de estudio reportados en los documentos científicos seleccionados, extrayendo datos de gran relevancia como los riesgos ocasionados, así como los protocolos de seguridad que se implementaron y los resultados obtenidos, de esta forma

se podrá comparar y analizar las lecciones aprendidas y las buenas prácticas en materia de seguridad para posteriormente la creación del informe de investigación.

5.4 Análisis de datos

El análisis de datos se realizará en el Software VOSviewer con la finalidad de obtener resultados como mapeos y entre otros, que permitan la visualización y comprensión de la información recolectada.

5.5 Análisis de artículos

Con el fin de ahondar en la comprensión del tema y los datos analizados, se realizó un análisis minucioso de los artículos relevantes encontrados en el rango de tiempo definido. Para esto, se tienen en cuenta el resumen, la introducción y las conclusiones de los mismos y este análisis tiene como finalidad, el conocimiento específico acerca de la literatura encontrada para la agrupación y descripción de la situación en el campo de estudio.

6 Alcance

En este trabajo de grado se pretende realizar un estudio de las características que influyen en los accidentes ocasionados en la producción del hidrógeno en la industria del *OIL & GAS*, aplicando los datos de incidentes reportados en la revisión bibliográfica consultada. De esta manera se conseguirá información valiosa para el planteamiento de posibles alternativas, que se adapten mejor a garantizar la seguridad en procesos de producción de hidrogeno.

Este análisis tomó como punto de partida la revisión el análisis bibliométrico, examinando accidentes reportados y posibles causas con detenimiento y buscando la comprensión de los fenómenos que deben ocurrir para evitar la propagación de riesgos e incidentes. Esto se hará con el fin de reunir suficiente información para empezar a plantear un modelo basado en los fenómenos que ocurran al momento de producir el hidrogeno, buscando la mejora de cada uno de ellos.

7 Análisis de los resultados

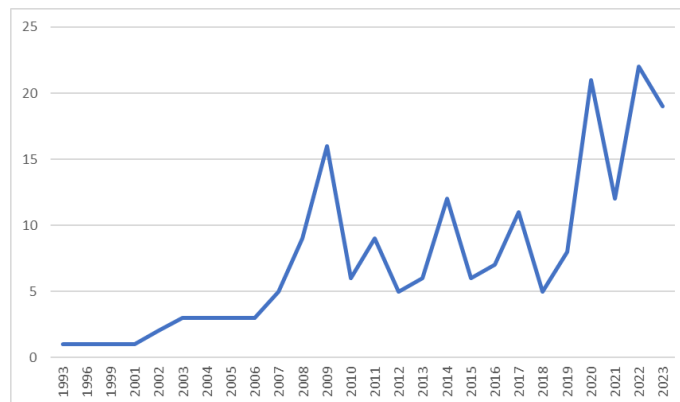
En esta sección se analizan los resultados obtenidos por la búsqueda de literatura académica para encontrar patrones y comprender el comportamiento de los datos generales encontrados. También se realiza un análisis más profundo de los artículos que se consideraron relevantes para el trabajo con el fin de ahondar en el tema e identificar pasos a seguir.

7.1 Textos encontrados por año

En cuanto al comportamiento de las publicaciones encontradas y relevantes para el tema a lo largo del tiempo, se puede observar la Figura 5, allí se puede identificar que vienen en una tendencia creciente año a año, especialmente después del 2019. Aunque en 2009 se observó un pico en el número de publicaciones, es realmente en los últimos años que se ha observado un cambio en el número de artículos publicados anualmente para las palabras clave consideradas.

Figura 5

Tendencia de publicaciones en el tiempo.

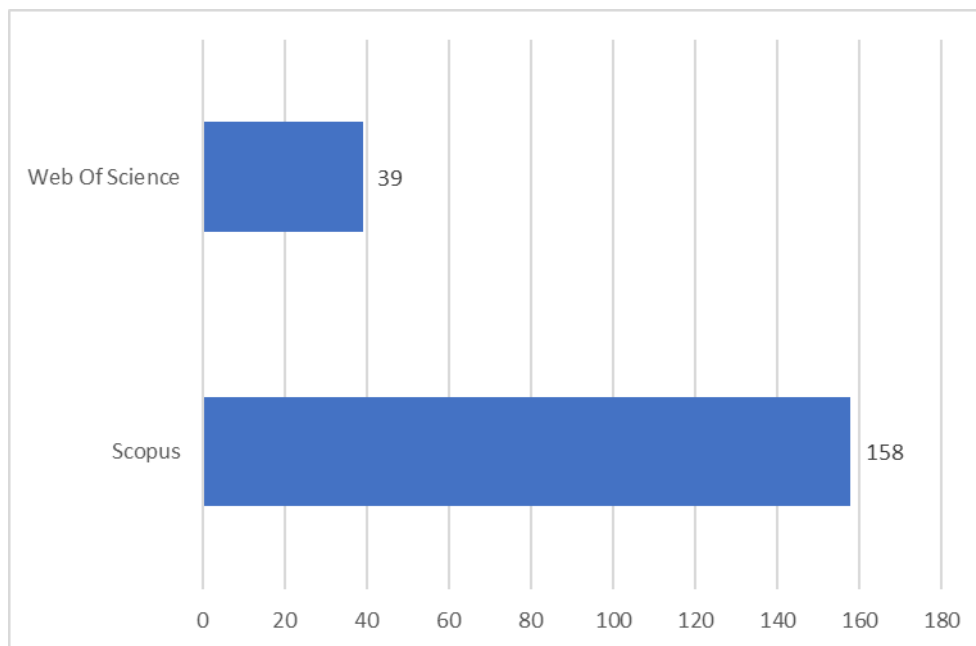


7.2 Resultados encontrados por base de datos

De las dos fuentes de datos utilizadas, se puede observar en la Figura 6 la cantidad de artículos encontrados en total para la búsqueda. Se tiene entonces que los resultados encontrados en Web of Science representan aproximadamente un 19.5% de los textos encontrados. Cabe resaltar que esta búsqueda tiene en cuenta aún los resultados con antigüedad mayor a 5 años.

Figura 6

Proporción de publicaciones por fuente.



También es necesario considerar que hubo resultados repetidos en ambas bases de datos y que se eliminaron para alguna de ellas, sin embargo, estos resultados no producirían cambios significativos en la composición de la Figura 6.

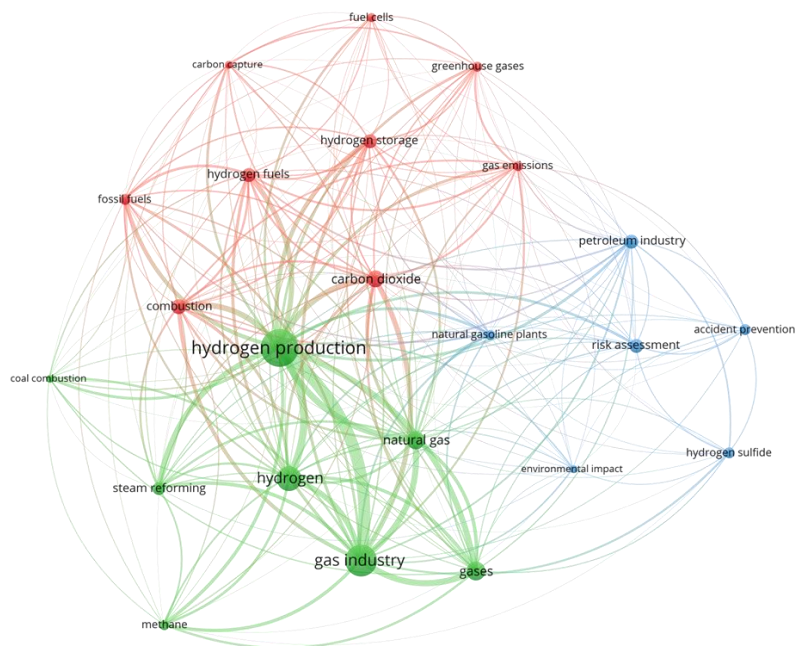
7.3 Análisis de redes bibliométricas

7.3.1 Análisis de coocurrencia de términos

En la Figura 7 se puede observar el gráfico por palabras clave obtenido de VOS viewer a partir de la búsqueda obtenida de la base de datos Scopus. Se puede observar a la producción de hidrógeno como el elemento más relevante en la búsqueda y que define además el primer clúster de términos, al que podemos producción de hidrógeno, y en el cual se incluyen el gas natural y la industria del gas, que a su vez tienen gran relevancia en la búsqueda general.

Figura 7

Agrupamiento por palabras clave en el estudio.



En el segundo clúster, se ubica la industria petrolera, que se encuentra asociada generalmente con la prevención de accidentes y la evaluación de riesgos, lo que puede dar cuenta

hidrógeno como tal tienen unas densidades altas, de igual manera, la industria del gas está con un alto nivel de densidad. El resto de los términos tienen unas densidades relativamente similares entre ellos. En esta gráfica se evidencia que por ejemplo el impacto ambiental que no tiene una relevancia alta comparada con los otros términos, mientras que los métodos de generación de hidrógeno y de su uso sí tienen una mayor relevancia.

Un aspecto importante en esta visualización de las palabras clave encontradas es que se forma una nube de puntos que se distribuyen aproximadamente como un círculo y no hay corrientes o caminos marcados, esto puede dar cuenta de un campo de búsqueda compacto y con una interrelación definida entre los diferentes términos y por tanto también entre los artículos analizados.

7.3.2 Análisis por país

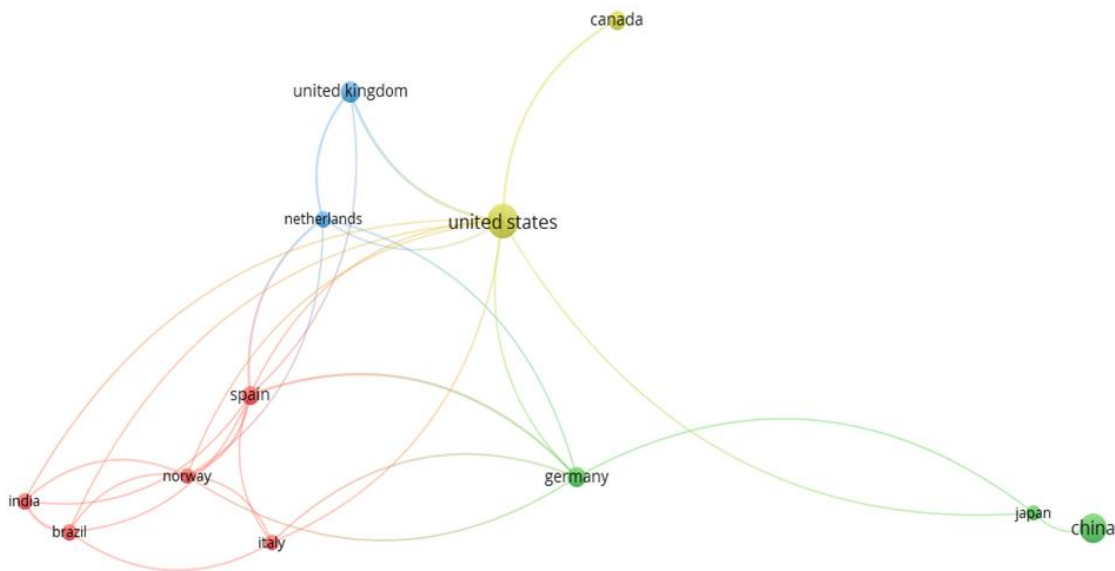
En esta sección se toman en cuenta las publicaciones de acuerdo al país del que provienen y se analizan tanto las citaciones, la coautoría y el pareado bibliográfico. En general se ha identificado la presencia de 65 países entre los artículos presentes, sin embargo, se definirá como relevante un país para el análisis si está en al menos cinco artículos de la búsqueda para los diferentes aspectos analizados.

En la figura 9, se puede observar entonces la relación de coautoría en cuanto para los artículos que se encontraron en la búsqueda. Estados Unidos se presenta como el país con más peso en la generación de artículos científicos en el tema y en materia de coautoría, se relaciona también con la mayor parte de países que investigan acerca de este tema. También es posible identificar que, si bien China es el segundo país con mayor relevancia, este solo ha presentado

coautoría de artículos con Japón y estos dos países se encuentran alejados del resto de países más importantes en la búsqueda.

Figura 9

Relaciones de coautoría entre los países con mayor relevancia.

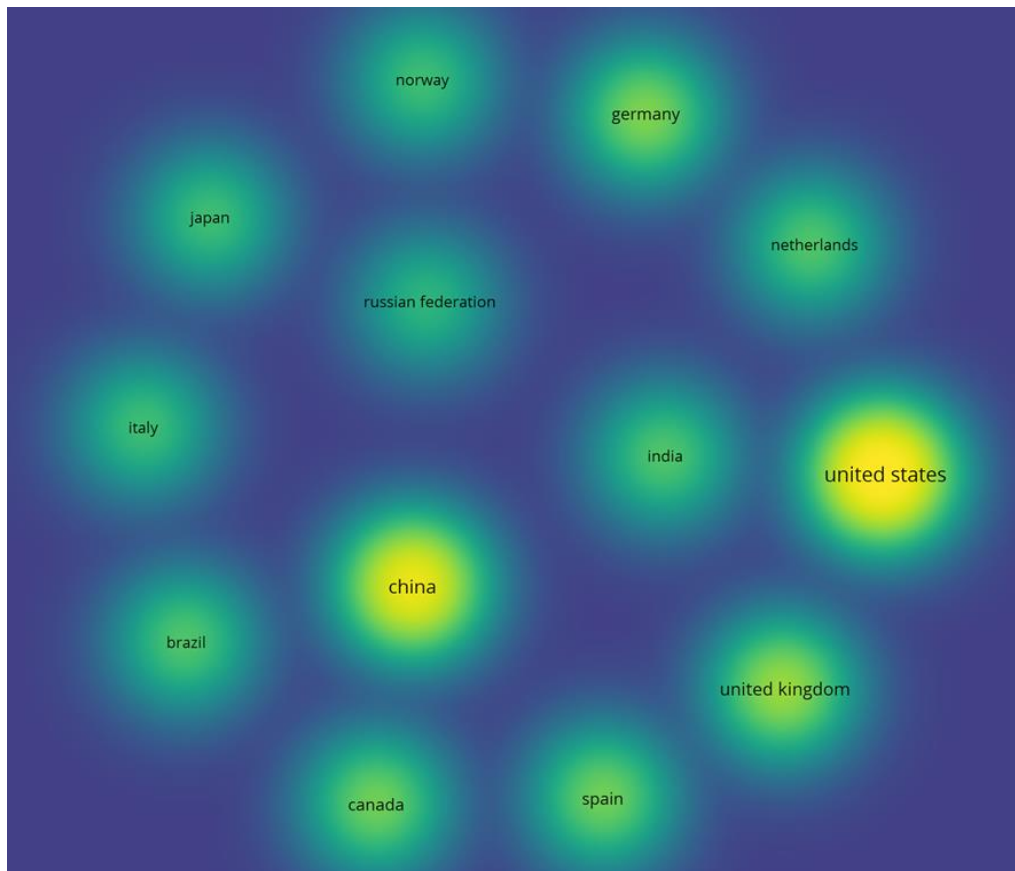


También se ha identificado que los países europeos son los en conjunto los que mayor relevancia tienen en conjunto y son España y Noruega los países que presentan mayor número de colaboraciones de coautoría con otros países por detrás de Estados Unidos.

En cuanto a las citaciones, también se seleccionaron como relevantes los países con al menos cinco citaciones. la figura 10. muestra que Estados Unidos y China son los países con mayor número de citaciones recibidas en la búsqueda realizada y se observa también que además de los países encontrados en el análisis de coautoría, la federación rusa también es relevante, aunque en menor medida que estos países.

Figura 10

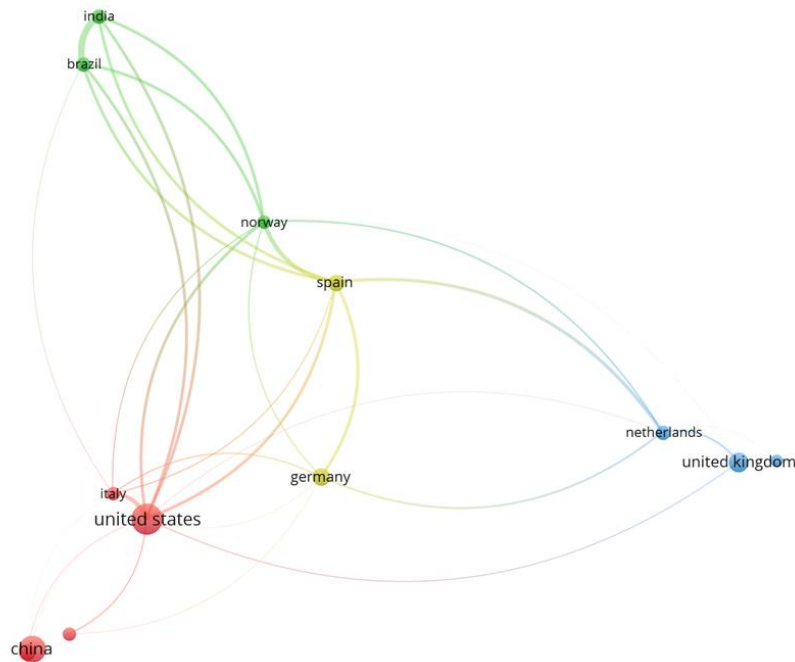
Análisis de citas por país.



Analizando el pareado bibliográfico (ver figura 11.), se ha encontrado también que hay clústeres marcados en cuanto a los artículos citados. Si bien China y Japón estaban alejados en cuanto a coautoría de otros países como Estados Unidos, tienen cercanía con este y con Italia en cuanto a los artículos citados. De igual manera, se puede identificar la cercanía de España y Noruega, que, si bien pertenecen a clústeres diferentes, tienen diversidad de colaboraciones como se observó en el análisis de coautoría y están cercanos en los artículos utilizados.

Figura 11

Análisis de pareado bibliográfico.



7.3.3 Análisis por autores

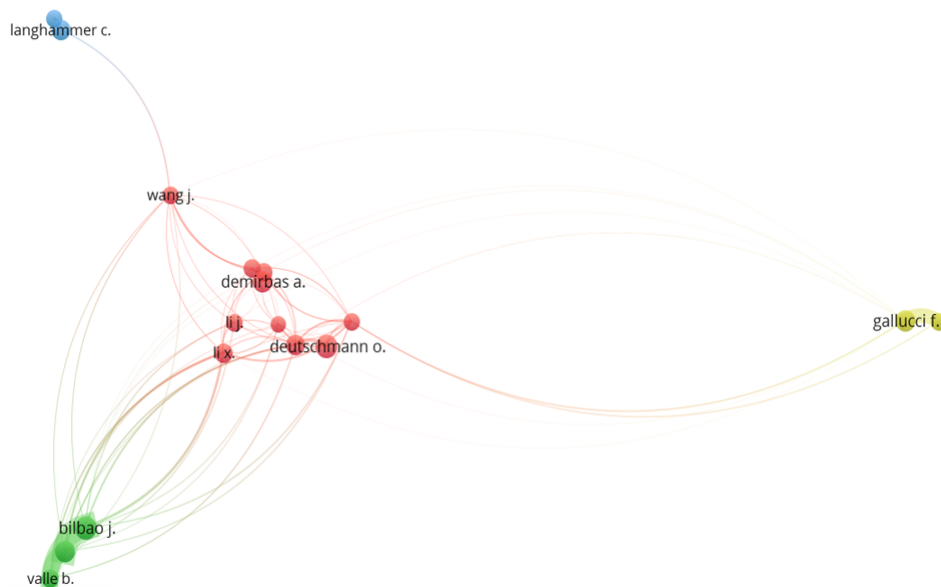
Tomando los análisis por autor, se encontró que, para coautoría, citaciones y pareado bibliográfico, no hay relaciones claras relevantes y cada autor se ubica en su propio clúster. De esta manera, se decide omitir esos aspectos en este análisis, ya que no es posible utilizarlos para un análisis visual claro.

Para el caso de las co citaciones, se decidió tomar autores con al menos 19 citas para identificar los autores que se suele citar en los mismos artículos en la figura 12, se puede observar la gráfica relacionada con este análisis. En este caso, se identifican cuatro clústeres, de los cuales, el principal contiene a Demirbas a., Deutschmann O., Li j., Li X., Li Y., Wang J., Wang X., Wang Y., Wang Z. y Zang Y. el segundo clúster en importancia incluye a Bilbao J., Gayubo A.G., y

Valle B. El tercer y cuarto clúster lo componen Kostylev M., Langhammer C. Gallucci F. y Van Sint Annaland M.

Figura 12

Análisis de co-citaciones por autor.

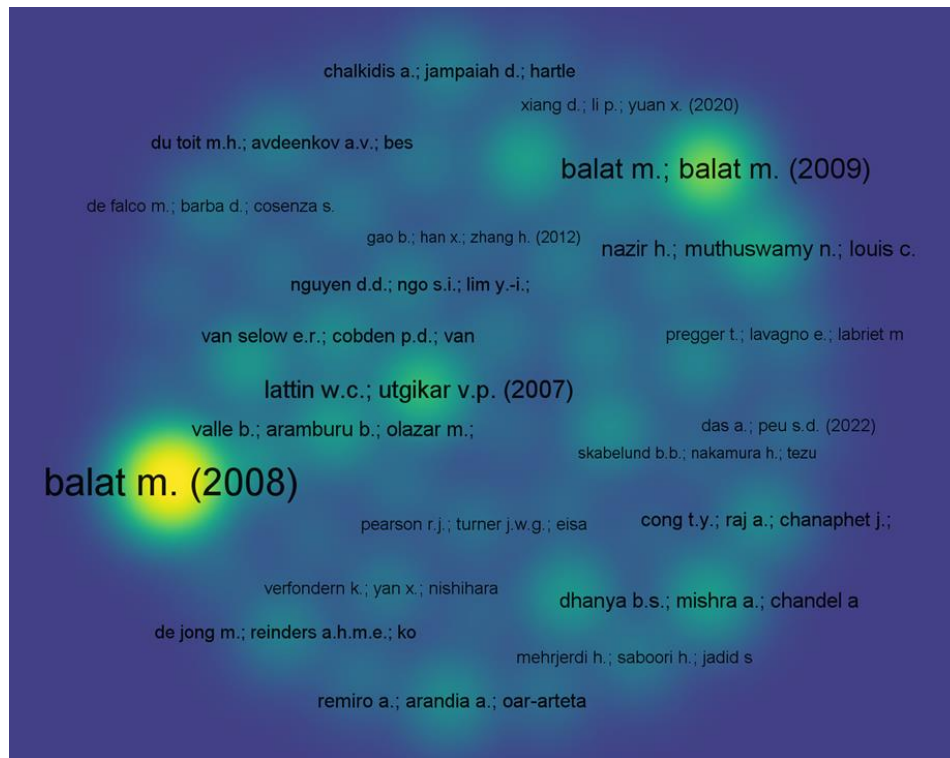


7.3.4 Análisis por documentos

Teniendo en cuenta los documentos encontrados, se restringió la clasificación a los artículos que tengan al menos diez citaciones para el análisis de citaciones. La figura 13 muestra que hay tres artículos principalmente que tienen alta relevancia (Balat, 2008; Balat & Balat, 2009; Lattin & Utgikar, 2007). Sin embargo, estos artículos fueron publicados en la primera década de los años 2000. Esto puede dar cuenta del carácter general de estos artículos, pero también puede evidenciar la necesidad de mayor investigación relevante y útil para la investigación en la década actual.

Figura 13

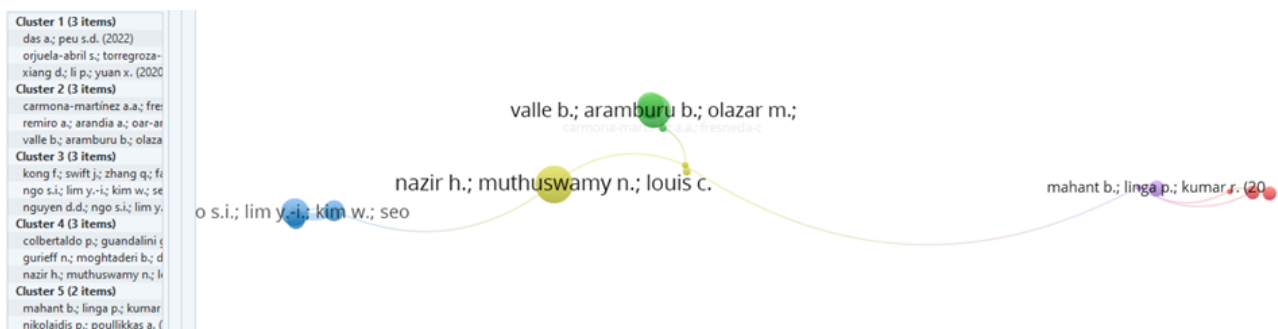
Análisis de relevancia por artículo según citaciones.



Pasando al pareado bibliográfico, se tiene que hay cinco clústeres de los cuales, todos los artículos mencionados en conjunto, son artículos recientes o con un tiempo de publicación menor a 5 años. La figura 14 muestran los clústeres y los autores incluidos en cada uno de ellos.

Figura 14

Análisis de autores por pareado bibliográfico.

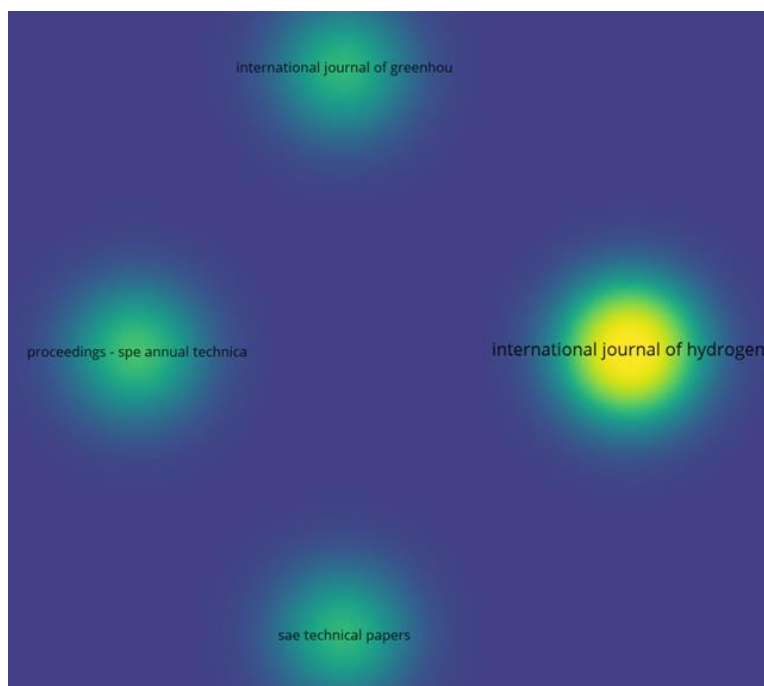


7.3.5 Análisis por fuentes

En esta sección se consideran las fuentes o revistas científicas que tienen mayor relevancia en el tema de acuerdo con las citas y co-citas que han recibido. En la Figura 15, se puede identificar de lejos que la revista “International Journal of Hydrogen” es la fuente más relevante para el tema según los términos de la búsqueda realizada.

Figura 15

Análisis de publicaciones citadas y co-citadas.



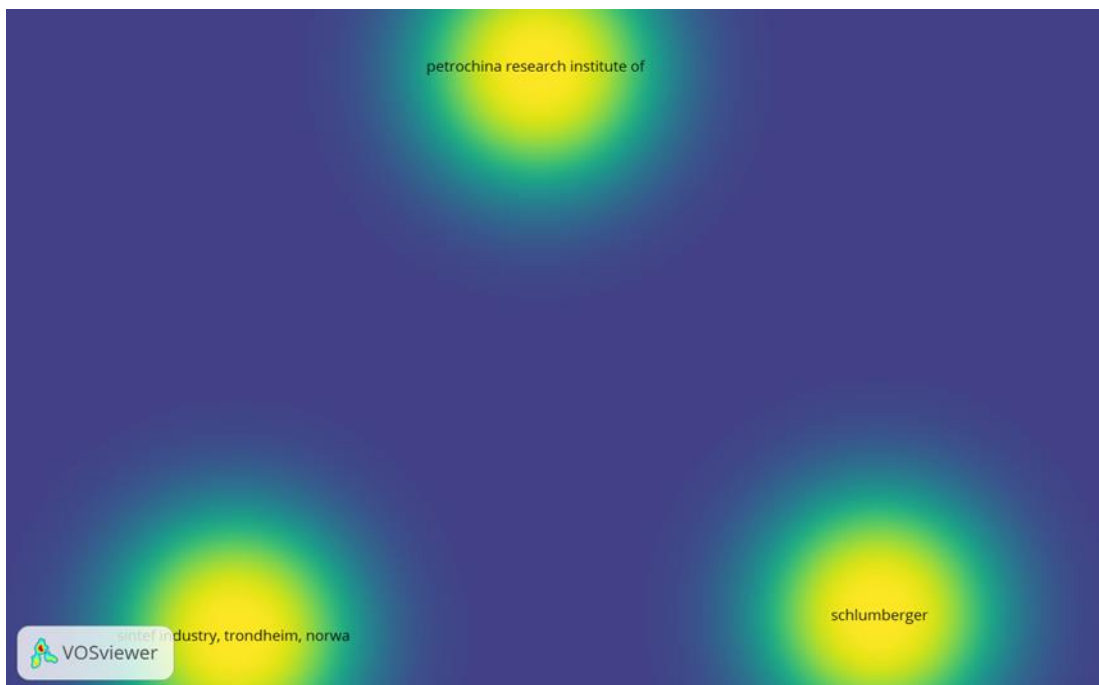
7.3.6 Análisis por organizaciones

En los análisis de coautoría, citas y pareado bibliográfico, se encontraron tres organizaciones relevantes que han publicado artículos. Todas ellas tienen la misma relevancia en

cuanto a citas, trabajo conjunto, y uso de su material en conjunto dentro de artículos científicos. En la figura 16, se puede observar la densidad de cada una de estas organizaciones, sin embargo, no se encuentran conectadas. La primera institución que se encuentra es el PetroChina Institute of Research, que es un centro de investigación aplicado a la industria petroquímica y está asociada a la compañía nacional de refinamiento de petróleo de China (CNPC, n.d.). Por otro lado, se encuentra SINTEF, que es una compañía noruega de investigación y desarrollo en campos multidisciplinarios (SINTEF, 2023). Finalmente, está Schlumberger, que también es una compañía de investigación y desarrollo en innovación ubicada en diferentes lugares del mundo y con diferentes campos de acción también (Schlumberger, 2023).

Figura 16

Organizaciones relevantes en la búsqueda.



7.4 Identificación y definición de los riesgos

Para la identificación de los riesgos y de las situaciones que pueden presentarse, se tomaron fuentes académicas como libros acerca del hidrógeno y su manejo seguro. Se identificó entonces que los principales riesgos que se asocian al hidrógeno y su producción dependen de las características del hidrógeno como tal y de sus propiedades.

Se encontró entonces que entre los riesgos más importantes se encuentra la inflamabilidad debido a que este es un gas combustible (Hübert et al., 2016; Molkov, 2012); la detonación y deflagración, que se debe a la baja energía de ignición que requiere este gas (Molkov, 2012); las fugas, que se deben principalmente al tamaño de la molécula de gas de hidrógeno, sumadas al hecho de que es un gas inoloro también (Gandía et al., 2013; Molkov, 2012); otro riesgo asociado a los contenedores e infraestructura es la fragilización de los elementos que tienen contacto directo con el hidrógeno (Gandía et al., 2013); también se ha identificado que el hidrógeno desplaza el aire en un espacio por lo que puede causar asfixia a quienes estén presentes en el lugar y también puede causar hipotermia en las personas (Gandhía et al., 2013).

Adicional a los riesgos utilizados, se consideró también que debe haber un reconocimiento de peligros y riesgos en general y esto es de utilidad para definir las acciones a tomar, así como los protocolos o diferentes sistemas a implementar para evitar que se materialicen dichos riesgos o mitigar el impacto de estos.

7.4.1 Riesgos

En cuanto a los artículos encontrados, se pudieron identificar varios que mencionaban los riesgos anteriormente y, por otro lado, se toman algunos riesgos diferentes que no se habían considerado anteriormente.

En cuanto al riesgo de fuga, entre los artículos asociados que lo consideran este riesgo se toman diferentes aspectos como la difusión del hidrógeno por la fuga, la detección de estas fugas y se encontraron resultados por dentro y por fuera de la industria de gas y del petróleo (Gabet et al., 2023; Gao et al., 2022; Mackinnon & Gomersall, 2019; Maksymov & Kostylev, 2022; Nirmala & Durga Shree, 2022; Sato & Ohashi, 2019; X.-J. Xu et al., 2022).

Para el riesgo de inflamación o incendio, se han considerado diferentes textos que han tenido en cuenta los incendios como riesgo en las reacciones que generan hidrógeno, las detonaciones que pueden generarse por la generación de gases específicamente, y también de la posibilidad de incendio en vehículos impulsados con hidrógeno, así como los riesgos posibles en la generación de hidrógeno y de su manejo como tal que incluye el transporte y almacenamiento de esta sustancia (Hadeif et al., 2020; Jabbarzadeh et al., 2021; Kim et al., 2022; Pisman et al., 2023; X.-J. Xu et al., 2022; C. Yang et al., 2021).

Otro riesgo considerado es el de ignición y detonación consecuente, para este riesgo se consideran principalmente las actividades de manejo del hidrógeno como la distribución, el enfriamiento de reactores de hidrógeno y también los tanques de almacenamiento que se utilizan para este gas. Adicionalmente, se considera la posibilidad de mezclar el hidrógeno con el gas natural y los riesgos que esto puede tener en cuanto a la detonación en el sistema de distribución

(Cao et al., 2021; Davis et al., 2022; Mahant et al., 2021; Mazzini et al., 2021; Moradi & Groth, 2019; Parisi et al., 2020; Pasman et al., 2023; Priambodo et al., 2021; Vilas & Magraw, 2020a).

También se observó un riesgo en la literatura que no se había considerado anteriormente y está relacionado con la acción del hidrógeno sobre la infraestructura y diferentes metales que se utilizan en tanques y tuberías. Se identifica al gas de hidrógeno como una sustancia corrosiva con ciertos metales como el acero, entre otros metales (Gabet et al., 2023; Mackinnon & Gomersall, 2019; McKnight & Kirkwood, 2023; Qi & Zhang, 2020; Shadravan & Amani, 2019).

Finalmente, se encontraron otros riesgos relacionados con el hidrógeno, aunque no necesariamente están involucrados con el campo de la seguridad industrial del hidrógeno. Entre estos riesgos se tiene por ejemplo el riesgo de intoxicación cuando se mezcla el hidrógeno con otros gases y este es liberado en un espacio específico (Nirmala & Durga Shree, 2022; Pasman et al., 2023; Priambodo et al., 2021). También se realiza una identificación de riesgos ambientales derivados de la utilización del hidrógeno comparándolo también con los riesgos de los combustibles fósiles en el mismo campo, y del efecto en la salud pública (Jansons et al., 2022; Kar et al., 2022; Yakubson, 2022). De igual manera, se analizan los riesgos a nivel de la industria y para esto se consideran los riesgos a gran escala del manejo del hidrógeno, su transporte y la eficiencia en los diferentes procesos o etapas de la cadena de suministro (De-León Almaraz et al., 2022; Erdoğan & Güler, 2023; Jansons et al., 2022; Thaysen et al., 2023).

En la Tabla 3 se puede observar un resumen de los artículos que abordan la temática de los riesgos y la relación que tienen con los mismos.

Tabla 3

Artículos que abordan el tema de riesgos en la producción de hidrógeno.

Cita	Relación con los riesgos	Tipo de riesgos mencionados
(Sato & Ohashi, 2019)	Análisis de incertidumbre en la composición del gas	Riesgo de fuga de gases tóxicos
(Qi & Zhang, 2020)	Se mencionan los riesgos asociados al almacenamiento de gas	Corrosión de contenedores por acción del gas
(Vilas & Magraw, 2020b)	Identificación de riesgos con un enfoque basado en escenarios	Ignición, explosión
(Maksymov & Kostylev, 2022)	Riesgo de fuga de gas de hidrógeno	Se habla de los sensores como una manera de detectar estas fugas
(C. Yang et al., 2021)	Análisis de los riesgos asociados con la combustión del hidrógeno en la síntesis de otros elementos	Incendio
(Pasman et al., 2023)	Revisión de literatura general acerca de los riesgos asociados y las medidas que se pueden tomar	Liberación de H ₂ licuado, detonación, llamas, explosiones, falla de equipos
(Nirmala & Durga Shree, 2022)	Análisis de riesgo en industria de semiconductores	Riesgo de fuga e intoxicación
(McKnight & Kirkwood, 2023)	Riesgos asociados al manejo de las tuberías y sistemas de distribución de gas	Asociación con riesgos de la infraestructura del gas con el hidrógeno
(Kim et al., 2022)	Análisis del riesgo de incendio	Riesgo de inflamación
(Jansons et al., 2022)	Se mencionan los riesgos asociados al manejo del hidrogeno y el riesgo de dependencia del hidrógeno	En cuanto a los riesgos en general, se habla del manejo del hidrógeno y las necesidades de establecer un manejo eficiente y responsable del mismo
(Davis et al., 2022)	Se mencionan los riesgos asociados a la distribución del gas	Fuga, acumulación de gas, fragilización por la acción del hidrógeno, explosiones que afecten la vida o la propiedad cercana
(Cao et al., 2021)	Mitigación de las explosiones	Riesgo de explosión
(X.-J. Xu et al., 2022)	Se menciona la necesidad de utilizar métodos comprensivos para la identificación y evaluación de riesgos	Fuga, combustión, difusión y explosión
(Erdoğan & Güler, 2023)	Se toman riesgos independientes en cada etapa del proceso de la cadena de suministro	Riesgo de producción, riesgo de transporte y riesgo del uso
(De-León Almaraz et al., 2022)	Minimización del riesgo	Riesgo de seguridad en la industria

(Hadeh et al., 2020)	Análisis de riesgo con el método FAST, método de análisis disfuncional y HAZOP	Explosión, incendio
(Gao et al., 2022)	Análisis de riesgos asociados con el manejo del hidrógeno	Riesgo de fuga, incendio y explosión por efecto del hidrógeno
(Priambodo et al., 2021)	Riesgos asociados con otros gases de enfriamiento para reactores de hidrógeno	Envenenamiento por CO, incendio, explosión
(Moradi & Groth, 2019)	Identificación de riesgos actuales y futuros	Riesgos generales en la industria del hidrógeno
(Kar et al., 2022)	Evaluación de riesgos	Evaluación de riesgos asociados con el licuado, la salud pública
(Mazzini et al., 2021)	Evaluación del riesgo de explosión	Riesgo de explosión y acumulación de hidrógeno y tungsteno
(Aliabadi et al., 2020)	Identificación de riesgos por medio de análisis de causas raíz, redes bayesianas, entre otros para fugas de gas de hidrógeno	Explosión, incendio
(Parisi et al., 2020)	Reducción de la producción de hidrógeno	Detonación
(Shadravan & Amani, 2019)	Se identifica la acción del hidrógeno sobre el acero y los efectos sobre las tuberías	Riesgos asociados a la fragilización por la acción del hidrógeno
(Thaysen et al., 2023)	Evaluación del riesgo para la recolección y almacenamiento de hidrógeno	Riesgo microbiano
(Mackinnon & Gomersall, 2019)	Se mencionan riesgos generales asociados con las energías verdes	Riesgos en las tuberías de distribución
(Gabet et al., 2023)	Relación entre riesgos y materiales utilizados	Se habla del riesgo de fragilización del acero por acción del hidrógeno y también el riesgo de fuga
(Yakubson, 2022)	Identificación de riesgos asociados al remplazo de combustibles fósiles por hidrógeno	Se mencionan riesgos ambientales de la implementación del hidrógeno
(Mahant et al., 2021)	Habla parcialmente de los riesgos generales del hidrógeno	Inflamabilidad, explosión, baja energía de detonación o ignición, flama no luminosa, alta velocidad de difusión
(Martin et al., 2022)	No se centra principalmente en los riesgos pero menciona la fuga	Se analiza de la posibilidad de fuga
(Ren et al., 2023)	Identificación de riesgos dependiendo del tipo de almacenamiento	Riesgo de fuga
(Idris-Idah & Abdulkadir, 2022)	Se habla del riesgo de hidrógeno en el contexto de la industria en Nigeria	Se menciona el riesgo de inflamación del hidrógeno

7.4.2 Prevención de riesgos y protocolos de seguridad

Al igual que la parte de los riesgos, la parte de prevención de los riesgos es importante y se ha revisado en los artículos encontrados, sin embargo, el tema de seguridad se trata principalmente en las normativas de comités o asociaciones técnicas ya sean internacionales o dentro de los países. De estas normas técnicas, Molkov (2012) menciona algunas de diferentes países y se considera relevante tener en cuenta estas normativas. En la Tabla 4 se tiene un resumen de diferentes normas que ha mostrado el autor.

Tabla 4

Normas técnicas relacionadas con el hidrógeno. Fuente: (Molkov, 2012).

Entidad	País/región	Norma
ISO comité 197	Internacional	ISO/TR 15916:2004 Consideraciones básicas para la seguridad de los sistemas de hidrógeno
		ISO 14687 Combustible de hidrógeno – especificaciones del producto
		ISO 16110-1:2007 Generadores de hidrógeno que utilizan tecnologías de procesamiento de combustible – parte I: Seguridad
		ISO/TS 20100:2008 Hidrógeno gaseoso – estaciones de abastecimiento
		ISO 17268:2006 dispositivos de conexión para hidrógeno comprimido para vehículos que se abastecen por superficie
		ISO 22734-1:2008 Generadores de hidrógeno que utilizan el proceso de electrólisis del agua – parte I: aplicaciones comerciales e industriales
		ISO 26142:2010 Aparatos de detección de hidrógeno – aplicaciones estacionarias
ISO comité técnico 22 sub comité 21	Internacional	ISO 23273-2:2006 vehículos a celda de combustible para carretera – especificaciones de seguridad – parte 2: Protección ante amenazas del hidrógeno para vehículos alimentados con hidrógeno comprimido
		ISO 23273-2:2006 vehículos a celda de combustible para carretera – especificaciones de seguridad – parte 3: Protección de las personas contra el choque eléctrico, etc.

Comisión Electrotécnica Internacional (IEC por sus siglas en inglés)	Internacional	IEC 62282-2 (2007-03) Módulos de celdas de combustible
		IEC 62282-3-1 (2007-04) Sistemas de poder de celdas de combustible estacionarias
		IEC 62282-3-200 (2011-10) Sistemas de poder de celdas de combustible estacionarias – métodos de pruebas de desempeño
		IEC 62282-3-3 (2007-11) Sistemas de poder de celdas de combustible estacionarias – instalación
		IEC 62282-5-1 (2007-02) dispositivos de celdas de combustible portátiles – Seguridad
		IEC 62282-6-100 (2010-03) Sistemas de poder de micro celdas de combustible – Seguridad
		IEC/PAS 62282-6-150 micro celdas de combustible – Seguridad
		IEC 62282-6-200 (2007-11) Sistemas de poder de micro celdas de combustible – desempeño
		IEC 62282-6-300 (2009-06) Sistemas de poder de micro celdas de combustible – intercambiabilidad de los cartuchos de combustible
Asociación nacional de protección contra incendios (NFPA por sus siglas en inglés)	Estados Unidos	NFPA 2 Código de tecnologías de hidrógeno
		NFPA 52 Código de sistemas de combustible gaseoso vehicular
		NFPA 55 Gases comprimidos y fluidos criogénicos
		NFPA 50A Estándar para sistemas de hidrógeno gaseoso en lugares de consumidores
		NFPA 50 B Estándar para sistemas de hidrogeno licuado en sitios de consumidores
		NFPA 221 Estándar para paredes contra incendio de alto impacto, paredes contra incendios y barreras contra incendios
		NFPA 853 Estándar para la instalación de sistemas de poder de celdas de combustible estacionarias
Sociedad de Ingenieros Automotrices	Estados Unidos	J2578 práctica recomendada para la seguridad general de vehículos de celda de combustible
		J2601 Protocolos de abastecimiento de combustible para vehículos de superficie de labores livianas que funcionan a hidrógeno
		J2719 Reporte de información Acerca del desarrollo de una guía de calidad para el hidrógeno para automóviles a celdas de combustible
		J2799 dispositivo de conexión de superficie para vehículos a hidrógeno comprimido
European industrial Gas Association (EIGA por sus	Europa	IGC Document 122/04 impactos ambientales de las plantas de hidrógeno
		IGC Document 15/06 estaciones de hidrógeno gaseoso
		IGC Document 121/04 tuberías de transporte de hidrógeno
		IGC Document 6/02 Seguridad en el almacenamiento, manipulación y distribución del hidrógeno líquido

siglas en inglés)		IGC Document 23/00 Entrenamiento en seguridad para empleados
		IGC Document 75/07 Determinación de distancias de seguridad
		IGC Document 134/05 Atmósfera potencialmente explosiva
Asociación de Gas comprimido (CGA por sus siglas en inglés)	Estados Unidos	G-5.3 Especificación del hidrógeno para comercialización
		G 5.4 Estándar para sistemas de tubería de hidrógeno en ubicaciones de usuarios
		G 5.5 sistemas de ventilación de hidrógeno
		G 5.8 sistemas de tuberías de hidrógeno a alta presión en ubicaciones de consumidores
		C 6.4 Métodos para inspección visual externa de contenedores e instalaciones de Gas Natural vehicular y combustible de hidrógeno para vehículos
Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME por sus siglas en inglés)	Estados Unidos	ASME B31.12 Tuberías y líneas de tubería para hidrógeno
		ASME PTC 50 código de prueba de desempeño para el desempeño de sistemas de poder de celdas de combustible
		ASME BPVC Código para calderas y presión de embarcaciones, etc.
Asociación de estándares canadiense (CSA por sus siglas en inglés)	Canadá	ASNI/CSA America FC 1-2004 Sistemas de poder para celdas de combustible estacionarias
		ASNI/CSA America FC 3-2004 sistemas de poder para celdas de combustible
		CSA America HPRD1 Estándares para los requerimientos básicos de dispositivos de liberación de presión para contenedores de hidrógeno combustible para vehículos

En cuanto a la literatura académica, a continuación, se presentan en general diferentes opciones para la prevención y la seguridad ante el hidrógeno. Sin embargo, los textos encontrados se enfocan principalmente en aplicaciones específicas que se pueden usar para estos fines, sin embargo, también existen casos en los que se utilizan los análisis de riesgos para dar recomendaciones al respecto.

Uno de los enfoques que se le ha dado a la prevención viene de parte del diseño. Este diseño está encaminado a evitar que se materialicen los riesgos y se basa principalmente en la prevención de riesgos como fugas y el comportamiento de los gases en diferentes situaciones que pueden ser peligrosas (Aliabadi et al., 2020; Martin et al., 2022; Sato & Ohashi, 2019).

El segundo enfoque que se encontró en los textos analizados está relacionado con el monitoreo en la operación. Este monitoreo busca identificar cuando se llegan a ciertas condiciones específicas que pueden ser riesgosas y requieren de una acción específica. Los sensores utilizados pueden ser para los gases específicos como el dióxido de carbono o el hidrógeno, así como para otras condiciones ambientales como la temperatura, humedad, entre otros indicadores relevantes (Davis et al., 2022; Priambodo et al., 2021; Thaysen et al., 2023).

El enfoque de prevención con base en la evaluación de riesgos también está presente y se han utilizado métodos como la elaboración de escenarios y reducir la producción de hidrógeno que puede ser nociva (Mazzini et al., 2021), por otro lado, se han analizado los métodos de valoración del riesgo para identificar las debilidades de los mismos y tomar acciones en cuanto a la evaluación y a los riesgos en específico también (Hadeef et al., 2020).

Pasando de la prevención a la mitigación, se consideran entonces en los artículos encontrados dos formas de mitigar los efectos de la materialización de riesgos. Ambos artículos están relacionados con el riesgo de detonación y se busca con ellos la minimización de los daños producidos por potenciales detonaciones. Se puede tener entonces el uso de dispositivos de trampa que reduzcan el impacto (Pasman et al., 2023) o también se considera la necesidad de dar ventilación a la detonación para que la energía liberada tenga afectaciones menores en la infraestructura (Cao et al., 2021).

En la Tabla 5 puede observarse la información acerca de esos artículos y su contenido.

Tabla 5

Artículos que tratan de la prevención de riesgos o incidentes.

Cita	Relación con la prevención	Tipo de prevención
(Sato & Ohashi, 2019)	Prevención desde el diseño	Diseño de plantas nucleares con base en el análisis de los gases tóxicos
(Pasman et al., 2023)	Revisión de literatura acerca de la ingeniería para la seguridad	Trampas para la mitigación de las explosiones, verificación para mitigación del fuego, estándares de manejo de H ₂ , recombinadores usados en plantas nucleares
(Davis et al., 2022)	Se aborda la prevención desde el control	Se presenta el monitoreo por medio de sensores de las capacidades de licuado entre gas e hidrógeno como una forma de prevenir los riesgos
(Cao et al., 2021)	Se basa en la mitigación, mas no en la prevención de las explosiones por medio de la ventilación proporcionada en estos incidentes	Reducción de los efectos de las explosiones
(Hadeif et al., 2020)	Propuesta de medidas de prevención	Medidas con base en las debilidades del análisis de riesgo
(Priambodo et al., 2021)	Conclusiones de evaluación	Instalación de sensores de hidrógeno y de CO
(Mazzini et al., 2021)	Recomendaciones	Elaboración de escenarios para identificar el riesgo y reducir la producción de hidrógeno
(Aliabadi et al., 2020)	Prevención desde el diseño	Evaluación del riesgo desde el diseño de los contenedores
(Thaysen et al., 2023)	Recomendaciones de seguridad para hidrógeno en pozos de gas	Se hacen recomendaciones en cuanto al manejo el hidrógeno de acuerdo a la temperatura de los pozos
(Martin et al., 2022)	Diseño de especificaciones para prevención de fugas	Diseño de infraestructura en términos de materiales y condiciones de sellado.

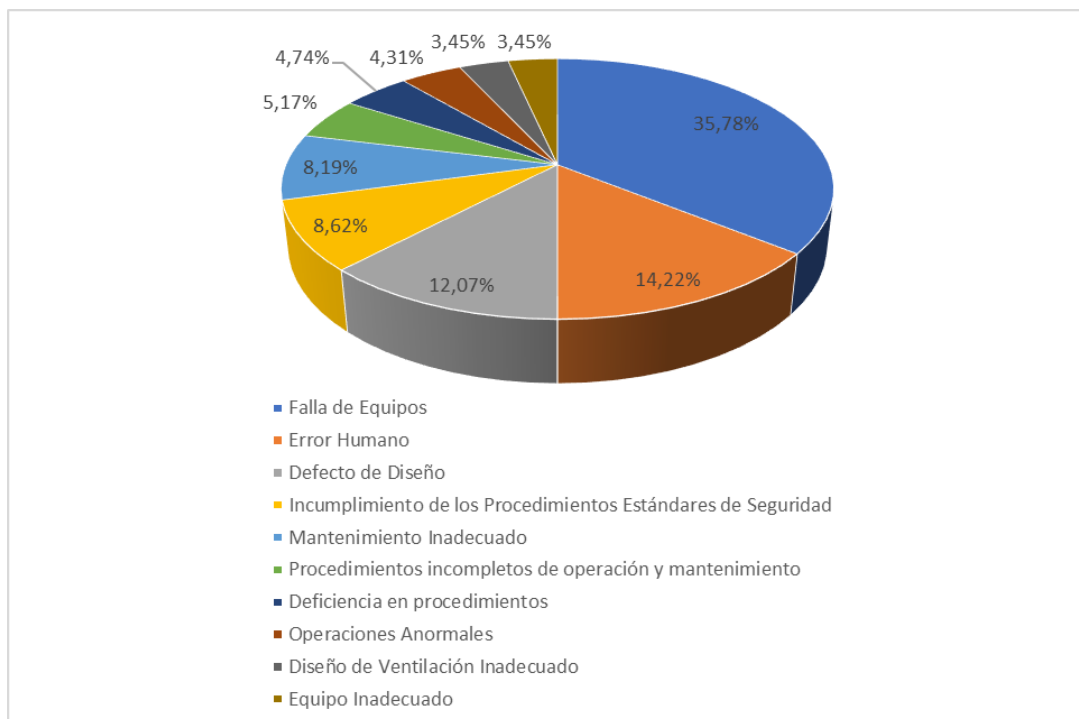
7.5 Incidentes y accidentes relacionados con el hidrógeno

En general, se ha encontrado información acerca de incidentes generales relacionados con el hidrógeno, sin embargo, no se ha encontrado hasta el momento información acerca de incidentes que hayan pasado específicamente en la industria del gas y del petróleo o que estén relacionados solamente con la producción del hidrógeno.

F. Yang et al. (2021) encontraron que la principal causa probable de los incidentes relacionados con el hidrógeno es la falla de los equipos (35.78 %) seguido por el error humano (14.22%), luego se encuentran las fallas de diseño (12.07%), y el no seguir los procedimientos de seguridad (8.62%), finalmente, se encuentra el mantenimiento inadecuado (8.19%) y los procedimientos de operación y mantenimiento incompletos (5.17%) como se puede ver en la Figura 17. Estas causas abarcan el 84.05% de los incidentes registrados (F. Yang et al., 2021).

Figura 17

Causas probables de incidentes relacionados con el hidrógeno. Fuente: F. Yang et al. (2021).

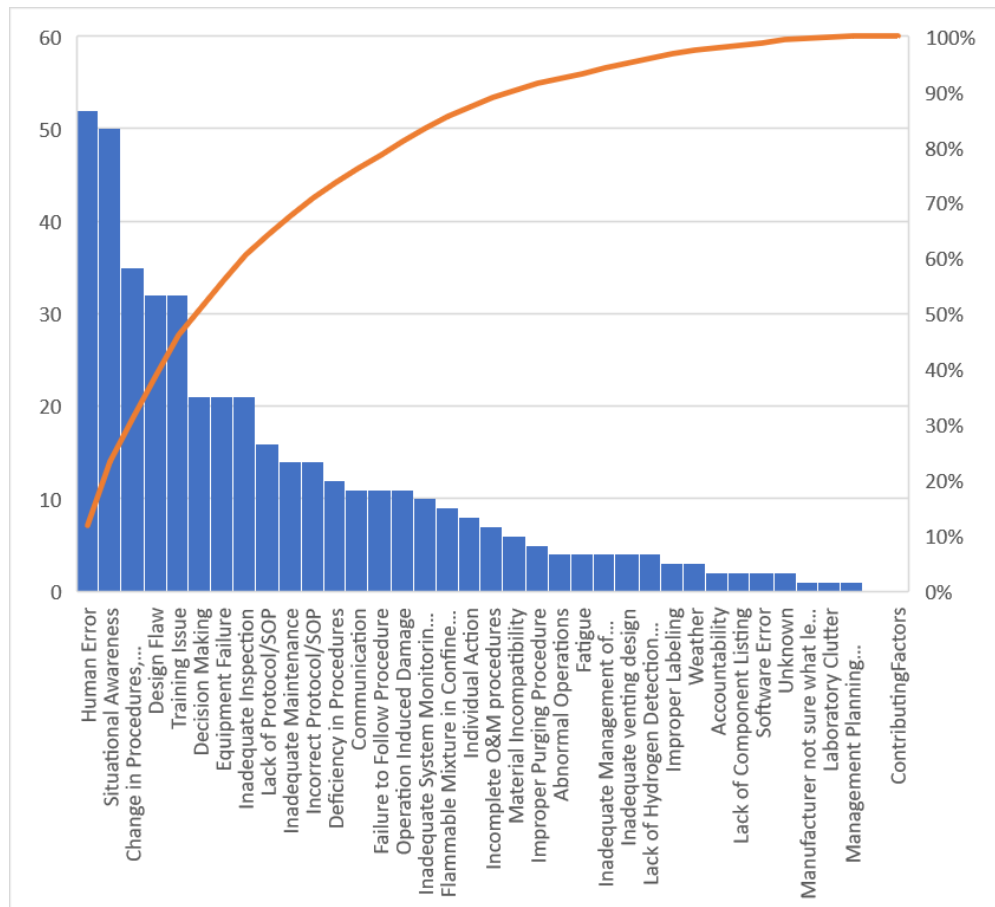


Una base de datos enfocada en Estados Unidos, es H2 Tools, que es una herramienta financiada y apoyada por la Oficina de Eficiencia Energética del Departamento de Energía de Estados Unidos para apoyar la implementación de prácticas y procedimientos que garanticen el manejo seguro del hidrógeno (H2 Tools, n.d.). Este sitio web contiene información acerca de

accidentes con el hidrógeno. En la Figura 18 se observan los factores que han estado involucrados en los accidentes e incidentes.

Figura 18

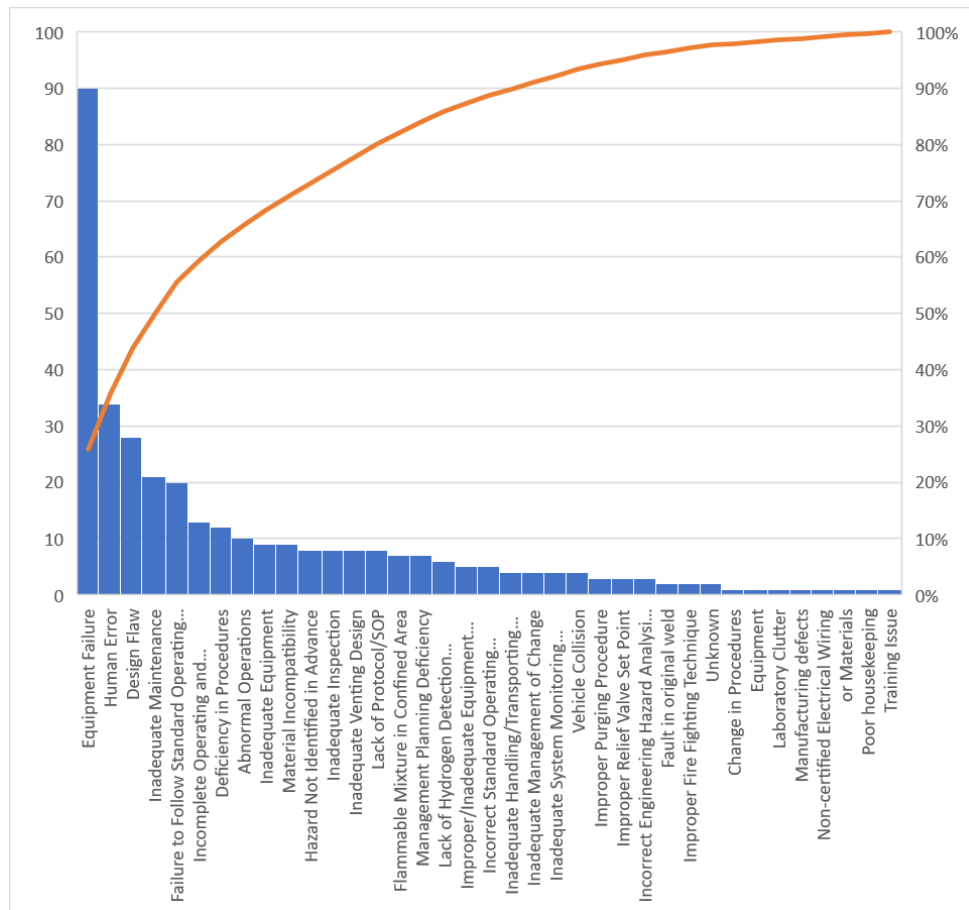
Factores que contribuyeron a los incidentes. Fuente: (H2 Tools, n.d.).



Si bien los factores mencionados son variados, las causas probables que se han identificado en esta base de datos son los defectos de diseño y esta causa está seguida por el error humano y la ausencia del uso de buenas prácticas para la gestión y el manejo de los sistemas de producción y uso del hidrógeno. En la Figura 19 se puede observar cuáles son las causas identificadas y la frecuencia de accidentes o incidentes causados por cada uno de estos factores.

Figura 19

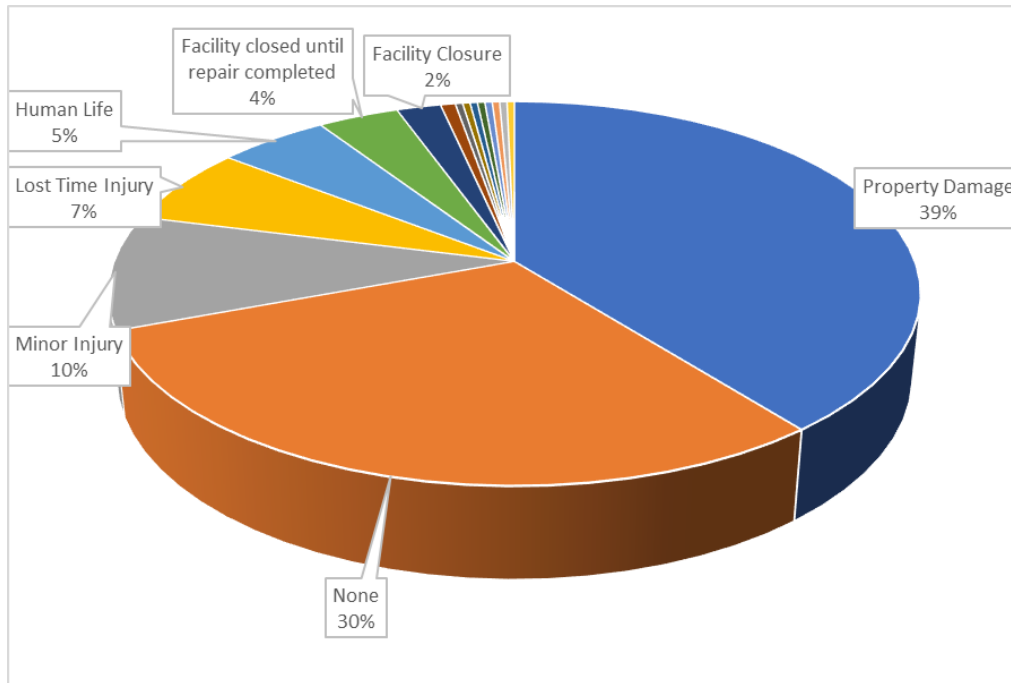
Causas probables para accidentes o incidentes con hidrógeno. Fuente: (H2 Tools, n.d.).



Por otro lado, si se tiene en cuenta el impacto o los daños y pérdidas ocasionadas por esos incidentes, se identifica que cerca de un 80% de los resultados son daños a la propiedad, incidentes sin impactos y lesiones menores a personas. Aunque en la mayor parte de los casos no resultan personas lesionadas o afectadas, la pérdida de vidas se ubica en un quinto lugar de los accidentes y esto ocurre en un 5% de los eventos registrados. En la Figura 20 se puede observar esta distribución de los daños o pérdidas causados.

Figura 20

Daños y pérdidas ocasionadas por los incidentes Fuente: (H2 Tools, n.d.).



Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se encuentran lecciones aprendidas que pueden estar relacionadas ya sea con el desarrollo y diseño de los sistemas, la instalación y modificación de los mismos, el factor humano y la respuesta ante las emergencias (Wen et al., 2022).

En cuanto al diseño de los sistemas, es necesario tener en cuenta factores como los materiales que son compatibles con el hidrógeno y con otras sustancias que puedan estarse manejando para evitar corrosión y también se tienen en cuenta ciertas propiedades de los materiales como la fatiga, las condiciones ambientales de operación. También se requiere garantizar la ventilación adecuada de los sistemas y el flujo del hidrógeno, así como acumulación del mismo en ciertos espacios (Wen et al., 2022). De igual manera, se considera también el uso de elementos de

medición y de eliminación de aire y agua del hidrógeno que se entrega al usuario final como prevención del riesgo de interacción entre sustancias (Bacquart et al., 2020).

Para la fabricación, instalación y modificación de los sistemas, se considera entonces aspectos similares al diseño, pero también se debe tener en cuenta que los materiales y piezas pueden tener puntos débiles que pueden requerir manejo especial para garantizar la integridad del sistema (Wen et al., 2022).

En materia del factor humano, como lecciones aprendidas, se tiene entonces la programación de inspecciones y mantenimientos para los sistemas y un especial cuidado a las señales arrojadas por los dispositivos de seguridad durante el mantenimiento. Esto debe ir acompañado de instrucciones claras a ser cumplidas por los operarios y técnicos que están involucrados en el proceso y también de educación en cuanto a los procedimientos a seguir. Estos dos últimos puntos son también aplicables para los procedimientos de manejo de emergencias para garantizar con estos una acción rápida y eficaz cuando se presenta un incidente (Wen et al., 2022). Adicionalmente, se ha identificado que la capacitación y el diseño de protocolos de inspección periódica de instalaciones, así como la identificación de riesgos son también relevantes para la prevención de los riesgos asociados con el hidrógeno (Campari et al., 2023).

En cuanto a incidentes y lecciones aprendidas, se ha identificado también la necesidad de implementar protocolos estructurados para la identificación de riesgos relacionados con el hidrógeno y su manipulación; en este sentido, se ha recomendado la implementación y desarrollo de métodos cualitativos de análisis de riesgos que pueden realizarse tomando como insumo la información reportada en bases de datos específicas del hidrógeno (West et al., 2022). De ahí la importancia de tener un reportaje y registro confiable de los accidentes e incidentes en bases de

datos robustas que puedan proporcionar información completa, significativa y relevante para el análisis e identificación de posibles riesgos.

Las bases de datos relacionadas con el hidrógeno son una buena fuente de información que puede utilizarse en la identificación de oportunidades de mejora en general dentro de las industrias que manejan este elemento. Sin embargo, no se ha encontrado un seguimiento a las acciones que toman las empresas después de sufrir este tipo de accidentes o la aplicación de las lecciones aprendidas en los procedimientos de operación de la industria. Sin embargo, la literatura sí resalta la creación de regulaciones por parte de los gobiernos o instituciones creadoras de estándares de calidad después de la identificación de las causas probables de accidentes e incidentes relacionados con el hidrógeno (Lyubomirov Ivanov & Chow, 2022).

7.6 Industrias involucradas

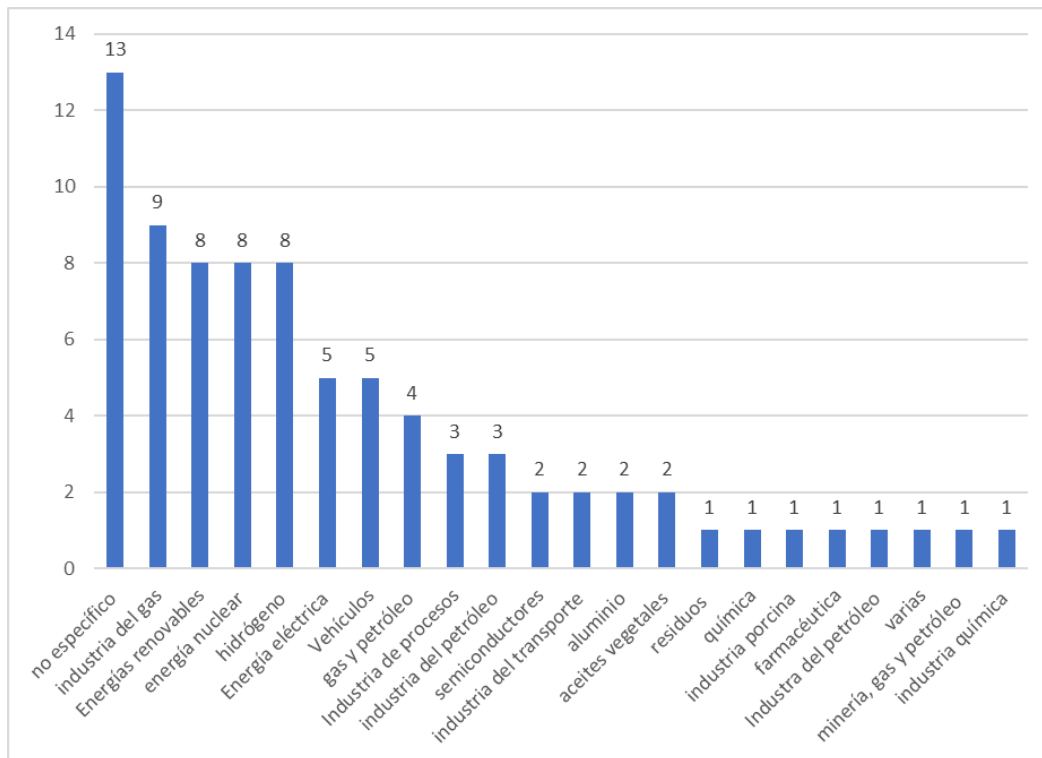
Teniendo en cuenta que la identificación de causas para los accidentes e incidentes relacionados con el hidrógeno no se encuentran discriminados por sector económico, se consideró pertinente tomar en cuenta en este trabajo, resultados que pueden estar relacionados con otros sectores económicos e industrias.

Considerando esto, se pudo identificar además de los puntos analizados en cuanto a la producción de hidrógeno en las industrias del gas y el petróleo, otros artículos relacionados con otras industrias en donde se trata también la producción de hidrógeno y en algunos casos los peligros o riesgos asociados. Se considera relevante ampliar entonces en este punto para conocer de manera general el uso u otras aplicaciones de este gas.

En la Figura 21, se pueden observar las diferentes industrias que se encontraron y la cantidad de artículos encontrados asociados a ellas. Se puede ver que en su mayoría hay artículos relacionados con el hidrógeno pero que no están aplicados a una industria específica, sino que se centran en el proceso o ciertas características de la producción de hidrógeno.

Figura 21

Distribución de publicaciones según la industria.



7.6.1 Industrial del petróleo y el gas

Esta es la industria en la que este estudio se enfoca y, por tanto, la mayor parte de resultados se concentran en estas industrias, principalmente en la del gas. En general, estos artículos se

enfocan en los riesgos, pero también mencionan otros temas relacionados con la producción de hidrógeno como son los métodos de producción a partir de gases, que en los artículos incluidos se utiliza principalmente el reformado (Ehlig-Economides & Hatzignatiou, 2021; Ngo et al., 2019; Nguyen et al., 2019; P.-F. Song et al., 2020) o también a partir del petróleo por procesos diferentes entre los que se destaca la descomposición de hidrocarburos (Askarova et al., 2023; Idris-Idah & Abdulkadir, 2022; Janajreh et al., 2020; P. Song et al., 2023).

En estos artículos también se habla del manejo y la cadena de suministro del hidrógeno. Davis et al. (2022) mencionan la posibilidad de disminuir el carbono distribuido en el gas para consumo incrementando la proporción de hidrógeno; Martin et al. (2022) habla de la mezcla del hidrógeno con otros gases y su comportamiento dentro de ciertos conductos; Gurieff et al. (2021) menciona el aprovechamiento de la red de distribución de gas natural para comenzar a distribuir hidrógeno con la misma infraestructura y (Qi & Zhang. (2020) habla del diseño de contenedores para el manejo del hidrógeno específicamente.

Mayor detalle de los artículos en esta industria se puede observar en Tabla 6.

Tabla 6

Distribución de publicaciones según la industria.

Cita	Industria	Notas
(Davis et al., 2022)	Industria del gas	Se habla en el artículo del uso de hidrógeno para disminuir la concentración de carbono en la distribución de gas metano como combustible. En este texto se menciona también la necesidad de monitorear el licuado y la distribución de estos gases para evitar la materialización de los riesgos
(Shadravan & Amani, 2019)	Gas y petróleo	El artículo analiza los efectos del hidrógeno en las tuberías de acero que se utilizan en la industria del gas y el petróleo, se discuten los métodos de atrapamiento del hidrogeno y los mecanismos para realizarlo
(Thaysen et al., 2023)	Industria del gas	Estudio enfocado en la utilización del hidrógeno que se encuentra en rocas porosas dentro de pozos de gas vacíos
(Pilić et al., 2019)	Gas y petróleo	El artículo menciona que el hidrógeno es ampliamente utilizado en la industria y por eso se requiere que la producción sea estable, con base en

		esto, se busca identificar los posibles riesgos de daño que puede sufrir la unidad de producción de hidrógeno que se utiliza en esta industrial
(Gabet et al., 2023)	Gas y petróleo	En el artículo se mencionan los materiales que podrían utilizarse para el transporte de hidrógeno producido en estaciones de extracción marina de gas o petróleo
(Askarova et al., 2023)	Industria del petróleo	El artículo habla de la producción de hidrógeno por medio de la combustión del petróleo dentro de un depósito de metano.
(Ngo et al., 2019)	Industria del gas	Se habla del proceso de reformado del metano en gas natural para la generación de hidrógeno y de sus flujos de gases y calor
(Ehlig-Economides & Hatzignatiou, 2021)	Industria del gas	El artículo se refiere a la generación de hidrógeno azul, que permite generar hidrógeno a partir de combustibles fósiles y que además garantiza una emisión de CO2 neta de cero.
(Martin et al., 2022)	Industria del gas	Se hacen pruebas con diferentes mezclas de gases con diferentes concentraciones de hidrógeno con el fin de verificar las posibilidades de fuga de hidrógeno en cada caso para las opciones disponibles de almacenamiento bajo tierra
(Gurieff et al., 2021)	Industria del gas	Se habla de la situación actual y de las posibilidades de actualizar la red de gas y utilizar hidrógeno para descarbonizar el consumo. Adicionalmente, se consideran los factores económicos asociados
(P. Song et al., 2023)	Industria del petróleo	Se habla acerca de la producción de hidrógeno y la dificultad de lograr ciertos niveles específicos de producción de hidrógeno
(Idris-Idah & Abdulkadir, 2022)	industria del petróleo	En el artículo se habla de la posibilidad de utilizar fuentes de energía diferentes a los combustibles fósiles para que la industria y la sociedad puedan suplir sus requerimientos de energía.
(Nguyen et al., 2019)	Industria del gas	Se toma la producción de hidrógeno por medio de reformado del metano y a partir de esto, se diseña un reactor por medio de la simulación para lograr mayor producción con mejor eficiencia térmica
(Janajreh et al., 2020)	Industria del petróleo	Se plantea la producción de hidrógeno a partir de la digestión en dos pasos de los desechos de hidrocarburos y los lodos resultantes del tratamiento de purificación del agua
(P.-F. Song et al., 2020)	Industria del gas	Utilización de tecnologías de procesos químicos en bucle para incrementar la eficiencia de la producción de hidrógeno y metanol como combustibles verdes
(Qi & Zhang, 2020)	Industria del gas	Se analiza el almacenamiento de gases y los materiales más idóneos para elaborar los contenedores de acuerdo con la industria en que se aplican. Se hacen conclusiones con base en la industria del gas y petróleo
(Berenblyum & Surguchev, 2022)	Industria del gas	En el texto se menciona el desarrollo del hidrógeno como fuente de energía y también se menciona la posibilidad de producirlo desde depósitos subterráneos de metano para obtener una fuente más barata y con menos emisiones que la electrólisis del metano o la reformación del mismo

7.6.2 Generación de energía

Considerando que el hidrógeno es un combustible, también se ha encontrado una gran cantidad de artículos que hablan del mismo como tal en la generación de energía o también se considera al hidrógeno como un residuo del proceso de generación de energía que puede aprovecharse.

El grupo más grande en cuanto a la generación de energía son las energías renovables. Aquí, se han encontrado documentos en los que se utiliza el hidrógeno como una fuente de energía renovable y alternativa no solo para energía eléctrica, sino también para la generar calefacción, apoyar el transporte, entre otros (Jansons et al., 2022; Moradi & Groth, 2019). También se han considerado casos en los que las energías renovables generan hidrógeno que puede ser capturado para su utilización en otro tipo de procesos que puedan ser beneficiosos (Dhanya et al., 2020; Joskin et al., 2021; Kong et al., 2020; Köpke et al., 2023; Mehrjerdi et al., 2022; Vangas et al., 2023).

En el caso de la energía nuclear, se definen principalmente al hidrógeno como un elemento que se producen en el proceso y puede representar un riesgo de detonación para las instalaciones debido a su manejo y almacenamiento, en los textos analizados se ha considerado esto y también se han realizado estudios para identificar el impacto y reducirlo (Basic et al., 2023; Mazzini et al., 2021; Parisi et al., 2020; Priambodo et al., 2021; Sato & Ohashi, 2019; Wu et al., 2022; H. Yu et al., 2022), sin embargo, también se presenta el hidrógeno excedente de la producción de energía nuclear como un subproducto aprovechable para la generación de energía verde (Gao et al., 2022).

Por otro lado, se toman los casos donde se habla de otros tipos de generación de energía eléctrica, que en algunos casos puede generar excedentes de hidrógeno que pueden ser

aprovechados para incrementar o mejorar la generación de electricidad (Colbertaldo et al., 2020; Modabber & Rabeti, 2022; Nikolaidis & Poullikkas, 2023; Orjuela-Abril et al., 2023; S. Wang et al., 2023) y también se menciona un caso en el que se utiliza el hidrógeno como combustible para la generación de energía eléctrica (Orjuela-Abril et al., 2023; S. Wang et al., 2023).

En la Tabla 7, se puede ver con mayor detalle los artículos analizados y las notas de su contenido.

Tabla 7

Generación de energía en diferentes sectores energéticos.

Cita	Industria	Notas
(Sato & Ohashi, 2019)	Energía nuclear	Se intenta establecer las condiciones de habitabilidad de un cuarto que se encuentra lleno por gases tóxicos
(Nikolaidis & Poullikkas, 2023)	Energía eléctrica	Se habla de los diferentes tipos de sensores para el manejo del hidrógeno en la generación de energía eléctrica y los campos de acción en la investigación de los mismos. No se habla en cuanto a un método específico, y se mencionan fortalezas y puntos débiles de cada tecnología.
(Joskin et al., 2021)	Energías renovables	Se toma la generación de hidrógeno a partir de excedentes de energía de las fuentes renovables y se determina que el 20% de la energía eléctrica se utiliza para la producción de hidrógeno. Adicionalmente, se afirma que el almacenamiento de hidrógeno no tiene un carácter estacional
(Jansons et al., 2022)	Energías renovables	En el artículo se analiza la implementación del hidrógeno para la descarbonización de la economía y la industria y también se habla del manejo, transporte y comercialización del hidrógeno.
(Dhanya et al., 2020)	Energías renovables	Se analiza la manera de utilizar los diferentes desperdicios para generar biocombustibles, entre ellos el biohidrógeno. Sin embargo, no se hace un énfasis en los riesgos asociados a esta producción
(S. Wang et al., 2023)	Energía eléctrica	Se habla de la producción de energía eléctrica y se considera la inyección de gases alternativos como el hidrógeno para lograrlo
(Gao et al., 2022)	Energía nuclear	Se toma la producción de hidrógeno nuclear como una fuente de combustible limpio y también se determinan las distancias entre el almacenamiento del hidrógeno y las plantas nucleares

(Mehrjerdi et al., 2022)	Energías renovables	Se habla de la posibilidad de utilizar los excedentes de la producción limpia de energía para generar hidrógeno que pueda ser utilizado en la desalinización de agua para el consumo humano
(Mazzini et al., 2021)	Energía nuclear	En este artículo, se revisa la producción de hidrógeno en una cámara de vacío dentro de una planta nuclear y la prevención de dicha explosión
(Parisi et al., 2020)	Energía nuclear	Artículo relacionado con el sector de la energía nuclear en donde se intenta reducir la producción de hidrógeno para minimizar el riesgo
(Wu et al., 2022)	Energía nuclear	Se toma en cuenta la posibilidad de un accidente y se analizan los riesgos derivados de la propagación o escape de hidrógeno durante ese tipo de evento
(H. Yu et al., 2022)	Energía nuclear	Se analizan los riesgos de la producción de hidrógeno en una planta nuclear
(Basic et al., 2023)	Energía nuclear	Se toma la producción de hidrógeno y su almacenamiento como el factor de riesgo y el daño del contenedor como el detonante
(Modabber & Rabeti, 2022)	Energía eléctrica	Se toman diferentes fuentes de generación y se produce hidrógeno con estas fuentes
(Colbertaldo et al., 2020)	Energía eléctrica	Se simula el uso de la red de energía eléctrica y gas junto con la producción de hidrógeno y su almacenamiento y su efecto en el consumo de energía y el remplazo de combustibles fósiles
(Orjuela-Abril et al., 2023)	Energía eléctrica	Se identifican las tecnologías que se pueden usar para generar energía eléctrica dentro de la industria colombiana. No se toman en cuenta riesgos o prevención
(Köpke et al., 2023)	Energías renovables	El artículo plantea la utilización de plantas eólicas después de la finalización del periodo útil con el fin de generar hidrógeno en esos sitios con la infraestructura existente
(Vangas et al., 2023)	Energías renovables	Generación y almacenamiento de hidrógeno utilizando la energía de plantas de energía de energía renovables.
(Moradi & Groth, 2019)	Energías renovables	Se toma el hidrógeno como alternativa verde de generación de energía y se analizan las posibilidades de distribuir el hidrógeno
(Mackinnon & Gomersall, 2019)	Energías renovables	Se consideran opciones para incrementar la descarbonización y entre ellas, la utilización del hidrógeno limpio se considera como una opción
(Priambodo et al., 2021)	Energía nuclear	Se toman los parámetros asociados con la producción y liberación de gases en el reactor y el efecto de los mismos
(Kong et al., 2020)	Energías renovables	Se habla de la producción de hidrógeno a partir de un proceso cíclico de reacciones químicas y se prueba a partir de simulación que puede tener mayor eficiencia térmica que los procesos de reformado de gas natural actuales

7.6.3 Sin industria específica

En los casos en que no se especifica una industria particular, se habla principalmente de los métodos de producción o de utilización para el hidrógeno. Para el primer caso, se hablan de varios métodos como la pirólisis del metano, la pirólisis de biomasa, la reformación del metano, la hidrólisis del agua, el uso de membranas filtradoras de hidrógeno y la partición del agua como métodos para la generación de hidrógeno y entre estos, se analizan sus ventajas y desventajas (Das & Peu, 2022; Liu et al., 2021; Lott & Deutschmann, 2023; Purwondho & Sudrajat, 2021; Satrio & Wardana, 2020; Ugwu et al., 2020; C.-L. Yu et al., 2020). Para el caso del uso del hidrógeno como combustible, se analizan los gases producidos por el hidrógeno como combustible como un predictor de la cantidad de hidrógeno que se produjo en un momento específico, por otro lado, se toman los usos del hidrógeno como combustible con sus ventajas y desventajas frente a otros combustibles (Nanda et al., 2020; Park et al., 2020).

La Tabla 8 expone los artículos en esta categoría y los detalles de cada uno de ellos.

Tabla 8

Artículos sin enfoque industrial específico.

Cita	Notas
(Nanda et al., 2020)	Libro que explora el uso del hidrógeno como combustible limpio que puede obtenerse por diferentes métodos y que tiene ventajas, desventajas y riesgos asociados con su producción
(Cao et al., 2021)	Se analizaron los efectos de ventilación para explosiones por hidrógeno y se identifica un efecto positivo de una ventilación controlada de las explosiones
(Das & Peu, 2022)	El texto menciona los diferentes avances en las tecnologías de producción de hidrógeno y se toman en cuenta también los diferentes métodos como la pirólisis de biomasa, reformado de gas metano, entre otros
(Purwondho & Sudrajat, 2021)	Se habla de la optimización de la producción de hidrógeno por medio de la hidrólisis del agua para producir HHO gaseoso y se habla también acerca del mejoramiento de las placas de electrodos para incrementar esta producción

(Park et al., 2020)	Como alternativa para un combustible, se considera el hidrógeno y el artículo se basa en la predicción de la producción de hidrógeno de acuerdo con los gases resultantes como el oxígeno generado
(Lott & Deutschmann, 2023)	Se habla de diferentes reacciones que pueden utilizarse y entre ellas se habla de la producción de hidrógeno por medio del pirólisis del metano.
(Liu et al., 2021)	En el artículo, se mencionan los diferentes tipos de tecnologías utilizadas para la separación de hidrógeno y metano y la posibilidad de ahorrar energía utilizando membranas filtradoras de hidrógeno
(Satrio & Wardana, 2020)	Se habla de los efectos negativos de la electrólisis para generación de hidrógeno y la posibilidad de implementar cubrimientos de curcumina para los electrodos con el fin de incrementar la velocidad de producción de hidrógeno
(C.-L. Yu et al., 2020)	Se analiza la producción de hidrógeno por medio de reformación del vapor de metano y se establece la capacidad de producción para este método
(Ugwu et al., 2020)	Producción de hidrógeno con un método de partición del agua que se probó por simulación y con el que se obtuvo un hidrógeno con pureza del 99%.
(Aliabadi et al., 2020)	Se hace un análisis de las causas de fuga de gas de hidrogeno y también se identifican parámetros para utilizar en el diseño de los contenedores
(Spallina et al., 2019)	Producción de hidrógeno por un método químico en bucle que puede llegar a tener un 3% más de eficiencia en comparación con otros métodos de producción por reformado de vapor

7.6.4 Industria del hidrógeno

En esta sección se ubican los artículos que tratan al hidrógeno como un renglón de la economía o a nivel macro y no como un elemento usado en otras industrias. En esta sección se encuentran varios estudios que tienen en cuenta la parte económica de la producción de hidrógeno o que consideran el impacto que el hidrógeno puede tener en la economía de un país o región específico considerando riesgos no solamente relacionados con la producción de hidrógeno sino para la industria o el país (Aleksandrov et al., 2023; Hadeef et al., 2020; Kar et al., 2022; Mullen et al., 2023; Nazir et al., 2020; Yakubson, 2022; Zou et al., 2022). Otro caso que se toma en esta sección es la consideración del hidrógeno junto a su cadena de suministro para identificar

generación, almacenamiento, distribución y los costos asociados a estas operaciones (Hadeef et al., 2020; Mahant et al., 2021).

Para mayor detalle acerca de los artículos y su contenido, ver Tabla 9.

Tabla 9

Artículos que tienen al hidrógeno como industria.

Cita	Notas
(Hadeef et al., 2020)	Se identifica al hidrógeno como un combustible limpio y se define una manera de identificar los riesgos asociados a su producción para tomar medidas al respecto de acuerdo con la identificación de riesgos
(Mahant et al., 2021)	Se habla de la generación de hidrógeno y se menciona que fuentes de generación verdes pueden ser consideradas. Adicionalmente, se habla del transporte y almacenamiento del mismo, que se han presentado como retos y por otro lado, se habla del hitano como una forma de transportar el hidrógeno
(Zou et al., 2022)	Se habla del mercado del hidrógeno, las maneras de producirlo, de utilizarlo como combustible, entre otras. Se hace referencia también a los retos que tiene la industria en cuanto a desarrollo de tecnologías y sinergias con otros sectores
(Mullen et al., 2023; Zou et al., 2022)	El texto se encarga de estimar el costo de la generación de hidrógeno que sea generado con cero emisiones de carbono y de gases efecto invernadero y se discute al respecto.
(Nazir et al., 2020)	En el artículo se mencionan las oportunidades de desarrollo para aplicar la generación de electricidad por medio del hidrógeno para industrias por fuera de la refinación del petróleo, donde se produce hidrógeno gris. Se evalúan otras formas de producir hidrógeno en el futuro
(Kar et al., 2022)	Revisión de literatura en cuanto al término de economía de hidrógeno durante varias décadas
(Aleksandrov et al., 2023)	En este artículo se menciona la situación actual de Rusia en términos de energías verdes y se identifica el potencial para que este país entre en este mercado
(Yakubson, 2022)	Revisión que se encarga de identificar el potencial de uso para el hidrógeno en diferentes industrias de la economía para lograr su descarbonización

7.6.5 Otras industrias

También se encontraron resultados para la producción o la utilización del hidrógeno en otras industrias en menor medida que las industrias o sectores que se han mencionado

anteriormente. En la Tabla 10, se encuentra una descripción de los artículos que se han encontrado en cada una de las industrias y un resumen del contenido de esos artículos.

Tabla 10

Artículos para otras industrias de menor representación entre los artículos.

Cita	Industria	Notas
(Vilas & Magraw, 2020a)	Automotriz	Se identifica el potencial del hidrógeno como un combustible limpio que puede permitir la cobertura de demandas energéticas de la creciente población. Se propone el uso de métodos basados en escenarios para identificar los riesgos y tomar acciones
(Maksymov & Kostylev, 2022)	Automotriz	En el artículo se mencionan las tecnologías de sensores magneto electrónicos para el hidrógeno y la manera en que pueden ser implementados en vehículos que funciona con celdas de combustible a base de hidrógeno, así como en las estaciones de abastecimiento del hidrógeno como combustible
(C. Yang et al., 2021)	Farmacéutica	Análisis de las diferentes reacciones que podrían ocurrir en las reacciones que expelen hidrógeno y la posibilidad de escalar y hacer más grandes los procesos identificados
(Pasman et al., 2023)	Industria de procesos	En el artículo se menciona utilización de nuevas energías para la descarbonización de la economía y las industrias que realizan procesos que requieren diferentes fuentes de energía
(Nirmala & Durga Shree, 2022)	Semiconductores	Efectos de la fuga de gases letales en la manufactura de elementos semiconductores
(McKnight & Kirkwood, 2023)	Industria porcina	Se evalúa la producción de hidrógeno a partir de los gases presentes en la industria porcina.
(Kim et al., 2022)	Semiconductores	Se hace un análisis de inflamabilidad para determinar el riesgo de explosión y de incendio cuando se producen fugas de gases inflamables. El experimento se realiza en diferentes instalaciones
(X.-J. Xu et al., 2022)	Embarcaciones impulsadas por hidrógeno	Se hace referencia a los barcos impulsados por hidrógeno, que en su mayoría utilizan celdas de combustible y también se mencionan las formas de almacenamiento para el hidrógeno y los usos para estas embarcaciones. Se identifica que la mayoría son de tamaño pequeño y que se utilizan en ríos pequeños y lagos
(Erdoğan & Güler, 2023)	Industria del transporte	Se considera el uso del hidrógeno para reducir costos y riesgos en la industria de transporte, especialmente en el público.
(De-León Almaraz et al., 2022)	Industria del transporte	Se toman diferentes variables para optimizar el uso de hidrógeno desde el 2030 hasta el 2050 en la industria y el transporte tomando como supuesto que se hará una

			transición hacia el uso de este como un combustible para vehículos de celdas de combustible impulsadas por hidrógeno líquido
(X. H. Xu et al., 2021)	Aluminio		Procesamiento de productos de aluminio y reducción de la producción de hidrógeno
(B. Wang et al., 2020)	Industria procesos	de	Utilización de isoflavonas de soya con el fin de evitar la producción de hidrógeno en el contacto entre el aluminio y el agua en sistemas de remoción de polvo húmedo de aluminio
(Izato et al., 2022)	Química		Evaluación del riesgo asociado con el almacenamiento de gas de hidrógeno mezclado con tolueno en una planta química
(Wee et al., 2022)	Aceites vegetales		En el artículo se identifica la oportunidad de producir hidrógeno a partir del efluente de los molinos de aceite de palma. Se evalúan los costos y los beneficios económicos, así como los ritmos de producción
(Kanatlı & Ayas, 2021)	Aceites vegetales		Se habla de la manera de producir hidrógeno molecular a partir de la torta de semilla de girasol que resulta de la extracción de su aceite. Se identifican las concentraciones y temperaturas que mayor cantidad de hidrógeno producen
(Carmona-Martínez et al., 2023)	Industria intensiva energía	en	El artículo habla de la utilización de energías alternativas con el fin de dar mayor cobertura energética para empresas que requieren energía de manera intensiva con el fin de remplazar combustibles fósiles
(Sathyamurthy et al., 2020)	Automotriz		El artículo habla del funcionamiento de las celdas de combustible de hidrógeno en automóviles y también considera las similitudes con el performance de motores a combustión
(Shulga et al., 2020)	Residuos		Se habla de los diferentes tipos de desechos que se pueden generar y del procesamiento de los mismos utilizando fuentes de energía basadas en hidrógeno
(Cervantes-Bobadilla et al., 2020)	Automotriz		Se menciona la producción de hidrógeno en un vehículo con motor a combustión y se utiliza para predecir el momento de la producción de acuerdo con una red neuronal
(Darmadi et al., 2023)	Industria procesos	de	En este artículo, se habla de la necesidad de implementar detectores o sensores de hidrógeno en procesos de manufactura en los que se produce este elemento.
(Faiq Yumna et al., 2020)	Aluminio		Se mencionan las celdas de combustible de hidrógeno como una manera de aprovechar el mismo y se considera la electrólisis de latas de aluminio junto con NaOH para verificar la cantidad de hidrógeno que se puede producir con las mismas.

8 Riesgos identificados, etapas del proceso y consecuencias

El hidrógeno se ha identificado como un elemento importante para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y también como una forma de diversificar la red de energía del mundo. Esto se ha mencionado de diferentes formas en los artículos analizados y cerca de un 17% de los textos analizados se enfocan en el uso del hidrógeno como forma de aprovechamiento o de almacenamiento de energía para generación. Sin embargo, debido a sus características, propiedades y por el desarrollo actual de la tecnología para su aprovechamiento, se presenta como una oportunidad general para la investigación el tema de la seguridad en su generación, especialmente en el sector del gas y el petróleo ya que ninguno de los textos que se tuvieron en cuenta hay un número bajo de documentos que hablan de los riesgos o la prevención en estas industrias.

La abundancia del hidrógeno en la tierra, lo hace una potencial fuente de energía y teniendo en cuenta la literatura revisada, es posible identificar que hay procesos industriales que liberan hidrógeno y que no lo aprovechan, o incluso intentan reducir su producción para evitar riesgos este es el caso de la industria de la energía nuclear, la de procesos y la de semiconductores, que representan en conjunto un 7.69% de los artículos revisados, mientras que hay otras industrias que lo utilizan ya sea en la generación de energía para sus respectivos procesos o que necesitan generarlo o adquirirlo de alguna manera como lo hacen en la industria del gas, en las energías renovables, en los aceites vegetales, la industria porcinas , entre otras; este último grupo de industrias mencionado abarca aproximadamente un 12.4 % de los textos incluidos en el análisis.

Teniendo en cuenta los resultados encontrados en las búsquedas realizadas, se pudo identificar que el hidrógeno tiene una conexión alta con la industria del gas y el reformado del

mismo. Sin embargo, también se presentan otros términos importantes relacionados con el hidrógeno como son su almacenamiento o el dióxido de carbono y la combustión que de igual manera están altamente relacionados con el hidrógeno. Sin embargo, en los artículos analizados no se considera la combustión tanto como un riesgo, sino que es un término más relacionado con la utilización del hidrógeno como fuente de energía y tiene esta connotación en aproximadamente un 85% de los casos que mencionan la combustión.

Es importante tener en cuenta con base en el diagrama de conexiones bibliométricas que la evaluación de riesgos y la prevención de accidentes no son términos muy cercanos y que tampoco tienen conexión fuerte. Esto se ve también reflejado en que se identificó un bajo número de artículos que consideran la producción de hidrógeno, y la evaluación de riesgos.

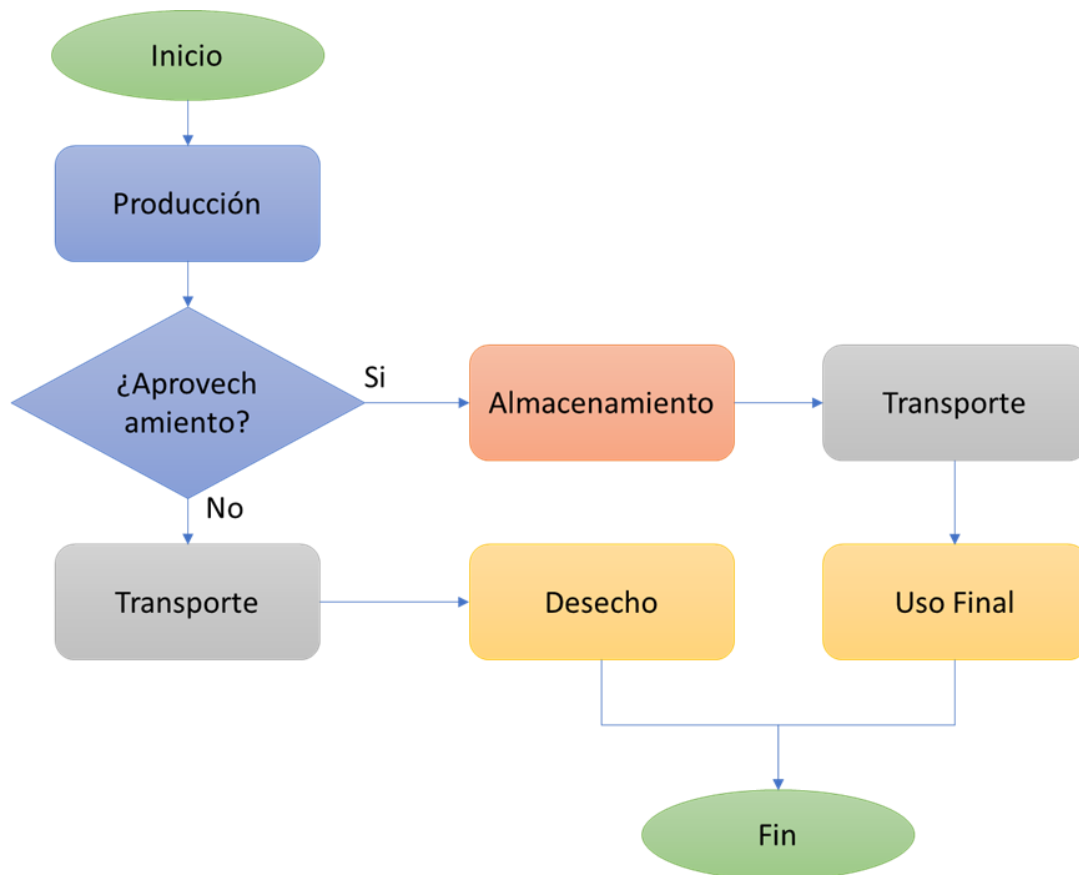
Aunque la identificación de riesgos considera características y propiedades del hidrógeno como potencialmente peligrosas o riesgosas, el análisis de accidentes y causas posibles muestra que, si bien es importante considerar estas características en la seguridad del manejo del hidrógeno, las causas relacionadas con la acción humana son las más relevantes en cuanto a los accidentes registrados ya que representan al menos un 14% y un 30% de las causas probables de los accidentes relacionados con el hidrógeno, sin contar otras causas probables relacionadas con malas prácticas. De modo que se puede identificar esta como una oportunidad de desarrollo e investigación para mejora en todas las industrias.

En general, dentro de la literatura analizada, se ha hablado del hidrógeno como un elemento aprovechable, pero en algunos casos no utilizado. También se han mencionado diferentes métodos de producción, cada uno con sus etapas definidas, de modo que el proceso de producción cambia de uno a otro. Sin embargo, se ha identificado en general cuatro etapas básicas del hidrógeno en su manipulación. En la Figura 22 se puede observar el proceso general, que se divide

principalmente en las etapas de producción (azul en la imagen), almacenamiento (naranja en la imagen), transporte (gris en la imagen) y entrega final (amarillo en la imagen). Es posible observar que no todo el hidrógeno que se produce se aprovecha, También es necesario resaltar que no siempre se siguen todas las etapas y la entrega final puede ser una liberación de este gas, en caso de no aprovecharse.

Figura 22

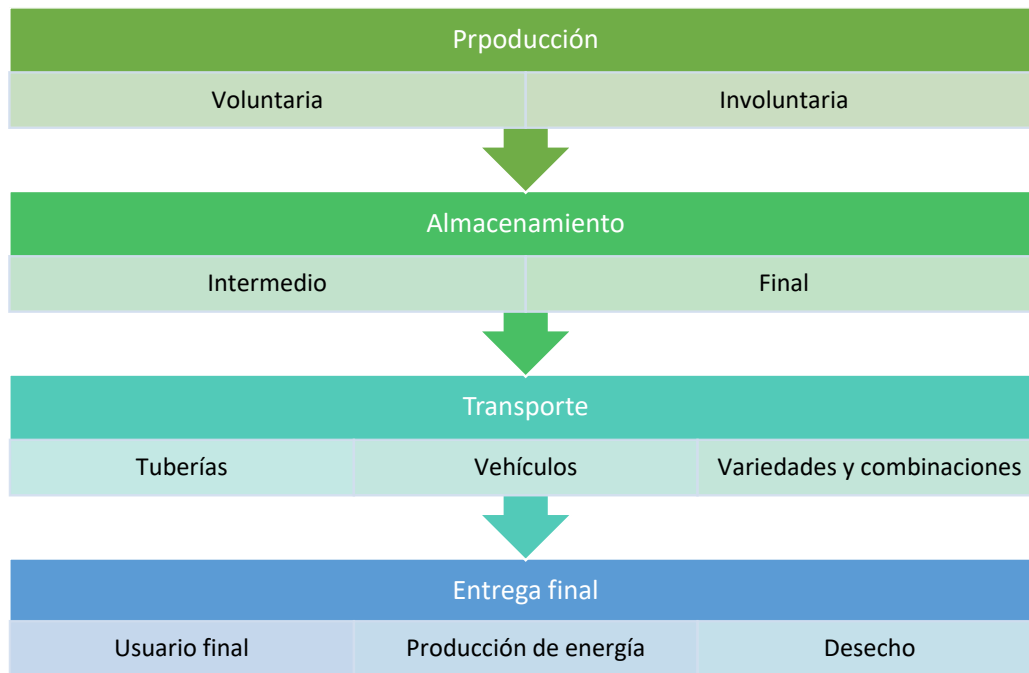
Etapas del hidrógeno.



De acuerdo con los textos analizados, se considera también que cada etapa tiene puntos importantes a mencionar. En la Figura 23, se muestran estos aspectos específicos relevantes de cada una de ellas.

Figura 23

Elementos relevantes de cada etapa del proceso.



Se identifica entonces la etapa de producción como el proceso inicial en el que se extrae o produce el hidrógeno, ya sea para un fin específico o como subproducto de un proceso de producción. En el segundo caso, se habla de una producción involuntaria ya que se habla de la generación de este gas sin tener un uso o destino específico para el mismo. En esta etapa del proceso, se mencionan por lo general riesgos asociados con la fuga del hidrógeno como son el ahogamiento de personas que se encuentren presentes en el sitio de producción, la ignición del gas por el contacto con herramientas ambos riesgos relacionados con la fuga del hidrógeno. También se ha identificado riesgos asociados con el mal funcionamiento de equipos de producción de hidrógeno. Teniendo en cuenta este tipo de riesgos mencionados, se ha identificado la necesidad de desarrollar y utilizar sensores de hidrógeno que sean confiables y puedan detectar las fugas y por otro lado se ha mencionado la utilidad de sistemas de ventilación eficaces y que permitan la salida rápida del hidrógeno. Y finalmente se ha identificado que los materiales y elementos de

contención de explosiones también son relevantes para evitar daños a la estructura en caso de que se ocurra una ignición o detonación del hidrógeno.

En una segunda etapa, se habla del almacenamiento, que solo se presenta en los casos de producción voluntaria y se realiza generalmente en el sitio de producción, para esta etapa, se identifica de nuevo la fuga como el riesgo más relevante o el que se ha mencionado un mayor número de veces en la literatura. En este caso, se considera que los métodos de prevención más relevantes en esta etapa están también relacionados con la detección de las fugas y de los niveles de hidrógeno en el aire.

Para la tercera etapa, el transporte, se consideran dos métodos principalmente que es el uso de tuberías o también el uso de vehículos de transporte para el hidrógeno. Se menciona adicionalmente la combinación del hidrógeno con otros gases como el metano para el uso del mismo y también se considera el hitano como una forma para transportar y entregar el hidrógeno al usuario final. En cuanto a riesgos relacionados con el transporte se ha mencionado entonces que la fragilización de tuberías por la acción del hidrógeno, por este motivo se dice que el uso de infraestructura de tuberías adecuada para otros gases no debe usarse para el hidrógeno y por otro lado se aborda este problema desde el diseño y uso de materiales resistentes al hidrógeno que puedan utilizarse en esta etapa de manera eficaz.

En cuanto a la etapa final, se tiene la entrega ya sea al usuario final, para su uso en la producción de energía o su liberación como subproducto de otro proceso. Para esta etapa se tiene principalmente como riesgo la detonación y la ignición ya que es donde el hidrógeno pasa a utilizarse más como combustible y también se considera de nuevo la fuga como un riesgo inminente. Esta etapa del proceso se muestra como uno de los obstáculos para la implementación del hidrógeno como un combustible precisamente por la falta de tecnología apropiada para evitar

riesgos de fuga, ignición y detonación en residencias y puntos de abastecimiento de hidrógeno para su uso final. En este caso como en aplicaciones de entrega de gases, es importante la parte de detección y se considera como el método más relevante para la prevención de riesgos. Sin embargo, también se considera que la capacitación del personal encargado de su manipulación puede ser conveniente teniendo en cuenta que la mayor parte de los incidentes relacionados con el hidrógeno están relacionados de alguna manera con el error humano o las prácticas inadecuadas.

En la figura 24, se proporciona una visión general de los riesgos más significativos asociados a la producción del hidrógeno.

Figura 24

Riesgos más importantes.



En general, el análisis general del cuadro sinóptico muestra que la producción de hidrógeno en la industria del petróleo y gas es una operación compleja que conlleva una serie de riesgos en cada etapa de la producción, además se añadió los riesgos de infraestructura y propiedad ya que estos representan un alto nivel dentro de los inconvenientes presentados.

Tabla 11

Artículos que tienen al hidrógeno como industria.

Etapa de producción del hidrógeno	Medidas de seguridad en respuesta a accidentes
Producción del Hidrógeno	Evacuación segura de trabajadores y personal de emergencia Activación de sistemas de extinción de incendios Uso de equipos de respiración autónoma para lidiar con fugas o explosiones Comunicación con autoridades locales y servicios de emergencia
Almacenamiento de Hidrógeno	Implementación de sistemas de extinción de incendios en áreas de almacenamiento Evacuación segura de áreas cercanas a los tanques de almacenamiento Uso de sistemas de seguridad para prevenir sobrepresión en los tanques
Transporte de Hidrógeno	Uso de vehículos y contenedores que sean seguros para poder transportar el hidrógeno Sistema de detección para identificar fugas y alarmas en vehículos Capacitación del personal encargado de la conducción para el transporte de hidrógeno
Entrega final de Hidrógeno	Sistemas de seguridad en aquellos puntos donde se realiza la entrega del hidrógeno Formación y capacitación del personal de distribución para garantizar un manejo seguro Afianzar los procedimientos de cierre cuando ocurra una emergencia por fugas en puntos de entrega

Según los textos analizados en la Tabla 11 se presentan varias medidas de seguridad para las etapas del proceso de producción del hidrógeno mencionadas anteriormente. Estas medidas de seguridad tienen como propósito exponer una atención detallada a la prevención de accidentes, así como la mitigación de los riesgos generados en la producción, almacenamiento, transporte y entrega del hidrógeno. En la industria del oil and gas se resalta la importancia de la prevención de accidentes y en lugar de que ocurran se debe responder eficazmente, es por esto que se recomienda tomar estas medidas para garantizar la seguridad de los trabajadores, el entorno y la propiedad para el aprovechamiento del hidrógeno de manera segura y sostenible.

En la producción del hidrógeno, las medidas de seguridad son la evacuación de manera segura, obtener sistemas extinción en caso de incendios, uso de equipos de respiración autónoma teniendo en cuenta que las fugas son los riesgos más comunes y la comunicación eficaz con los servicios de emergencia. Esto para garantizar que las personas estén a salvo y controlar ágilmente las situaciones de emergencia que se presentan en el proceso de producción.

para garantizar el almacenamiento seguro de hidrógeno se incluyen sistemas de extinción de incendios debido a que es común que se presenten fugas y explosiones por la sobrepresión de tanques y la evacuación a áreas seguras que estén cerca a los tanques de almacenamiento.

En el transporte del hidrógeno, se debe tener especial cuidado en la seguridad de vehículos y contenedores, para esto se debe contar con sistemas de detección temprana de fugas para prevenir incidentes de tránsito, así como la capacitación de los conductores que asegure sepan cómo responder ante situaciones de emergencia.

En la entrega final de hidrógeno, se requieren sistemas de seguridad en los puntos donde se vaya a entregar, de igual manera la capacitación del personal cumple un papel muy importante dar garantía de que se realice la entrega del hidrógeno de manera segura a los clientes.

Cabe mencionar que además de las medidas de seguridad en las etapas del proceso de producción, las empresas pueden ejercer en caso de accidente e incidente ciertas medidas de seguridad:

Capacitación del personal: asegurar de que todo el personal que trabaja con el hidrógeno esté capacitado con los procedimientos de seguridad y el manejo de emergencias. Esto debe incluir la educación en información sobre la extinción de incendios, evacuación y los primeros auxilios.

Sistema de detección y alarma: implementación de sistemas que proporcionen seguridad en cuanto a la detección de fugas de hidrógeno, alarmas y ventilación adecuada para poder alertar al personal en caso de concentraciones de hidrógeno en el aire.

Equipos de protección personal: las empresas deben proporcionar a los trabajadores los implementos y equipos de seguridad para la protección personal, como gafas de seguridad, guantes que puedan resistir al contacto con químicos y ropa ignífuga.

Plan de emergencia: desarrollar un plan de emergencia que contenga los procedimientos claros para actuar rápidamente en caso de fugas, incendios u otros incidentes que puedan ocurrir relacionados con el hidrógeno. Para esto es de suma importancia la capacitación de los empleados para que tengan el conocimiento del plan y puedan cumplirlo.

Inspecciones regulares: llevar a cabo inspecciones y mantenimiento de los equipos y sistemas relacionados al hidrógeno para asegurar el buen estado y funcionamiento y así poder evitar accidentes de alto riesgo como las fugas.

9 Conclusiones

Teniendo en cuenta los artículos analizados, se puede identificar la importancia y potencial del hidrógeno como fuente de energía alternativa. Sin embargo, todavía se requiere avance en ciencia y tecnología para manejarlo correctamente y prevenir incidentes que este gas puede producir.

En cuanto a la producción de hidrógeno a partir de las industrias del gas y del petróleo, se tienen varios métodos útiles como son el reformado del metano, la pirólisis del metano, la degradación de los hidrocarburos pesados por biodigestión, entre otros. La identificación de los métodos de generación permite conocer los procesos, sin embargo, los artículos no consideran los riesgos asociados a cada proceso específico y se considera importante realizarlo y tenerlo en cuenta, de modo que desde la investigación se consideren los aspectos relacionados con la prevención y mitigación de riesgos.

La industria del gas tiene mayor investigación en cuanto a la generación de hidrógeno y la identificación y prevención de riesgos en el proceso. Se propone como línea de investigación futura la identificación de situaciones que mantienen reducida la investigación sobre la producción de hidrógeno en la industria petrolera.

Teniendo en cuenta que la documentación analizada, se puede decir que la información acerca de accidentes e incidentes se presenta de manera general y no discrimina los resultados por industria. Este puede representar una oportunidad de exploración investigativa en cuanto a la relevancia de la cantidad de accidentes e incidentes para estas industrias en relación con la producción de hidrógeno y su aprovechamiento tanto para la industria como para la economía.

En cuanto a lecciones aprendidas, se ha identificado las conclusiones con base en los reportes disponibles, sin embargo, se puede ahondar en la mejora o cambio de procesos dentro de la industria después de aplicar las lecciones aprendidas. Esto con el fin de tener información de la evolución de la industria gracias a estas lecciones aprendidas.

Referencias bibliográficas

- Abohamzeh, E., Salehi, F., Sheikholeslami, M., Abbassi, R., & Khan, F. (2021). Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104569>
- Aleksandrov, I., Daroshka, V., Trushkin, V., Chekhovskikh, I., & Ol, E. (2023). Alternative energy market in Russia: At the crossroads of interests and opportunities. In S. Kovacevic & K. V Kamyshev (Eds.), *E3S Web of Conferences* (Vol. 376). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337605044>
- Aliabadi, M. M., Pourhasan, A., & Mohammadfam, I. (2020). Risk modelling of a hydrogen gasholder using Fuzzy Bayesian Network (FBN). *INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY*, 45(1), 1177–1186. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.198>
- Askarova, A., Afanasev, P., Popov, E., Mikitin, E., Darishchev, V., & Cheremisin, A. (2023). Application of oil in situ combustion for the catalytic methane conversion in the porous medium of the gas reservoir. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 220. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111256>
- Bacquart, T., Moore, N., Hart, N., Morris, A., Aarhaug, T. A., Kjos, O., Aupretre, F., Colas, T., Haloua, F., Gozlan, B., & Murugan, A. (2020). Hydrogen quality sampling at the hydrogen refuelling station – lessons learnt on sampling at the production and at the nozzle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(8), 5565–5576. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.10.178>

- Balat, M. (2008). Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(15), 4013–4029. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.05.047>
- Balat, M., & Balat, M. (2009). Political, economic and environmental impacts of biomass-based hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(9), 3589–3603. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.067>
- Basic, I., Vrbanic, I., & Grgic, D. (2023). Assessment of potential impact of combustible gases from reactor core damage on risk of outside containment spent fuel pool damage. *NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN*, 407. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112268>
- Berenblyum, R., & Surguchev, M. (2022). Subsurface Hydrogen Generation: Low Cost and Low Footprint Method of Hydrogen Production. *Society of Petroleum Engineers - SPE Norway Subsurface Conference, BERG 2022*. <https://doi.org/10.2118/209558-MS>
- Campari, A., Nakhil Akel, A. J., Ustolin, F., Alvaro, A., Ledda, A., Agnello, P., Moretto, P., Patriarca, R., & Paltrinieri, N. (2023). Lessons learned from HIAD 2.0: Inspection and maintenance to avoid hydrogen-induced material failures. *Computers & Chemical Engineering*, 173, 108199. <https://doi.org/10.1016/J.COMPCHEMENG.2023.108199>
- Camps, D. (2008). Limitaciones de los indicadores bibliométricos en la evaluación de la actividad científica biomédica. *Colombia Médica*, 39(1), 74–79. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-95342008000100009&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Cao, W., Li, W., Yu, S., Zhang, Y., Shu, C.-M., Liu, Y., Luo, J., Bu, L., & Tan, Y. (2021). Explosion venting hazards of temperature effects and pressure characteristics for premixed

- hydrogen-air mixtures in a spherical container. *Fuel*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120034>
- Carmona-Martínez, A. A., Fresneda-Cruz, A., Rueda, A., Birgi, O., Khawaja, C., Janssen, R., Davidis, B., Reumerman, P., Vis, M., Karampinis, E., Grammelis, P., & Jarauta-Córdoba, C. (2023). Renewable Power and Heat for the Decarbonisation of Energy-Intensive Industries. *Processes*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/pr11010018>
- Castellanos-Garzón, J. A., Falla-Zúñiga, L. F., Salazar, L., Pustovrh-Ramos, M. C., Castellanos-Garzón, J. A., Falla-Zúñiga, L. F., Salazar, L., & Pustovrh-Ramos, M. C. (2020). Anisákidos y anisakidosis: generalidades y su actualidad en Colombia. Revisión bibliográfica. *Iatreia*, 33(2), 143–154. <https://doi.org/10.17533/UDEA.IATREIA.47>
- Cervantes-Bobadilla, M., García-Morales, J., Escobar-Jiménez, R. F., Hernández-Pérez, J. A., Gómez-Aguilar, J. F., & Olivares-Peregrino, V. H. (2020). Experimental implementation of a new control approach using an inverse neural network to on-demand hydrogen production. *Control Engineering Practice*, 105. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104631>
- Cevallos, O., Giancarlo, M., & Dolores, M. (2021). Gestión de calidad y crecimiento empresarial: Análisis bibliométrico. *Revista Venezolana de Gerencia: RVG, ISSN-e 2477-9423, ISSN 1315-9984, Vol. 26, N°. 93, 2021, Págs. 318-333, 26(93), 318–333.* <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8890389&info=resumen&idioma=ENG>
- Chang, Y., Zhang, C., Shi, J., Li, J., Zhang, S., & Chen, G. (2019). Dynamic Bayesian network based approach for risk analysis of hydrogen generation unit leakage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(48), 26665–26678. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.065>

- CNPC. (n.d.). *CNPC-Company details*. Retrieved September 20, 2023, from <http://talent.cnpc.com.cn/introduction?deptName=PetroChina%20Company%20Limited%20Petrochemical%20Research%20Institute%EF%BC%88PRI%EF%BC%89&deptId=227>
- Colbertaldo, P., Guandalini, G., Campanari, S., & Crespi, E. (2020). Balancing a high-renewables electric grid with hydrogen-fuelled combined cycles: A country scale analysis. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 6. <https://doi.org/10.1115/GT2020-15570>
- Cuevas-Molano, E., Sánchez Cid, M., & Matosas López, L. (2019). Análisis bibliométrico de estudios sobre la estrategia de contenidos de marca en los medios sociales. *Comunicación y Sociedad*, ISSN-e 0188-252X, N°. 16, 2019, 16, 14. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7142449&info=resumen&idioma=ENG>
- Darmadi, I., Östergren, I., Lerch, S., Lund, A., Moth-Poulsen, K., Müller, C., & Langhammer, C. (2023). Bulk-Processed Plasmonic Plastic Nanocomposite Materials for Optical Hydrogen Detection. *Accounts of Chemical Research*, 56(13), 1850–1861. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.3c00182>
- Das, A., & Peu, S. D. (2022). A Comprehensive Review on Recent Advancements in Thermochemical Processes for Clean Hydrogen Production to Decarbonize the Energy Sector. *Sustainability (Switzerland)*, 14(18). <https://doi.org/10.3390/su141811206>
- Davis, B., Stuart, D., Maldonado, M. N., Kamavaram, V., Cheng, Q., & Veedu, V. (2022). Intelligent Hydrogen Gas Monitoring in Natural Gas/Hydrogen Blending. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*. <https://doi.org/10.4043/32007-MS>

- De-León Almaraz, S., Rácz, V., Azzaro-Pantel, C., & Szántó, Z. O. (2022). Multiobjective and social cost-benefit optimisation for a sustainable hydrogen supply chain: Application to Hungary. *Applied Energy*, 325. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119882>
- Dhanya, B. S., Mishra, A., Chandel, A. K., & Verma, M. L. (2020). Development of sustainable approaches for converting the organic waste to bioenergy. *Science of the Total Environment*, 723. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138109>
- Ehlig-Economides, C., & Hatzignatiou, D. G. (2021). Blue hydrogen economy - A new look at an old idea. *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2021-September*. <https://doi.org/10.2118/206282-MS>
- Erdoğan, A., & Güler, M. G. (2023). Optimization and analysis of a hydrogen supply chain in terms of cost, CO₂ emissions, and risk: the case of Turkey. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(60), 22752–22765. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.300>
- Faiq Yumna, M., Hilmazar, M., Satriadi, H., & Prasetyaningrum, A. (2020). Processing of Used Beveraged Waste for Production of Hydroge Gas with Electrolysis Process Using NaOH Catalyst. In B. Warsito, S. null, & P. T. T (Eds.), *E3S Web of Conferences* (Vol. 202). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020208001>
- Gabet, C., Bienvenut, F., Michaux, A., Valcy, S.-J., Tronc, F., France, F., & Kjenner, S. (2023). Qualification of Flexible Pipes for Gaseous Hydrogen Transportation. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, 2023-May*. <https://doi.org/10.4043/32242-MS>
- Gandía, L. M., Arzamendi, G., & Diéguez, P. M. (2013). Renewable Hydrogen Energy: An Overview. In *Renewable Hydrogen Technologies: Production, Purification, Storage, Applications and Safety* (pp. 1–17). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56352-1.00001-5>

- Gao, Q. X., Wang, L. J., Peng, W., Zhang, P., & Chen, S. Z. (2022). Safety analysis of leakage in a nuclear hydrogen production system. *INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY*, 47(7), 4916–4931. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.099>
- Gurieff, N., Moghtaderi, B., Daiyan, R., & Amal, R. (2021). Gas transition: Renewable hydrogen's future in eastern Australia's energy networks. *Energies*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/en14133968>
- H2 Tools. (n.d.). *Lessons Learned | Hydrogen Tools*. Retrieved September 20, 2023, from https://h2tools.org/lessons?search_api_fulltext=#
- Hadef, H., Negrou, B., Ayuso, T. G., Djebabra, M., & Ramadan, M. (2020). Preliminary hazard identification for risk assessment on a complex system for hydrogen production. *INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY*, 45(20), 11855–11865. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.162>
- Hübert, Thomas., Hübert, T., Boon-Brett, L., & Buttner, W. (William). (2016). *Sensors for safety and process control in hydrogen technologies*. CRC Press.
- Idris-Idah, K. M., & Abdulkadir, M. (2022). Hydrogen Production from Petroleum Fields; An Effective Solution to Nigeria's Energy Needs and Climate Change Mitigation. *Society of Petroleum Engineers - SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, NAIC 2022*. <https://doi.org/10.2118/211942-MS>
- Izato, Y., Suzuki, T., Iki, H., & Miyake, A. (2022). Determining the minimum ignition energy of toluene vapor containing hydrogen towards a risk assessment for liquid organic hydride storage in hydrogen refueling stations. *FUEL*, 310. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122236>

- Jabbarzadeh, A., Aliabadi, L., & Yazdanparast, R. (2021). Optimal payment time and replenishment decisions for retailer's inventory system under trade credit and carbon emission constraints. In *Operational Research* (Vol. 21, Issue 1). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s12351-019-00457-5>
- Janajreh, I., Alshehi, A., & Elagroudy, S. (2020). Anaerobic co-digestion of petroleum hydrocarbon waste and wastewater treatment sludge. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(20), 11538–11549. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.100>
- Jansons, L., Zemite, L., Zeltins, N., Bode, I., Geipele, I., & Kiesners, K. (2022). THE GREEN HYDROGEN AND THE EU GASEOUS FUEL DIVERSIFICATION RISKS. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 59(4), 53–70. <https://doi.org/10.2478/lpts-2022-0033>
- Joskin, E., Pavicevic, M., Magni, C., & Quoilin, S. (2021). Assessment of the Contribution of Power-To-Hydrogen to the Flexibility of the Future European Energy System. *ECOS 2021 - 34th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, 971–982. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85134397338&partnerID=40&md5=7551a084db9f25df232926c5131aefc8>
- Kanath, T. K., & Ayas, N. (2021). Simulating the steam reforming of sunflower meal in Aspen Plus. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(57), 29076–29087. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.195>
- Kar, S. K., Harichandan, S., & Roy, B. (2022). Bibliometric analysis of the research on hydrogen economy: An analysis of current findings and roadmap ahead. *INTERNATIONAL*

- JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY*, 47(20), 10803–10824.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.137>
- Kim, S.-E., Lee, K., Kang, C., & Jung, S. (2022). Tracer Gas Test and CFD Analysis of Semiconductor Gas Box for Flammable Gas Leakage. *Energies*, 15(21).
<https://doi.org/10.3390/en15218166>
- Kong, F., Swift, J., Zhang, Q., Fan, L.-S., & Tong, A. (2020). Biogas to H₂ conversion with CO₂ capture using chemical looping technology: Process simulation and comparison to conventional reforming processes. *Fuel*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118479>
- Köpke, C., Mielniczek, J., & Stolz, A. (2023). Testing Resilience Aspects of Operation Options for Offshore Wind Farms beyond the End-of-Life. *Energies*, 16(12).
<https://doi.org/10.3390/en16124771>
- Lattin, W. C., & Utgikar, V. P. (2007). Transition to hydrogen economy in the United States: A 2006 status report. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(15 SPEC. ISS.), 3230–3237. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.02.004>
- Liu, B., Pan, Y., Zhou, R., & Xing, W. (2021). Research progress on microstructure regulation of molecular sieving membranes for H₂/CH₄ separation. *Huagong Xuebao/CIESC Journal*, 72(12), 6073–6085. <https://doi.org/10.11949/0438-1157.20211119>
- Lott, P., & Deutschmann, O. (2023). Heterogeneous chemical reactions—A cornerstone in emission reduction of local pollutants and greenhouse gases. *Proceedings of the Combustion Institute*, 39(3), 3183–3215. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.06.001>
- Lyubomirov Ivanov, M., & Chow, W. K. (2022). *Importance of Safety Management and Safety Culture for Storage with Explosion Risk: Lesson Learnt from the Beirut Disaster*.

- Mackinnon, D., & Gomersall, S. (2019). Acorn - A north east response to evolve and thrive through decarbonisation. *Society of Petroleum Engineers - SPE Offshore Europe Conference and Exhibition 2019, OE 2019*. <https://doi.org/10.2118/195715-MS>
- Mahant, B., Linga, P., & Kumar, R. (2021). Hydrogen Economy and Role of Hythane as a Bridging Solution: A Perspective Review. *Energy and Fuels*, 35(19), 15424–15454. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02404>
- Maksymov, I. S., & Kostylev, M. (2022). Magneto-Electronic Hydrogen Gas Sensors: A Critical Review. *Chemosensors*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/chemosensors10020049>
- Martin, P., Verger, E., Mauger, P., Rodriguez, A., Boufflers, L., Lasjournades, A., & Brahmi, N. (2022). Assessment of Requirements for OCTG Connections in Hydrogen Storage Wells. *Society of Petroleum Engineers - SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition 2022, APOG 2022*. <https://doi.org/10.2118/210726-MS>
- Mazzini, G., D'Onorio, M., & Caruso, G. (2021). Hydrogen explosion mitigation in DEMO vacuum vessel pressure suppression system using passive recombiners. *FUSION ENGINEERING AND DESIGN*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112713>
- McKnight, N., & Kirkwood, M. (2023). Keeping Pigging Safely Grounded as Hydrogen Takes-Off. *PPIM 2023 - 35th Pipeline Pigging and Integrity Management, Conference Proceedings*, 401–416. <https://doi.org/10.52202/068696-0024>
- Mehrjerdi, H., Saboori, H., & Jadid, S. (2022). Power-to-gas utilization in optimal sizing of hybrid power, water, and hydrogen microgrids with energy and gas storage. *JOURNAL OF ENERGY STORAGE*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103745>
- Modabber, H. V., & Rabeti, S. A. M. (2022). New optimal scheme for the poly-generation system, integrated with ORC and hydrogen production units, using technical, energy, and thermo-

- risk analyses-case study for qeshm power and water co-generation plant. *THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING PROGRESS*, 36.
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101506>
- Molkov, V. (2012). *Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering I*.
- Moradi, R., & Groth, K. M. (2019). Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY*, 44(23), 12254–12269.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041>
- Mullen, D., Herraiz, L., Gibbins, J., & Lucquiaud, M. (2023). On the cost of zero carbon hydrogen: A techno-economic analysis of steam methane reforming with carbon capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 126.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103904>
- Najjar, Y. S. H. (2013). Hydrogen safety: The road toward green technology. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 38, Issue 25, pp. 10716–10728). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.126>
- Nanda, S., Vo, D.-V., & Nguyen-Tri, P. (2020). New Dimensions in Production and Utilization of Hydrogen. In *New Dimensions in Production and Utilization of Hydrogen*. Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819553-6.00016-7>
- Nazir, H., Muthuswamy, N., Louis, C., Jose, S., Prakash, J., Buan, M. E. M., Flox, C., Chavan, S., Shi, X., Kauranen, P., Kallio, T., Maia, G., Tammeveski, K., Lymperopoulos, N., Carcadea, E., Veziroglu, E., Iranzo, A., & M. Kannan, A. (2020). Is the H₂ economy realizable in the foreseeable future? Part III: H₂ usage technologies, applications, and

- challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(53), 28217–28239. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.256>
- Ngo, S. I., Lim, Y.-I., Kim, W., Seo, D. J., & Yoon, W. L. (2019). Computational fluid dynamics and experimental validation of a compact steam methane reformer for hydrogen production from natural gas. *Applied Energy*, 236, 340–353. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.075>
- Nguyen, D. D., Ngo, S. I., Lim, Y.-I., Kim, W., Lee, U.-D., Seo, D., & Yoon, W.-L. (2019). Optimal design of a sleeve-type steam methane reforming reactor for hydrogen production from natural gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(3), 1973–1987. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.188>
- Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2023). Power-to-hydrogen concepts for 100% renewable and sustainable energy systems. In *Hydrogen Economy: Processes, Supply Chain, Life Cycle Analysis and Energy Transition for Sustainability* (pp. 595–627). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99514-6.00013-3>
- Nirmala, M., & Durga Shree, S. (2022). Embedded System for Lethal Gas Leakage Exposure and Forewarning System Using Arm Processor. In C. Subramani, K. Vijayakumar, B. Dakyo, & S. S. Dash (Eds.), *Lecture Notes in Electrical Engineering* (Vol. 795, pp. 227–235). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4943-1_21
- Orjuela-Abril, S., Torregroza-Espinosa, A., & Duarte-Forero, J. (2023). Innovative Technology Strategies for the Sustainable Development of Self-Produced Energy in the Colombian Industry. *Sustainability (Switzerland)*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/su15075720>

- Parisi, C., Ma, Z. G., Mandelli, D., Anderson, N., & Zhang, H. B. (2020). Risk-Informed Safety Analysis for Accident Tolerant Fuels. *NUCLEAR SCIENCE AND ENGINEERING*, 194(8–9), 748–770. <https://doi.org/10.1080/00295639.2020.1732699>
- Park, J., Cho, J., Choi, H., & Park, J. (2020). Prediction of reformed gas composition for diesel engines with a reformed EGR system using an artificial neural network. *Energies*, 13(22). <https://doi.org/10.3390/en13225886>
- Pasman, H., Sripaul, E., Khan, F., & Fabiano, B. (2023). Energy transition technology comes with new process safety challenges and risks. *Process Safety and Environmental Protection*, 177, 765–794. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.07.036>
- Pilić, V., Stanojević, P., Mihajlović, V., & Baloš, D. (2019). Damage mechanism and barrier identification on hydrogen production unit using innovative methodology for risk assessment. *Structural Integrity and Life*, 19(2), 131–137. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85083008222&partnerID=40&md5=552f95518cebb6623bd2b7957e42385d>
- Priambodo, D., Sunarko, & Purwanto, W. W. (2021). Safety Investigation of Hazardous Materials Released from the Combined High Temperature Gas Cooled Reactor - Hydrogen Production Plant Using ALOHA Software. *ATOM INDONESIA*, 47(1), 31–38. <https://doi.org/10.17146/aij.2021.939>
- Pritchard, A. (1969). *Statistical Bibliography or Bibliometrics*. *Journal of Documentation*, 25, 348-349. - *References - Scientific Research Publishing*. [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1190144](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1190144)

- Purwondho, R., & Sudrajat, A. (2021). Research on the effect of SS316L electrode plate treatment on HHO gas production performance. In D. Mangindaan (Ed.), *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 794, Issue 1). IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/794/1/012021>
- Qi, Y., & Zhang, Z. (2020). Fitness-for-purpose research of OCTG for underground gas storage applications in H₂/CO₂ environments. *NACE - International Corrosion Conference Series, 2020-June*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85090509100&partnerID=40&md5=ee6ce87ae8a43006f06af513ab02d068>
- Ramezani, S., & Aghaie, M. (2023). Neutronic and Thermal hydraulic evaluation of accident tolerant cladding materials in a WWER1000. *Progress in Nuclear Energy, 161*, 104708. <https://doi.org/10.1016/J.PNUCENE.2023.104708>
- Ren, B., Jensen, J., Duncan, I., & Lake, L. (2023). Buoyant Flow of H₂ Vs. CO₂ in Storage Aquifers: Implications to Geological Screening. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 26*(3), 1048–1058. <https://doi.org/10.2118/210327-PA>
- Sathyamurthy, R., Bhaskar, K., Solomon, J. M., Anaimuthu, S., & Vinayagam, N. K. (2020). A Review on PEM Fuel Cells Used for Automotive Applications, Models and Hydrogen Storage for Hybrid Electric Fuel Cell Vehicle. *SAE Technical Papers, 2020*. <https://doi.org/10.4271/2020-01-5173>
- Sato, H., & Ohashi, H. (2019). Uncertainty analysis of toxic gas leakage accident in cogeneration high temperature gas-cooled reactor. *International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE, 2019-May*. <https://doi.org/10.1299/mej.19-00332>

- Satrio, W., & Wardana, I. N. G. (2020). The effect of curcumin coated electrode on hydrogen production through water electrolysis. In T.-W. L. D (Ed.), *E3S Web of Conferences* (Vol. 181). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018101003>
- Schlumberger. (2023). *Who We Are | SLB*. <https://www.slb.com/about/who-we-are>
- Shadravan, A., & Amani, M. (2019). Impacts of hydrogen embrittlement on oil and gas wells: Theories behind premature failures. *Society of Petroleum Engineers - SPE Gas and Oil Technology Showcase and Conference 2019, GOTS 2019*. <https://doi.org/10.2118/198588-ms>
- Shulga, R. N., Putilova, I. V, Smirnova, T. S., & Ivanova, N. S. (2020). Safe and waste-free technologies using hydrogen electric power generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(58), 34037–34047. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.060>
- SINTEF. (2023). *About SINTEF - Applied research, technology and innovation - SINTEF*. <https://www.sintef.no/en/sintef-group/this-is-sintef/>
- Song, P., Li, Y., Yin, Z., & Yuan, Q. (2023). Hydrogen Generation from Heavy Oils via In-situ Combustion Gasification. *SPE Western Regional Meeting Proceedings, 2023-May*. <https://doi.org/10.2118/212986-MS>
- Song, P.-F., Shan, T.-W., Li, Y.-W., Hou, J.-G., Wang, X.-L., & Zhang, D. (2020). Impact of hydrogen into natural gas grid and technical feasibility analysis. *Xiandai Huagong/Modern Chemical Industry*, 40(7), 5–10. <https://doi.org/10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2020.07.002>
- Spallina, V., Motamedi, G., Gallucci, F., & van Sint Annaland, M. (2019). Techno-economic assessment of an integrated high pressure chemical-looping process with packed-bed

- reactors in large scale hydrogen and methanol production. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 88, 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.05.026>
- Thaysen, E. M., Armitage, T., Slabon, L., Hassanpouryouzband, A., & Edlmann, K. (2023). Microbial risk assessment for underground hydrogen storage in porous rocks. *Fuel*, 352. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128852>
- Ugwu, A., Donat, F., Zaabout, A., Müller, C., Albertsen, K., Cloete, S., van Diest, G., & Amini, S. (2020). Hydrogen production by water splitting using gas switching technology. *Powder Technology*, 370, 48–63. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.039>
- Vangas, M., Iesalnieks, M., Jekabsons, L., Zukuls, A., & Sutka, A. (2023). Two-step decoupled electrolysis approach based on pseudocapacitive WO₃ auxiliary electrode. *INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY*, 48(54), 20551–20561. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.035>
- Vilas, K. R., & Magraw, R. J. (2020a). Why proactive assessment of hydrogen fuelling risks is essential. *Institution of Chemical Engineers Symposium Series, 2020-November(167)*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85106612962&partnerID=40&md5=ec35a7b3ca8dd4751aea8731ad5d84cd>
- Vilas, K. R., & Magraw, R. J. (2020b). Why proactive assessment of hydrogen fuelling risks is essential. *Institution of Chemical Engineers Symposium Series, 2020-November(167)*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85106612962&partnerID=40&md5=ec35a7b3ca8dd4751aea8731ad5d84cd>
- Wang, B., Xu, K. L., Wang, Y. T., Parker, T., & Wang, Q. S. (2020). Using soybean isoflavone to prevent hydrogen production reaction of aluminium dust and water in wet dust removal

- systems. *JOURNAL OF LOSS PREVENTION IN THE PROCESS INDUSTRIES*, 67. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104233>
- Wang, S., Hui, H., & Zhai, J. (2023). Short-Term Reliability Assessment of Integrated Power-Gas Systems With Hydrogen Injections Using Universal Generating Function. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1–13. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3286821>
- Wee, A. N. C. H., Erison, A. E., Edward Anyek, E. H., Pakpahan, G. R., Lim, J. R., & Tiong, A. N. T. (2022). Techno-economic assessment of hydrogen production via steam reforming of palm oil mill effluent. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102575>
- Wen, J. X., Marono, M., Moretto, P., Reinecke, E. A., Sathiah, P., Studer, E., Vyazmina, E., & Melideo, D. (2022). Statistics, lessons learned and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(38), 17082–17096. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.170>
- West, M., Al-Douri, A., Hartmann, K., Buttner, W., & Groth, K. M. (2022). Critical review and analysis of hydrogen safety data collection tools. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(40), 17845–17858. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.03.244>
- Wu, T. F., Feng, X., Shuo, D., Li, W., Li, W. A., & Wang, Y. F. (2022). In-containment hydrogen behavior simulation and hydrogen concentration control under LBLOCA accidents. *FRONTIERS IN ENERGY RESEARCH*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.967855>
- Xu, X. H., Wang, B., Xu, K. L., & Wang, Y. T. (2021). Prevention of a hydrogen explosion accident in the wet aluminum waste dust collection process based on L-malic acid. *POWDER TECHNOLOGY*, 382. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.12.049>

- Xu, X.-J., Yang, R., Ji, Y.-B., Zhang, X.-Y., Jiang, L., & Li, K. (2022). Review on key technologies of hydrogen fuel cell powered vessels. *Jiaotong Yunshu Gongcheng Xuebao/Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 22(4), 47–67. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2022.04.004>
- Yakubson, K. I. (2022). Prospects for Using Hydrogen in Various Branches of the World Economy as One of the Directions of Its Decarbonization. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 95(3), 309–340. <https://doi.org/10.1134/S1070427222030016>
- Yang, C., Wang, T., Muzzio, D. J., Cleaf, S. V., Phillips, E. M., Fine, A. J., Vickery, T. P., Kalinin, A., Dalby, S. M., Furman, T. R., Flessner, R., Rosario, A., Zhao, R., & Roth, M. (2021). Safety Assessments Supporting Scale-up of Chemistry Involving Hydrogen. *Organic Process Research and Development*, 25(8), 1979–1987. <https://doi.org/10.1021/acs.oprd.1c00256>
- Yang, F., Wang, T., Deng, X., Dang, J., Huang, Z., Hu, S., Li, Y., & Ouyang, M. (2021). Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 46, Issue 61, pp. 31467–31488). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.005>
- Yu, C.-L., Sakthinathan, S., Hwang, B.-Y., Lin, S.-Y., Chiu, T.-W., Yu, B.-S., Fan, Y.-J., & Chuang, C. (2020). CuFeO₂–CeO₂ nanopowder catalyst prepared by self-combustion glycine nitrate process and applied for hydrogen production from methanol steam reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(32), 15752–15762. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.077>

- Yu, H., Shao, N. Y., Xia, G. L., & Peng, M. J. (2022). Development of two-dimensional hydrogen distribution model in small-scale spaces under severe accidents. *NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN*, 396. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111894>
- Zou, C., Li, J., Zhang, X., Jin, X., Xiong, B., Yu, H., Liu, X., Wang, S., Li, Y., Zhang, L., Miao, S., Zheng, D., Zhou, H., Song, J., & Pan, S. (2022). Industrial status, technological progress, challenges, and prospects of hydrogen energy. *Natural Gas Industry B*, 9(5), 427–447. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2022.04.006>