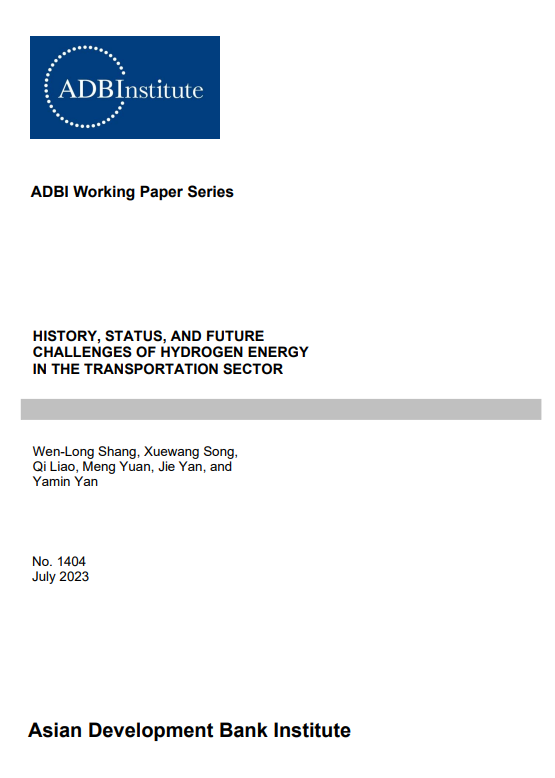
Historia, estado y desafíos futuros de la energía del hidrógeno en el sector del transporte



Extracto

En los últimos años, el clima extremo en todo el mundo debido al cambio climático ha ocurrido cada vez con mayor frecuencia, y los países de todo el mundo se han dado cuenta gradualmente del daño causado por el calentamiento global. Todos los países también están haciendo esfuerzos para promover un menor consumo de energía de combustibles fósiles y el uso en lugar de tecnologías de energía renovable que son respetuosas con el medio ambiente y tienen menos emisiones de carbono. El sector del transporte, como principal contribuyente al consumo de energía y las emisiones contaminantes, está recibiendo cada vez más atención. Al mismo tiempo, los vehículos de nueva energía son más eficientes energéticamente y respetuosos con el medio ambiente que los vehículos de combustible, lo que los hace más frecuentes en el mercado automotriz, que está floreciendo. La energía de hidrógeno verde se puede utilizar como una fuente de energía renovable, limpia y eficiente para vehículos de nueva energía y también se está utilizando gradualmente en el transporte para promover el objetivo de la neutralidad de carbono. Este documento revisa la investigación sobre la energía del hidrógeno en el campo del transporte, resume los resultados de la investigación anterior y presenta los desafíos para la aplicación futura de la energía del hidrógeno.

Palabras clave: neutralidad de carbono, hidrógeno, cambio climático, energía renovable, transporte

Clasificación JEL: R40

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El 12 de diciembre de 2015, la Conferencia sobre el Clima de París llegó a un acuerdo sobre el cambio climático global y estableció el objetivo de limitar el calentamiento global a largo plazo a menos de 2 grados centígrados, y preferiblemente por debajo de 1,5 grados centígrados, en comparación con los niveles preindustriales (Masson-Delmotte et al. 2018).

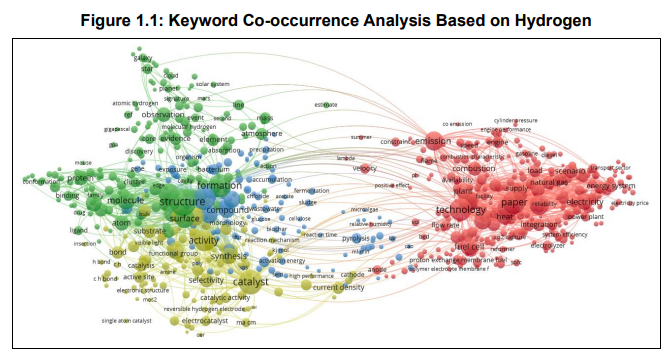
Para alcanzar los objetivos de control de temperatura propuestos en el Acuerdo de París, muchos países han propuesto vías para la neutralidad de carbono, que se ha convertido en una visión común y un plan de acción mundial en curso. Entre las medidas de reducción de emisiones adoptadas por muchos países y regiones, fomentar el desarrollo y la adopción de energía renovable se ha convertido en una opción común (Noticias 2022), y ahora existe una oportunidad enorme e histórica para desarrollar esta última. Mientras tanto, como un tipo de fuente de energía renovable y limpia, la energía de hidrógeno verde ha recibido mucha atención, y puede desempeñar un papel importante en la reducción de las emisiones de carbono en el sector del transporte, en la energía industrial y en otras áreas que generan grandes cantidades de emisiones de carbono (Yu et al. 2022). En septiembre de 2020, en la 75ª sesión de la Asamblea General de las Naciones Unidas, el presidente Xi Jinping anunció que la República Popular China (RPC) se esforzaría por alcanzar su punto máximo de emisiones de dióxido de carbono (CO2) para 2030 y lograr la neutralidad de carbono para 2060 (Jinping 2020). Por lo tanto, la investigación relacionada con la energía del hidrógeno es extremadamente importante y de gran importancia, pero también presenta desafíos (Zou et al. 2022).

Como era de esperar, la investigación y el desarrollo de la energía del hidrógeno en el campo del transporte sigue aumentando. La industria del transporte es una parte importante de nuestra sociedad y sustenta la prosperidad de las diferentes economías (Selvakkumaran y Limmeechokchai 2015). Sin embargo, es responsable de varios tipos de consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero, que representan el 15% de las emisiones totales de carbono (Zhang 2022b). Durante el período actual del 14º Plan Quinquenal de la República Popular China, el Ministerio de Transporte ha publicado un plan de trabajo que incluye la implementación de 11 proyectos principales, incluido el "Proyecto de sostenibilidad del transporte verde con bajas emisiones de carbono". En torno al objetivo general de reducir la intensidad de carbono del transporte, es necesario apoyar el uso a gran escala de vehículos y buques de nueva energía. Por lo tanto, la energía del hidrógeno juega un papel más importante en el sector del transporte y contribuye al desarrollo urbano sostenible (Bi et al. 2021).

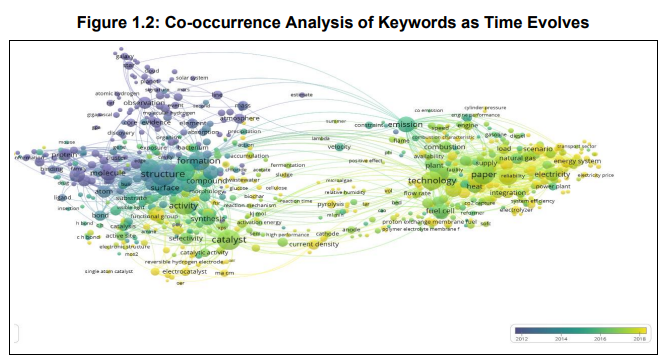
Los vehículos de pila de combustible de hidrógeno (HFCV) se han desarrollado rápidamente en los últimos años, y muchos países como la República Popular China, Alemania y los Estados Unidos también están acelerando el diseño y la construcción de estaciones de reabastecimiento de hidrógeno para HFCV a fin de promover vigorosamente la industrialización de las pilas de combustible de hidrógeno. Además de los HFCV, la aviación y el transporte marítimo también están explorando activamente la aplicación de la energía del hidrógeno (Zhang 2022a). El desarrollo de aplicaciones de energía de hidrógeno en el sector del transporte sin duda facilitará enormemente la descarbonización extensa y profunda en este campo.

1.2 Estado de la investigación

Para obtener una comprensión general del estado de la investigación del hidrógeno, buscamos en la base de datos Web of Science con "hidrógeno" como palabra clave, obtuvimos más de un millón de artículos relacionados y seleccionamos 8,000 de ellos. La palabra clave "análisis de co-ocurrencia" fue utilizada por el software VOSviewer para los artículos mencionados anteriormente. Los resultados del análisis se muestran en las figuras 1.1 y 1.2.



Como se puede ver en la figura 1.1, los términos "catalizador", "estructura", "emisión", "molécula", "formación" y "tecnología" aparecen con mayor frecuencia, lo que indica que los académicos e investigadores prestan más atención al método de producción, la eficiencia de producción y la estructura energética del hidrógeno. Además, la contaminación y las emisiones generadas durante el proceso de producción de hidrógeno también son el foco de atención de los investigadores.



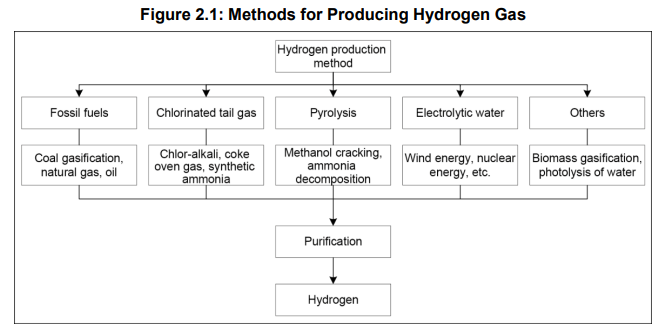
La evolución de los temas de investigación a lo largo del tiempo se puede ver en la figura 1.2. Según la figura anterior, los temas de investigación en los años anteriores se centraron principalmente en la estructura, las moléculas, la formación, los catalizadores, etc. En los últimos años, a medida que la investigación se ha intensificado y se ha prestado más atención a las cuestiones ambientales y climáticas, los temas de investigación han tendido a centrarse en las emisiones, la energía, los sistemas energéticos, el costo, etc.

Este estudio primero analiza y resume los antecedentes de investigación y la importancia de la energía del hidrógeno, luego analiza y resume la situación actual y los temas candentes de la investigación de la energía del hidrógeno estableciendo palabras clave para buscar artículos relevantes y, en base a esto, selecciona artículos relacionados con la energía del hidrógeno en el campo del transporte para su posterior análisis. A través de una revisión de la literatura, este estudio introduce brevemente el proceso de producción y fabricación de la energía del hidrógeno, la clasificación de la energía del hidrógeno y las tecnologías aplicadas al campo del transporte; Además, también se introduce la historia, situación actual y controversias de su aplicación en el sector del transporte. Después de esto, los artículos buscados se clasifican y organizan para analizar la aplicación de la energía del hidrógeno. Finalmente, se presentan los desafíos de la energía del hidrógeno en el campo del transporte en el futuro.

2. LA APLICACIÓN DE LA ENERGÍA DEL HIDRÓGENO

2.1 El proceso de producción de energía del hidrógeno

La cadena industrial de la energía del hidrógeno incluye su producción, almacenamiento, transporte, reabastecimiento de combustible y uso. Entre estos procesos, la tecnología de producción de hidrógeno incluye su producción a partir de energía fósil, a partir de agua electrolítica, de subproductos industriales y de energía renovable, como se muestra en la figura 2.1.



La producción de hidrógeno a partir de fuentes de energía fósil implica principalmente el uso de combustibles fósiles para producir hidrógeno por pirólisis química o gasificación. Esta tecnología es relativamente madura y barata, y actualmente es el principal método utilizado para producir hidrógeno. Hasta la fecha, el hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles se ha empleado principalmente como materia prima para procesos industriales como fertilizantes y metalurgia. Dado que el dióxido de carbono se produce y emite durante la producción de hidrógeno, se llama "hidrógeno gris" y se puede combinar con la tecnología de captura y almacenamiento de carbono (CCS) para convertir el "hidrógeno gris" en "hidrógeno azul". La ventaja de esta tecnología es que es adecuada para la producción de hidrógeno a gran escala, pero las emisiones son altas y las impurezas del gas deben purificarse (Zou et al. 2022).

La producción de hidrógeno por electrólisis es la producción de hidrógeno mediante la descomposición del agua. Esta tecnología permite el uso de electricidad procedente de fuentes renovables sin emitir dióxido de carbono u otras sustancias tóxicas, y por ello se conoce como "hidrógeno verde" en el verdadero sentido de la palabra. El agua electrolítica tiene una alta eficiencia de conversión teórica y el hidrógeno obtenido es extremadamente puro. La producción de hidrógeno a partir del agua electrolítica se puede clasificar en agua electrolítica alcalina, agua electrolítica de membrana de intercambio de protones ácidos, agua electrolítica de óxido sólido de alta temperatura y otras tecnologías de agua electrolítica (Zou et al. 2022). Lei et al. (2019) aumentaron efectivamente la velocidad y la pureza de la producción de hidrógeno mediante el desarrollo de una técnica para producir hidrógeno en soluciones bifásicas ácido-base. Dossow et al. (2021) diseñaron un proceso que puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 76-78 %. El hidrógeno electrolítico generado a partir de energía eólica marina también puede contribuir a los sistemas bajos en carbono y reducir eficazmente las emisiones de carbono (Chen et al. 2021).

El proceso de producción industrial, como en la industria cloroalcalina, producirá una gran cantidad de subproductos de hidrógeno, pero la pureza de estos subproductos no es alta, y el proceso de purificación requiere equipos de alta gama y una gran inversión de capital. Con el avance continuo de la industria de la energía del hidrógeno y las tecnologías científicas relacionadas, las ventajas del subproducto industrial gas hidrógeno se están expandiendo. Este método tiene ventajas significativas, como su bajo costo, la amplia gama de fuentes y bajas emisiones de carbono en el proceso de recuperación, pero el proceso de purificación es más complicado (Yang 2022).

La producción de hidrógeno foto catalítico se refiere a un método sostenible, limpio y renovable para producir hidrógeno, y una de las tecnologías más estudiadas y prometedoras es la producción de hidrógeno foto lítico (Zou et al. 2022). La esencia de la tecnología de producción de hidrógeno foto lítico es el uso de materiales semiconductores como catalizadores para impulsar la descomposición del agua. La tecnología de producción de hidrógeno microbiano ha surgido como una forma prospectiva de producir hidrógeno debido a su conveniente tecnología de fabricación y amplia disponibilidad de fuentes. Los microorganismos comunes de producción de hidrógeno fermentativo incluyen varios tipos de Clostridium productor de hidrógeno, bacterias termófilas y Escherichia coli (Vasconcelos, Leitão y Santaella 2016; Pugazhendhi, Kumar y Sivagurunathan 2019). Sadvakasova et al. (2020) investigaron el proceso de producción de hidrógeno a partir de células cianobacterianas, y este proceso es el resultado de la conversión de energía solar. Llegaron a la conclusión de que los mutantes genéticos cianobacterianos con gran potencial para producir hidrógeno deberían construirse mediante ingeniería genética para aumentar la producción de hidrógeno.

2.2 Clasificación de las aplicaciones de la energía del hidrógeno

La producción, fabricación y aplicación de la energía del hidrógeno es una de las formas importantes de lograr el objetivo de la neutralidad de carbono, garantizar la seguridad energética nacional y realizar una transformación baja en carbono (Zhang 2022c). Actualmente, la energía del hidrógeno se utiliza principalmente en energía, metalurgia del hierro y el acero, la industria petroquímica, etc. Junto con el ajuste continuo de la política económica nacional y el desarrollo continuo de la tecnología de la industria de la energía del hidrógeno, la energía del hidrógeno se aplicará a una gama más amplia de campos.

2.2.1 Almacenamiento de energía de hidrógeno

Hoy debemos desarrollar vigorosamente la energía eólica y la generación de energía solar fotovoltaica y completar el desarrollo de la energía renovable mediante la producción de energía de hidrógeno verde (Cope 2022). Sin embargo, la naturaleza intermitente y aleatoria de la generación de energía eólica y fotovoltaica afecta la continuidad y estabilidad de su suministro de energía conectado a la red, y debilita la regulación máxima del sistema de energía (Zhou et al. 2022). Con el progreso continuo y la mejora de la tecnología de energía de hidrógeno verde, el uso de energía renovable para generar electricidad y producir hidrógeno verde está recibiendo cada vez más atención. Mientras tanto, el costo de fabricación de hidrógeno verde está disminuyendo, y ha contribuido aún más al ritmo de la transición energética.

2.2.2 Combustible de hidrógeno

Como fuente de energía definitiva para el sector de la energía eléctrica, la energía del hidrógeno transforma la energía química en energía eléctrica y cinética a través de una serie de reacciones, proporcionando energía para los vehículos. Al mismo tiempo, el hidrógeno verde también tiene ventajas en términos de cero emisiones de carbono, y la aplicación en la industria automotriz de baterías basadas en hidrógeno verde se ha vuelto muy prometedora (Zou et al. 2022).

2.2.3 Materias primas químicas de hidrógeno

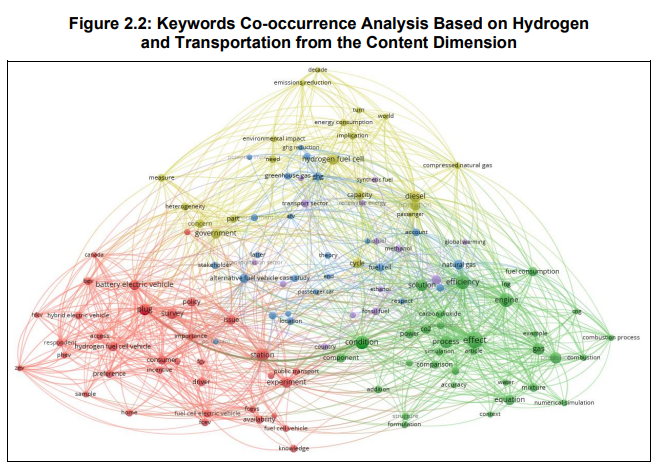
La demanda mundial actual de hidrógeno se utiliza principalmente para la síntesis de amoníaco, la producción de hidrogenación de refinería, la producción de metanol, etc. (Zou et al. 2022). Con el desarrollo continuo de tecnologías relevantes, la tecnología de hidrogenación se utilizará cada vez más en el refinado de petróleo y otros campos petroquímicos. La hidrogenación es también un enfoque tecnológico importante para la fabricación de aceite verde. El hidrógeno también se usa comúnmente para la síntesis de productos químicos y compuestos que contienen carbono, como urea y alcoholes industriales. Estos compuestos pueden almacenarse y transportarse fácilmente cuando se licuan, tienen una alta densidad de energía, son menos explosivos y pueden alcanzar emisiones de carbono casi nulas como combustibles líquidos, lo que los convierte en una fuente de energía renovable adecuada para el almacenamiento y transporte que no sea la transmisión de electricidad.

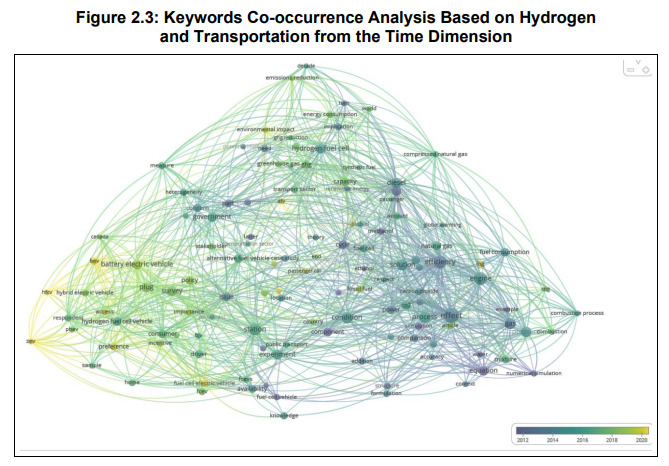
2.3 Procesos y tecnologías para la energía del hidrógeno en el transporte

La principal aplicación de la energía del hidrógeno en el transporte es el uso del hidrógeno como fuente de energía para impulsar vehículos con el fin de reducir las emisiones de carbono y la contaminación del aire causada por los vehículos de transporte. Dado que la energía del hidrógeno puede alimentar vehículos de transporte con cero emisiones de gases de efecto invernadero (por ejemplo, CO2 y NOx), muchos países están acelerando actualmente la velocidad con la que están desplegando vehículos de nueva energía, como los impulsados por hidrógeno. Con el rápido desarrollo de las tecnologías de generación de pilas de combustible y energía renovable, la aplicación de la energía verde del hidrógeno en el transporte también está aumentando gradualmente (Greene, Ogden y Lin 2020; Bai et al. 2022; Bi et al. 2022; Yang et al. 2022). Rose y Neumann (2020) investigaron una red de instalaciones de reabastecimiento de hidrógeno para vehículos pesados combinando un modelo de planificación de ubicación de infraestructura con un modelo de optimización del sistema de energía que incorpora opciones de expansión de la red. El estudio discutió las interacciones entre las estaciones de servicio de hidrógeno y el sistema de energía eléctrica, y muestra que cuando ambos se consideran sistemáticamente y en sinergia con múltiples sectores, pueden reducir efectivamente los costos de construcción de infraestructura, lo que puede ser una consideración principal en la construcción de estaciones de reabastecimiento de hidrógeno. Tao et al. (2020) exploraron la planificación colaborativa de una red de distribución y un sistema de transporte para vehículos de pila de combustible de hidrógeno. Los vehículos de pila de combustible de hidrógeno se introducen en la red de transporte, y la simulación se realiza planificando la ubicación de las estaciones de reabastecimiento de hidrógeno, optimizando la relación de vehículos con motor de combustión interna, vehículos eléctricos y vehículos de pila de combustible, y resolviendo este modelo de optimización utilizando la programación lineal mixta entera y el método de subgradiente. Los resultados de la simulación muestran que el modelo propuesto puede lograr las emisiones más bajas debido a la buena coordinación entre los sistemas de energía y transporte. Pyza, Gołda y Sendek-Matysiak (2022) estudiaron estrategias para el uso de energía de hidrógeno en sistemas de transporte público. A través del estudio del método de producción de hidrógeno y el impacto en los costos operativos de los vehículos, se descubrió que el uso de vehículos de energía de hidrógeno en los sistemas de transporte público puede ser efectivo para mejorar la calidad del aire, así como para optimizar la movilidad de la población debido a la amplia gama de fuentes de energía de hidrógeno. Como fuente de energía alternativa en los sistemas de transporte público, el uso del hidrógeno es razonable y efectivo. Li y Taghizadeh-Hesary (2022) exploraron la viabilidad económica de los vehículos eléctricos de pila de combustible de hidrógeno verde para el transporte por carretera en la República Popular China y propusieron un modelo para estimar las emisiones de carbono de la cadena de suministro de hidrógeno y las pilas de combustible. También se desarrolló un modelo equilibrado de costos de hidrógeno para analizar el costo total de suministrar hidrógeno a partir de fuentes de energía renovables a las estaciones de servicio de hidrógeno de los vehículos, y el costo de los vehículos eléctricos de celda de combustible por kilómetro. Los resultados sugieren que los vehículos verdes alimentados con hidrógeno serán cada vez más importantes en la República Popular China a largo plazo. Wickham, Hawkes y Jalil-Vega (2022) estudiaron la optimización de la cadena de suministro de hidrógeno en el sector del transporte. Se propuso un modelo de optimización espacialmente resuelto para evaluar las configuraciones de costos óptimas de la cadena de suministro de hidrógeno para 2050, incluidos los grados de hidrógeno y las tecnologías de separación y purificación. Los resultados muestran que, bajo supuestos tecno-económicos dados, una configuración óptima de la cadena de suministro de hidrógeno incluye el uso de reformado de metano de vapor con captura y secuestro de carbono, la instalación de nuevas tuberías de transmisión de hidrógeno, la modificación de la red de distribución de gas natural para suministrar hidrógeno y la instalación de sistemas VPS localizados en estaciones de servicio. El estudio encontró que era importante incluir tecnologías de purificación en el modelo. Farahani et al. (2019) propusieron un modelo integrado de energía y transporte basado en hidrógeno que facilita la penetración de fuentes de energía renovables intermitentes sin comprometer la confiabilidad de los suministros de electricidad, calor y energía de transporte, al tiempo que reduce el costo del sistema.

2.4 Historia, estado y controversias de la energía del hidrógeno en el transporte

Aquí tratamos de investigar el estado de la investigación de la energía del hidrógeno en el sector del transporte, y se buscan artículos en revistas de transporte, con el objetivo de concentrarnos en la investigación del hidrógeno en el campo del transporte. Se buscó literatura de investigación en el campo del transporte utilizando las palabras clave "hidrógeno" y "transporte"\*, y se utilizó la palabra clave "análisis de co-ocurrencia" a través de VOSviewer. Los resultados se muestran en la siguiente figura.





Como se muestra en las figuras 2.2 y 2.3, podemos concluir que la investigación del hidrógeno en el campo del transporte se centra principalmente en los vehículos de pila de combustible de hidrógeno, los vehículos eléctricos de batería, el consumo de combustible, el proceso, la producción, la política, la eficiencia, las estaciones y el gobierno. En los últimos años, los académicos se han concentrado en las áreas de eficiencia, componentes, operación y proceso, centrándose particularmente en la producción de combustible de hidrógeno y los beneficios de los vehículos de hidrógeno. En los últimos años, se han realizado investigaciones en las áreas de gases de efecto invernadero, vehículos de pila de combustible de hidrógeno, vehículos eléctricos de batería, gobierno, reducción de emisiones y preferencias, con direcciones de investigación que recaen principalmente en políticas gubernamentales, vehículos de combustible, ubicación de estaciones de reabastecimiento de hidrógeno, conservación de energía y reducción de emisiones.

3. BÚSQUEDA Y ANÁLISIS DE LA LITERATURA

En esta sección, investigamos principalmente sistemáticamente la literatura relacionada con el hidrógeno y el transporte, y estos artículos seleccionados se analizan de acuerdo con las clasificaciones de su dirección de investigación.

3.1 Búsqueda bibliográfica

Para llevar a cabo una revisión exhaustiva, primero buscamos sistemáticamente artículos que se concentren en el hidrógeno y los sistemas de transporte. Realizamos una búsqueda bibliográfica en bases de datos y revistas específicas debido a la dificultad para determinar las palabras clave apropiadas. El procedimiento de búsqueda bibliográfica se presenta en la figura 3.1. En esta revisión, Web of Science, ScienceDirect e IEEE Xplore se seleccionan como bases de datos de búsqueda. Las palabras clave "hidrógeno" y "transporte\*" se buscan en títulos, resúmenes y palabras clave, y el rango de tiempo está restringido a entre 1996 y 2022. Todos los artículos buscados en las tres bases de datos se integran entre sí, y después de eliminar los artículos reduplicados e irrelevantes, se obtienen 190 artículos.

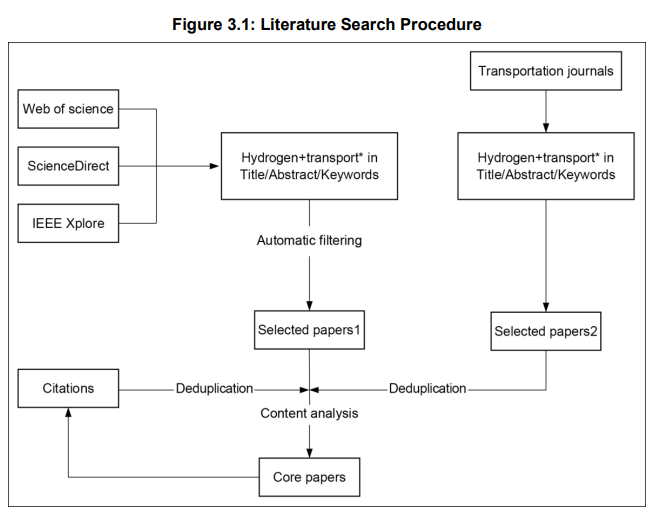
Además, la palabra clave "transporte\*" se utiliza para buscar en tres bases de datos, y algunos documentos con el nombre de modos de transporte específicos como "ferrocarril", "red de carreteras" o "aviación" posiblemente se pierdan. Para hacer frente a esta situación, se realiza una búsqueda bibliográfica basada en revistas. El alcance de la búsqueda se limita a revistas académicas en el campo del transporte. Se aplican las mismas reglas de selección que en la búsqueda del conjunto de datos. Finalmente, después de la revisión del resumen, se agregan 65 artículos más. Por lo tanto, se obtienen 148 artículos básicos basados en bases de datos y búsquedas basadas en revistas.

3.2 Análisis de la literatura

Después de un análisis exhaustivo de la literatura buscada, los principales temas sobre la energía del hidrógeno en el transporte son el problema de la localización de las estaciones de servicio de hidrógeno, los impactos de las pilas de combustible de hidrógeno en las emisiones de gases de efecto invernadero, el uso de vehículos de pila de combustible y el impacto ambiental en los vehículos de pilas de combustible de hidrógeno. Con base en el enfoque de investigación de los artículos seleccionados, los dividimos en varias categorías para análisis y discusiones.

3.2.1 Problema de localización de estaciones de repostaje de hidrógeno

Un diseño razonable de las estaciones de reabastecimiento de hidrógeno puede reducir el tiempo de reabastecimiento de combustible de los usuarios y mejorar la comodidad del viaje (Shang et al. 2022). Los académicos han llevado a cabo un número considerable de estudios sobre el problema de la localización de estaciones de servicio de hidrógeno.



Penev, Zuboy y Hunter (2019) realizaron un análisis económico de tuberías de alta presión dentro de áreas urbanas, y concluyeron que la entrega de tuberías es más ventajosa que el transporte de vehículos cuando la demanda de hidrógeno para vehículos de celda de combustible en un área determinada es lo suficientemente alta. Al considerar el problema del tiempo, Fang y Torres (2011) y Brey et al. (2016) realizaron estudios de optimización del problema de ubicación y diseño de la estación de servicio de hidrógeno con el fin de reducir el tiempo de viaje. Después de esto, Zhao et al. (2019) investigaron un marco de modelado para ubicaciones alternativas de sistemas de estaciones de combustible basadas en la planificación de rutas y escenarios multiescala. Proporciona información efectiva para planificar la infraestructura de las estaciones de servicio de hidrógeno. Mientras tanto, Rose et al. (2020) estudiaron el desarrollo óptimo de redes de estaciones de servicio alternativas considerando las restricciones de capacidad de los nodos. Se encontró que las limitaciones de capacidad de las estaciones tienen un impacto relativamente grande en el número y la utilización de las estaciones, y la diversidad de combinaciones de estaciones. Coppitters et al. (2022) investigaron el diseño óptimo de las estaciones de servicio de hidrógeno bajo incertidumbres tecno económicas y ambientales. Los resultados muestran que logra un buen desempeño ambiental, pero aumenta el costo del combustible en una estación de repostaje de hidrógeno para autobuses eléctricos de pila de combustible, lo que podría estudiarse en el futuro en lo que respecta a la tecnología de integración con autobuses totalmente eléctricos. Después de esto, Tabandeh, Hossain y Li (2022) estudiaron la planificación de estaciones de reabastecimiento de hidrógeno para vehículos de pila de combustible en combinación con fuentes de energía renovables, y establecieron un modelo verde considerando la capacidad de producción de hidrógeno in situ. La ubicación y el tamaño de las estaciones de servicio de hidrógeno pueden determinarse bien, y también se garantiza la producción verde de hidrógeno verde. Bezrodniy, Rezchikov y Dranko (2021) propusieron un algoritmo para optimizar los servicios de reabastecimiento de hidrógeno en las estaciones de reabastecimiento de hidrógeno. Kelley et al. (2020) estudiaron las percepciones geográficas de los primeros usuarios de celdas de combustible de hidrógeno al evaluar una red de estaciones de servicio en California. El estudio sugiere que al seleccionar los sitios, también se deben considerar otros factores, como el uso de la tierra, la densidad de población y los patrones de tráfico. Reuß et al. (2017) realizaron una evaluación de infraestructura basada en la resolución espacial comparando la infraestructura de la cadena de suministro de energía de hidrógeno en Alemania. Los resultados muestran que las cavernas de sal y las tuberías de transmisión de gas son las tecnologías clave para los futuros sistemas de infraestructura de hidrógeno.

Después de esto, d'Amore-Domenech, Leo y Pollet (2021) realizaron una comparación de costos entre la energía eléctrica y el hidrógeno, que consideró el escenario de una fuente de energía para la transmisión de energía a gran escala en el mar. Los resultados del estudio mostraron que la transmisión de hidrógeno por tubería es más barata que el uso de electricidad en áreas de aguas profundas a distancias de más de 1000 km, y que el transporte de hidrógeno licuado por barco es la mejor opción entre los diversos métodos de transporte de hidrógeno. Alazemi y Andrews (2015) resumieron el estado actual y el despliegue de las redes de estaciones de servicio de hidrógeno. Concluyeron que, desde una perspectiva económica, social y ambiental, es muy razonable planificar una red de estaciones de hidrógeno mientras las ventas alimentadas con hidrógeno están creciendo. Chen et al. (2021) utilizaron un diseño óptimo y un método de evaluación tecno económica para evaluar una cadena de suministro de hidrógeno baja en carbono para estaciones de servicio en Shanghái. Los resultados mostraron que la producción de hidrógeno verde conectado a la red a través de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico en un área rica en energía renovable (provincia de Qinghai, RPC) y la entrega a estaciones de servicio en la región costera oriental de la República Popular China (Shanghái) a través de un camión de hidrógeno líquido son soluciones factibles. Xu, Wu y Dai (2020) analizaron las barreras clave para el desarrollo de estaciones de servicio de hidrógeno en la República Popular China. El alto costo inicial de capital, los canales de financiación limitados, la tecnología de almacenamiento de hidrógeno inmadura, la tecnología imperfecta de transporte de hidrógeno, la falta de normas pertinentes y un mecanismo de subsidio imperfecto se consideraron los seis factores clave. Sun y Harrison (2021) propusieron un esquema para operar estaciones de servicio de hidrógeno en áreas ricas en energía renovable. El electrolito de las estaciones de servicio de hidrógeno se puede aumentar de forma adaptativa para producir un exceso de electricidad, lo que puede convertir la electricidad baja en carbono en combustible de hidrógeno verde. Zhao et al. (2021) propusieron un marco de programación óptimo para los sistemas de energía cruzada para evaluar las ventajas de la cadena de suministro desde la electrólisis del agua, el almacenamiento comprimido y el transporte hasta la utilización de hidrógeno verde para vehículos de pila de combustible. El algoritmo de Dijkstra se utiliza para buscar el camino más corto para el transporte de hidrógeno verde, y el estudio muestra que puede reducir el costo de operación del sistema de transenergía y promover el uso de energía renovable. Cao et al. (2021) estudiaron el problema de planificación de microrredes de red basadas en hidrógeno y propusieron un modelo de planificación óptimo para microrredes de electro hidrógeno con instalaciones de producción, almacenamiento y reabastecimiento de hidrógeno verde renovable. Los resultados muestran que el tiempo computacional puede reducirse considerablemente, y este método de planificación también se puede aplicar a la descarbonización de los sistemas de energía y transporte en el futuro. Bezrodniy y Rezchikov (2021) exploraron el control de las redes de suministro de hidrógeno en el sector del transporte, considerando aspectos relevantes del sistema de transporte de hidrógeno y proporcionando un método para la optimización de las redes de suministro de hidrógeno.

Algunos estudiosos integran las estaciones de reabastecimiento de hidrógeno con la red eléctrica para estudiar la viabilidad del diseño, mientras que otros planifican estaciones de reabastecimiento de hidrógeno considerando la reducción del tiempo de viaje. Diferentes estudiosos tienen en cuenta los diversos factores, pero todos ellos tienden a resolver el problema relacionado con el diseño de las estaciones de servicio de hidrógeno.

3.2.2 El impacto de la energía del hidrógeno en las emisiones de gases de efecto invernadero

La industria del transporte tiene un impacto significativo en las emisiones de gases de efecto invernadero, y la aplicación de energía de hidrógeno a este sector tendrá un profundo efecto en la conservación de energía y la reducción de emisiones en el campo del transporte (Liu et al. 2022a).

La aplicación de la energía del hidrógeno en el transporte puede reducir eficazmente las emisiones de gases de efecto invernadero (McKenzie y Durango-Cohen 2012; McDonagh et al. 2019; Logan et al. 2020; Navas-Anguita et al. 2020; Benítez et al. 2021). Los combustibles alternativos de bajas emisiones son importantes para el desarrollo bajo en carbono del sector del transporte, y en su estudio, Fernández-Dacosta et al. (2019) compararon y evaluaron combustibles alternativos en el sector del transporte. Los resultados mostraron que la producción de hidrógeno verde a partir del reformado de metano de vapor es la opción más económica, y la producción de hidrógeno verde a partir de electrólisis utilizando fuentes de energía renovables es la más respetuosa con el medio ambiente. Además, He et al. (2021) analizaron los estándares de emisión de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos para vehículos ligeros de pila de combustible en la República Popular China. Las emisiones de gases de efecto invernadero, compuestos orgánicos volátiles de todos los vehículos de pila de combustible fueron más bajas o comparables a las de los vehículos de gasolina, excepto para la electrólisis eléctrica de la red o las vías de hidrógeno licuado. Yeh et al. (2006) analizaron el impacto de la energía del hidrógeno en el transporte, el uso de energía y las emisiones atmosféricas, concluyendo que, aunque las tecnologías de captura y secuestro de carbono para su producción y las tecnologías renovables para la producción de hidrógeno verde tienen la capacidad de lograr mayores reducciones de emisiones de CO2, no son económicamente competitivas en función de su marco de modelado. Además, Sun et al. (2022) propusieron y modelaron una estrategia de control basada en un cargo por servicio de reabastecimiento de hidrógeno para el sector de las ciudades inteligentes para guiar la selección de estaciones de repostaje de hidrógeno para vehículos eléctricos de pila de combustible de hidrógeno. Los resultados muestran que la promoción de vehículos de pila de combustible de hidrógeno puede ayudar a reducir las emisiones. Li et al. (2022) exploraron la posibilidad de aplicar la tecnología de hidrógeno eléctrico a gas en los sistemas de energía y transporte y propusieron un modelo integrado de planificación de la coordinación a largo plazo del sistema integrado de energía y transporte a escala regional. Los resultados muestran que el sistema puede reducir eficazmente las emisiones de CO2.

Además, Booto, Aamodt Espegren y Hancke (2021) exploraron los impactos ambientales de los camiones diesel convencionales, los camiones eléctricos de batería y los camiones eléctricos de celda de combustible en sus respectivos ciclos de vida en términos de tipo de energía, fuente de energía y ruta de producción. Los resultados muestran que los camiones eléctricos de pila de combustible de hidrógeno pueden reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 48% en las mismas condiciones. La aplicación de la energía del hidrógeno como combustible a los vehículos también puede aumentar significativamente la reducción de emisiones (Frey et al. 2007; Janic 2008; Tittle y Qu 2013; Yazdanie et al. 2016; Booto, Aamodt Espegren y Hancke 2021; Mingolla y Lu 2021; Chen y Lam 2022). Sundvor et al. (2021) estudiaron formas alternativas de impulsar buques de pasajeros de alta velocidad en un escenario de cero emisiones en el contexto de los buques de pasajeros noruegos de alta velocidad, desarrollando un modelo basado en datos AIS. Los resultados sugieren que se necesita una mayor optimización de rutas y mejoras de infraestructura para abordar mejor las emisiones de gases de efecto invernadero. Después de esto, Hensher (2021) estudió el proceso de transición a una flota de autobuses verdes. Junto con la creciente demanda de eficiencia energética y viajes ecológicos (Liu et al. 2022a), se desconoce el costo de los autobuses que ofrecen viajes ecológicos, no solo en relación con la tecnología de vehículos (especialmente la tecnología de celdas de combustible de hidrógeno), sino también en términos de infraestructura para la energía del hidrógeno. El uso de fuentes de energía limpias y renovables como materia prima para la producción de hidrógeno verde se ha vuelto particularmente importante. Después de esto, Frey et al. (2007) compararon el consumo real de combustible y el impacto en las emisiones de los autobuses alimentados con diesel e hidrógeno. Los efectos de la velocidad, la aceleración y la pendiente de la carretera se integraron en un solo parámetro utilizando el método VSP para analizar los cambios en el consumo de combustible. Los resultados muestran que reemplazar el diesel con vapor de metano que se transforma en hidrógeno aumenta el ciclo del combustible y reducirá significativamente las emisiones de CO, NOx y HC.

Janic (2008) exploró el potencial del hidrógeno líquido en el transporte aéreo "neutro en carbono" y argumentó que la infraestructura en el transporte aéreo debería aumentarse. Zhang et al. (2020) estudiaron el costo y las emisiones de gases de efecto invernadero de los vehículos de pila de combustible de hidrógeno electrolítico basados en la red, simulando la demanda de reposición de combustible de hidrógeno variable en el tiempo para estos vehículos. Los resultados muestran que aumentar la flexibilidad de la producción de hidrógeno puede reducir el costo del hidrógeno y la generación de energía, así como las emisiones de CO2. Mientras tanto, Liu et al. (2022b) estudiaron los beneficios económicos y ambientales generados por las cadenas de suministro verdes. Los resultados mostraron que, bajo regulación, las cadenas de suministro verdes pueden impulsar a las empresas aguas arriba y aguas abajo a reducir las emisiones más rápido. Además, Longden et al. (2022) compararon las emisiones y los costos de la producción de hidrógeno verde a partir de combustibles fósiles con los de la electricidad renovable. Comparando los dos, la producción de hidrógeno verde utilizando electrólisis y electricidad de cero emisiones no produce emisiones de gases de efecto invernadero. Usando combustibles fósiles para producir hidrógeno verde, incluso con tecnología de captura y almacenamiento de carbono, las emisiones de gases de efecto invernadero serían altas. Doll y Wietschel (2008) analizaron el papel de la energía del hidrógeno en una visión de transporte sostenible, concluyendo que el uso de hidrógeno puede reducir significativamente las emisiones de CO2 en el sector del transporte, incluso cuando se tienen en cuenta las emisiones del tubo de escape y aguas arriba y el desarrollo de tecnologías alternativas.

Kim, Kim y Lee (2020) estudiaron el tema de las emisiones de gases de efecto invernadero de los vehículos eléctricos y alimentados con hidrógeno y sus cambios en la cuota de mercado. El análisis mostró que los vehículos de pila de combustible de hidrógeno ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, pero afectan la cuota de mercado de los vehículos eléctricos y requieren la optimización de una infraestructura eficiente. Edwards et al. (2008) analizaron el desarrollo de la energía del hidrógeno y las tecnologías de pilas de combustible, concluyendo que las pilas de combustible de hidrógeno poseen la capacidad de eliminar las emisiones de CO2 y desencadenar una revolución verde en el transporte. Después de esto, Salvi y Subramanian (2015) propusieron medidas para controlar la contaminación del combustible del transporte utilizando sistemas de energía de hidrógeno. Se consideró que el uso de hidrógeno como combustible en los vehículos mejoraba la seguridad energética y reducía las emisiones de gases de efecto invernadero. Janić (2014) estudió la aplicación de la energía del hidrógeno en el sector de la aviación. Se exploró el uso de hidrógeno líquido como combustible de aviación, su potencial para el transporte aéreo comercial ecológico para resolver problemas y el impacto del uso de hidrógeno líquido como combustible en las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono. Los resultados muestran que el uso de hidrógeno líquido como combustible de transporte aéreo puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el futuro y que el objetivo del transporte aéreo comercial ecológico es alcanzable.

Se han realizado muchas investigaciones sobre la energía del hidrógeno en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, y la energía verde del hidrógeno es un buen combustible alternativo como fuente de energía limpia y renovable. Varios modos de transporte, como las carreteras, el transporte acuático y la aviación, pueden ahorrar consumo de energía y reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero si la energía del hidrógeno se utiliza como combustible para el transporte (Shang et al. 2021).

3.2.3 Aplicación de la energía del hidrógeno en el transporte

El transporte es la principal aplicación para la energía del hidrógeno, mientras que la principal aplicación de la energía del hidrógeno en el transporte son los vehículos de nueva energía con pilas de combustible como energía.

También hay mucha investigación en esta área. Mabit y Fosgerau (2011) estudiaron la demanda de vehículos de combustible alternativo cuando los impuestos de matriculación son altos, utilizando el ejemplo de Dinamarca, y desarrollaron un modelo de regresión logística mixta. Usando este modelo, se concluyó que las personas tendrían más probabilidades de elegir un vehículo de combustible alternativo más respetuoso con el medio ambiente en lugar de un vehículo de combustible convencional, en igualdad de condiciones. Alavi et al. (2017) propusieron una microrred comunitaria para proporcionar energía de coche a red en caso de escasez de generación de energía renovable, y la generación de energía renovable restante de la microrred se almacena en forma de hidrógeno verde. Mediante el uso de hidrógeno verde para el transporte y la reelectrificación, el uso de vehículos de pila de combustible puede reducir las emisiones de carbono en el sistema de transporte. Después de esto, Zhou et al. (2022) investigaron el rendimiento de las células fotovoltaicas y propusieron un algoritmo de evolución diferencial adaptativa basado en una estrategia dinámica de aprendizaje hacia atrás para mejorar efectivamente la identificación de los parámetros de las células fotovoltaicas. Hardman et al. (2017) resumieron las barreras para el uso de vehículos de pila de combustible de hidrógeno a través de una encuesta a los consumidores y sugirieron contramedidas correspondientes, como el despliegue previo de una infraestructura optimizada. Al mismo tiempo, también encontraron que los consumidores valoran la gama de vehículos de pila de combustible de hidrógeno y la capacidad de proporcionar energía de respaldo de emergencia. Ouchi y Henzie (2017) investigaron la viabilidad de los veleros marinos como dispositivos de recolección de energía para apoyar la producción de hidrógeno. Los resultados mostraron que la energía de hidrógeno de bajo costo puede generarse y transportarse simultáneamente, proporcionando una nueva vía para el eventual reemplazo de los combustibles fósiles. Después de esto, Wu et al. (2021) realizaron un análisis de la aplicación de vehículos de pila de combustible de hidrógeno bajo el objetivo de neutralidad de carbono de acuerdo con las características de la RPC. Según los resultados, las instalaciones de apoyo inadecuadas, los problemas de seguridad del combustible de hidrógeno y un número insuficiente de fabricantes son los problemas más importantes. Yu, Wang y Chen (2021) propusieron la aplicación de un nuevo sistema híbrido de tracción CC integrado de hidrógeno eléctrico a un futuro sistema de metro. Los resultados de la simulación muestran que puede utilizar eficazmente la energía renovable y la energía de frenado regenerativo para lograr ahorros de energía. Además, Yi, Jang y Lee (2021) diseñaron un sistema para monitorear la información de las características del combustible de hidrógeno en los autobuses de combustible de hidrógeno para responder al consumo de hidrógeno y la temperatura de cada componente, etc., para determinar la operación segura de los autobuses de celdas de combustible de hidrógeno.

Long et al. (2019) estudiaron la demanda de vehículos de cero emisiones utilizando Canadá como ejemplo. Los resultados mostraron que la mayoría de las personas preferían los vehículos híbridos enchufables y de pila de combustible de hidrógeno como primera opción y los vehículos convencionales o híbridos como segunda opción. Después de esto, Morrison, Stevens y Joseck (2018) predijeron el costo y los posibles problemas de tamaño del mercado para vehículos eléctricos de batería y vehículos eléctricos de celda de combustible de hidrógeno para 2040. Los resultados indican que los vehículos de pila de combustible de hidrógeno costarán aproximadamente entre un 71% y un 88% menos que los vehículos eléctricos puros en flotas de vehículos ligeros para 2040, y que los vehículos de pila de combustible tendrán una ventaja de costos significativa para los modelos más grandes y los conductores con rangos de conducción diarios más largos. Irdmousa et al. (2010) analizaron alternativas energéticas en los Estados Unidos y, bajo supuestos optimistas, la energía del hidrógeno ocupó el primer lugar. Melo, Ribau y Silva (2014) desarrollaron un sistema de energía optimizado para la conversión de autobuses urbanos a celdas de combustible híbridas y analizaron la posibilidad de reemplazar las flotas de autobuses convencionales con flotas de autobuses eficientes equipadas con baterías y celdas de combustible de hidrógeno. Posteriormente, Durango-Cohen y McKenzie (2018) desarrollaron un modelo de optimización aplicado al diseño de flotas de autobuses con diferentes tecnologías de propulsión de combustible, teniendo en cuenta el consumo de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero, las partículas, etc.

Fan et al. (2022) investigaron la estrategia operativa de la energía del hidrógeno en el transporte marítimo bajo en carbono. Se propuso un sistema de propulsión híbrido, que permite el menor costo de operación por debajo del límite de emisión de gases de efecto invernadero y reduce aún más las emisiones de gases de efecto invernadero. Mientras tanto, Ajanovic y Haas (2018) estudiaron las perspectivas económicas y el marco político para los combustibles de hidrógeno en el sector del transporte. Se argumenta que las perspectivas de la aplicación de la energía del hidrógeno en el futuro transporte en autobús dependen del marco político, entre otras cosas. Ramesohl y Merten (2006) investigaron el papel de la energía del hidrógeno como combustible alternativo para el transporte en términos de sistemas energéticos. Argumentaron que, si bien se da prioridad a la producción de hidrógeno limpio a partir de fuentes de energía renovables, también es importante considerar cómo mejorar la eficiencia de los vehículos de pila de combustible de hidrógeno. Fu et al. (2019) evaluaron dos estrategias destinadas a descarbonizar el sector del transporte, la electrificación y el uso de combustible de hidrógeno. Se llegó a la conclusión de que la integración del hidrógeno con los sistemas de energía eléctrica podría proporcionar una fuente de energía alternativa de bajo costo, y que el uso de tecnologías avanzadas de producción de hidrógeno podría reducir aún más los costos. Singh et al. (2015) analizaron las aplicaciones futuras de la energía del hidrógeno en el transporte. Uno de los usos potenciales del hidrógeno es para generadores de circuitos integrados y tecnología de pilas de combustible en el sector del transporte. Llegaron a la conclusión de que, en el futuro, la demanda de energía debería ajustarse para aumentar el uso de hidrógeno como combustible de transporte para proporcionar un medio ambiente limpio y verde para las personas. Verhelst et al. (2012) estudiaron el uso de motores de hidrógeno y concluyeron que la conversión a motores de combustión interna impulsados por hidrógeno podría reducir las emisiones y aumentar la potencia de salida. Rinaldi y Veca (2007) realizaron un estudio sobre tecnologías innovadoras para el almacenamiento de hidrógeno utilizando hidruros químicos. El estudio tuvo como objetivo evaluar la idoneidad del polipropileno y el polietileno de baja densidad como materiales óptimos para este propósito. Los resultados indicaron que estos materiales poseen características excepcionales, incluida la fácil recuperación durante el proceso de almacenamiento de hidrógeno. Además, debido a sus características de seguridad inherentes, estas tecnologías son muy adecuadas para las estaciones de servicio de H2. Abdelrahman et al. (2016) realizaron un estudio de viabilidad de vagones híbridos de pila de combustible y batería. Se presentó un futuro sistema de metro híbrido desarrollado en Canadá, que proporciona una solución para un tren híbrido de pila de combustible completamente independiente de la energía de la red, lo que podría ahorrar la mayoría de los costos y beneficiar a los pasajeros. Borbujo et al. (2021) revisaron la legislación europea y la estandarización sobre hidrógeno y autobuses y camiones pesados puramente eléctricos. Llegaron a la conclusión de que las actuales normas internacionales de seguridad aplicables a las pilas de combustible se centran principalmente en los vehículos ligeros y se formularon recomendaciones. Ren y Liang (2017) desarrollaron un método de toma de decisiones multicriterio grupal difuso para estudiar la sostenibilidad de los combustibles marinos de búnker. Se encontró que el hidrógeno verde es el combustible alternativo más sostenible y que es más socialmente aceptable como portador de energía limpia sin emisiones durante el proceso de oxidación.

En el sector del transporte, las pilas de combustible de hidrógeno se estudian cada vez más como instalaciones de energía. Sin embargo, todavía hay una brecha entre el rango de celdas de combustible de hidrógeno y otras baterías, y se necesita más investigación.

3.2.4 Aplicación de la energía del hidrógeno en la política

El desarrollo de una industria es inseparable de la necesidad de políticas de apoyo necesarias y, a su vez, proporcionará una base científica para los ajustes de política.

Se ha argumentado que se deben desarrollar políticas más integrales para estimular las ventas de vehículos de cero emisiones, en lugar de centrarse en la infraestructura de carga y reabastecimiento de combustible (Miele et al. 2020). Sin embargo, Bach et al. (2020) argumentaron que la aplicación de la tecnología del hidrógeno en el sector marino es actualmente inmadura y, por lo tanto, se debe dar prioridad al apoyo a la investigación y el desarrollo de tecnologías de producción de hidrógeno y el desarrollo de infraestructura, etc. Chen y Melaina (2019) y Jones, Genovese y Tob-Ogu (2020) argumentaron que se debería prestar más atención a las políticas de costos. Del mismo modo, Gallas y Stobnicki (2022) argumentaron que la principal limitación de las aplicaciones de energía de hidrógeno es el costo relativo del combustible de hidrógeno y que las tecnologías de producción de hidrógeno deben desarrollarse para reducir el costo de la producción de hidrógeno o que la producción de hidrógeno debe ser subsidiada. Después de esto, Rottoli et al. (2021) estudiaron vías alternativas para la electrificación de vehículos ligeros en el sector del transporte europeo. Descubrieron que se necesita un impulso político más fuerte para los vehículos de pila de combustible, junto con el desarrollo de una buena infraestructura. Pinchasik y Hovi (2017) estudiaron los fondos de CO2 en el sector del transporte, utilizando a Noruega como ejemplo, y argumentaron que los fondos deberían considerar subsidiar tecnologías renovables como el biogás, la electricidad o el hidrógeno verde para promover la demanda del mercado.

La energía del hidrógeno debe considerarse como la dirección hacia la que apunta la transición energética y su aplicación puede convertirse en una realidad en el transporte marítimo cuando la producción y la demanda de energía de hidrógeno aumentan y los costos disminuyen, y también puede lograr los objetivos climáticos de reducción de emisiones de carbono. Pomaska y Acciaro (2022) investigaron el uso de celdas de combustible e hidrógeno licuado como combustibles alternativos para los barcos, y los resultados del estudio sugieren que los responsables políticos gubernamentales pueden implementar incentivos financieros para acelerar el desarrollo de combustibles de hidrógeno. Además, Ibrahim et al. (2022) estudiaron tres tipos acoplados de grandes parques eólicos flotantes marinos dedicados a la producción de hidrógeno. Las tuberías de hidrógeno en alta mar se consideraban económicas para granjas grandes y remotas. Su análisis concluyó que el enfoque de electrólisis offshore descentralizada es un sistema muy modular y proporciona flexibilidad al tiempo que mejora la operación dinámica. Mubenga y Stuart (2011) analizaron la viabilidad de los vehículos eléctricos de pila de combustible de hidrógeno transportados por hidrógeno generado a partir de energía solar. Se diseñó un sistema para producir hidrógeno utilizando energía solar, lo que demuestra la viabilidad de producir hidrógeno para el transporte utilizando tecnologías de energía alternativa. Ehrenstein et al. (2020) estudiaron la optimización de las cadenas de suministro de combustible a escala global utilizando el caso del hidrógeno en el transporte por carretera en el Reino Unido. Se descubrió que la generación de hidrógeno a partir de agua electrolítica alimentada por energía eólica y nuclear y almacenada en forma comprimida para su distribución por ferrocarril es la menos impactante para una cadena de suministro de combustible sostenible y es una solución sostenible en línea con la capacidad de carga de la tierra.

La aplicación de la energía del hidrógeno requiere apoyo político en términos de desarrollo de infraestructura, incentivos fiscales, avances tecnológicos, etc. La energía del hidrógeno solo puede funcionar en varios campos cuando hay más apoyo de todos los lados.

3.2.5 Otros estudios relacionados con la energía del hidrógeno

Lakhera, Rajan y Bernaurdshaw (2021) analizaron la capacidad de almacenamiento de hidrógeno subterráneo de los montículos de sal y propusieron un método para evaluar el potencial de almacenamiento de hidrógeno de dichos montículos, teniendo en cuenta varias características, como el tamaño y la profundidad del yacimiento. De acuerdo con su método de investigación, la capacidad de almacenamiento de hidrógeno de la sal gema se puede predecir con mayor precisión. Lee et al. (2022) compararon diferentes métodos de transporte de hidrógeno en el extranjero desde perspectivas tecno económicas y ambientales. Los resultados mostraron que las condiciones de operación y el uso de energía renovable son los principales factores para reducir el costo y las emisiones de carbono de la cadena de suministro de hidrógeno. El almacenamiento de hidrógeno líquido se considera favorable, y mejorar la eficiencia energética del ciclo de licuefacción es esencial para lograr un transporte eficiente de hidrógeno. Robledo et al. (2018) evaluaron el potencial de aplicación de los vehículos de pila de combustible mediante la combinación de paneles solares fotovoltaicos integrados, edificios residenciales y vehículos eléctricos de pila de combustible de hidrógeno para la generación de energía para lograr objetivos de construcción residencial de energía neta cero. Menanteau et al. (2011) realizaron un análisis económico del hidrógeno producido por la energía eólica en la industria del transporte. El estudio mostró que la variación en los costos de producción de hidrógeno depende en cierta medida de la demanda involucrada y que la tecnología de almacenamiento de hidrógeno es una variable clave. En el futuro, con el desarrollo de grandes instalaciones geológicas de almacenamiento de hidrógeno en parques eólicos o pequeños sistemas de almacenamiento de hidrógeno cerca de estaciones de servicio, el costo del almacenamiento de hidrógeno puede disminuir significativamente, lo que eventualmente reducirá el costo del hidrógeno para los usuarios.

4. RETOS FUTUROS

En la actualidad, la industria mundial de la energía del hidrógeno se encuentra generalmente en la etapa primaria de desarrollo. Dado que la transición energética es inminente, muchos países del mundo están aumentando su inversión en energía de hidrógeno. Actualmente, Europa y Estados Unidos son líderes en tecnología de energía eólica, la industria fotovoltaica en la República Popular China lidera el mundo y Japón se centra en la energía del hidrógeno (equipo de Fastmarkets 2021). En comparación con otras fuentes de energía, la energía verde del hidrógeno tiene varias ventajas significativas. En primer lugar, el hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, es fácil de obtener y, por lo tanto, tiene grandes ventajas en términos de sostenibilidad. Además, el hidrógeno se puede producir a partir del agua y libera energía química a través de su reacción con la reacción del oxígeno. Todo el proceso solo genera agua y no se producen otros contaminantes, por lo que es un sistema de circuito cerrado reciclable (Stock 2021). En segundo lugar, el alto poder calorífico del hidrógeno lo convierte en un sustituto ideal de los combustibles fósiles existentes. El poder calorífico del hidrógeno es el más alto entre los combustibles comunes, es decir, aproximadamente tres veces mayor que el del petróleo y 3,5 veces mayor que el carbón. Además de esto, con el rápido desarrollo de la industria del vehículo eléctrico a nivel mundial y la fuerte demanda de almacenamiento de energía basada en baterías de litio en la generación de energía eólica y fotovoltaica en el futuro, los recursos de litio se convertirán en una limitación para el desarrollo de una nueva industria energética en el futuro. En comparación con la escasez de litio en las baterías de litio, se puede esperar una ventaja a largo plazo de la energía del hidrógeno. Las baterías de energía de hidrógeno y las tecnologías relacionadas pueden purificar el aire (Hexun 2022), lo cual es una buena noticia para las ciudades con mala calidad del aire. La energía del hidrógeno estará en todas partes en el futuro debido a su amplia gama de usos, y se puede utilizar en materias primas industriales, así como en varios vehículos de energía de hidrógeno para el almacenamiento de energía.

La mayor aplicación de la energía del hidrógeno se encuentra en el sector del transporte, y la tecnología de aplicación más madura de la energía del hidrógeno y el desarrollo más prometedor en el futuro son los vehículos de pila de combustible de hidrógeno en el campo del transporte (Agencia 2019). La cadena industrial de la energía del hidrógeno en el sector del transporte es extremadamente complicada y su valor económico potencial es enorme. La cadena de la industria de la energía del hidrógeno en el sector del transporte incluye la producción, el almacenamiento y el transporte de hidrógeno, las estaciones de servicio de hidrógeno, las aplicaciones de celdas de combustible de hidrógeno y la integración de vehículos, y otros procedimientos. En consecuencia, existen desafíos en la producción, compresión, almacenamiento, transporte, distribución y uso final del hidrógeno (Furfari 2021). El primer desafío es cómo reducir significativamente el costo de la producción de hidrógeno verde. La tendencia de desarrollo de la energía del hidrógeno es del hidrógeno gris al azul, y finalmente al hidrógeno verde. Aunque el hidrógeno gris tiene contaminantes, su coste es bajo, y es el principal medio de producción de hidrógeno a medio y largo plazo. La producción de hidrógeno por electrólisis del agua es una forma efectiva de lograr la producción a gran escala de hidrógeno verde, pero el costo es alto y la sustitución completa de la energía fósil no se puede lograr completamente a corto plazo. En los últimos años, se ha llevado a cabo una gran cantidad de trabajo sobre la producción de hidrógeno a partir de agua electrolítica, y se ha avanzado muy bien en muchos aspectos. En el futuro, será necesario mejorar continuamente el proceso de producción de hidrógeno y reducir el costo de la producción de hidrógeno verde a partir de agua electrolítica.

Después de esto, el segundo desafío es disminuir el costo de almacenamiento y transporte de la manera más efectiva. El hidrógeno es químicamente activo e inestable: si hubiera una fuga, sería muy fácil que se quemara y explotara, por lo que también se debe considerar la seguridad. Sin embargo, en comparación con los desafíos de seguridad, su costo es la clave para obstaculizar el desarrollo de la energía del hidrógeno en el transporte. Hay tres formas principales de almacenar hidrógeno, incluyendo gas, líquido y sólido. La tecnología gaseoso-líquido de alta presión se ha utilizado ampliamente, y el almacenamiento y transporte de hidrógeno líquido es técnicamente maduro, pero el costo del transporte es alto y existe el riesgo de fugas y explosiones, mientras que el almacenamiento criogénico de hidrógeno líquido es costoso. El almacenamiento de hidrógeno en estado sólido todavía se encuentra en la etapa de investigación y desarrollo. En la actualidad, el transporte de gas para hidrógeno se utiliza principalmente, complementado por el transporte en estado líquido. El transporte por tuberías es adecuado para el transporte de hidrógeno a gran escala y larga distancia con alta eficiencia, pero requiere la construcción de tuberías y mucha inversión de capital en la etapa inicial; El transporte líquido también consume más energía. En el proceso de almacenamiento y transporte, los requisitos de materiales son muy altos.

En tercer lugar, es un desafío reducir el costo de los equipos clave en las estaciones de servicio de hidrógeno y los componentes críticos en las celdas de combustible. El equipo central de una estación de reabastecimiento de hidrógeno incluye un dispositivo de almacenamiento de hidrógeno, un equipo de compresión y un equipo de llenado, siendo el compresor el más costoso. Actualmente, las vías técnicas de una estación de reabastecimiento de hidrógeno se pueden dividir en producción de hidrógeno dentro de la estación y suministro externo de hidrógeno. La producción de hidrógeno a partir de agua electrolítica dentro de las estaciones es la dirección de desarrollo futuro. Además, la pila de combustible de hidrógeno es el componente central de los vehículos de nueva energía basados en hidrógeno. En la etapa inicial de la industrialización, las políticas de apoyo del gobierno son muy necesarias. La parte más importante del sistema de pila de combustible de hidrógeno es la pila de combustible, incluida la pila de pilas de combustible y el compresor de aire, que son costosos y restringen el desarrollo de pilas de combustible de hidrógeno. El costo de la pila de celdas de combustible representa el 50% de la celda de combustible de hidrógeno, y el electrodo de membrana es el núcleo de la pila, lo que representa el 60% del costo. Aquí hay que mencionar los catalizadores de platino, que son muy caros, y necesitamos desarrollar tecnología catalítica baja en platino o sin platino. La reducción de costos es el foco del desarrollo futuro de la energía del hidrógeno en el campo del transporte.

Además de esto, un desafío importante para la aplicación de la energía del hidrógeno en el sector del transporte radica en si los países y las organizaciones de todo el mundo pueden cooperar y apoyarse mutuamente para establecer conjuntamente un ecosistema económico de energía del hidrógeno. Los seres humanos se enfrentan al problema común del calentamiento global, y es urgente alcanzar los objetivos de neutralización de carbono y pico de carbono. Algunos países han comenzado a conceder gran importancia a la energía del hidrógeno y han presentado una estrategia para el desarrollo de la energía del hidrógeno. Por ejemplo, Japón propuso la estrategia de crecimiento verde de neutralidad de carbono para 2050 en diciembre de 2020, y la Unión Europea emitió el Pacto Verde Europeo en diciembre de 2019, ambos con requisitos y expectativas claros para la energía del hidrógeno. Como el país en desarrollo más grande, la República Popular China está desarrollando energía de hidrógeno tarde, pero se espera que represente el 10% del consumo total de energía en 2050. El informe de trabajo del gobierno en la República Popular China en 2019 propuso claramente promover la construcción de infraestructura como las estaciones de servicio de hidrógeno. En el "14º Plan Quinquenal", el desarrollo de la energía del hidrógeno también se ha organizado en consecuencia. En el contexto de la neutralidad de carbono, todos los países y organizaciones deben trabajar juntos para negociar derechos de propiedad intelectual y mecanismos de intercambio de patentes, establecer un mecanismo de entrada al mercado y promover conjuntamente el establecimiento de un ecosistema económico basado en la energía del hidrógeno que combine la producción, el almacenamiento, el transporte, la hidrogenación, las aplicaciones de celdas de combustible de hidrógeno y otros procedimientos en un sistema de cadena industrial sostenible eficiente y de bajo costo.

La aplicación futura del hidrógeno debe estudiarse y desarrollarse, la tecnología para la producción de hidrógeno debe mejorarse, se requieren equipos y materiales clave para reducir el costo y la seguridad del hidrógeno también es una preocupación. Todavía no se ha resuelto cómo producir hidrógeno de manera extremadamente eficiente, segura y a bajo costo, y las normas técnicas relacionadas también deben desarrollarse con otros países. Solo cuando la tecnología está madura, el costo es bajo y el mercado tiende a aceptar hidrógeno a gran escala, la energía del hidrógeno puede usarse ampliamente en diversos campos, y luego puede promover la conservación de energía y la descarbonización de los sistemas de transporte, a fin de contribuir a la visión de la neutralidad de carbono.

5. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES DE POLÍTICA

El cambio climático es uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo (Naciones 2022), y promover el transporte ecológico y bajo en carbono es una forma importante de hacer frente a esta situación. El sector del transporte es una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero, y existe un consenso creciente en muchos países para promover el transporte ecológico. En base a esto, la energía del hidrógeno ha recibido gran atención debido a sus ventajas únicas, como cero emisiones y alto poder calorífico.

Para comprender la historia, el estado y los desafíos futuros de la energía del hidrógeno en el sector del transporte, estamos llevando a cabo esta revisión. Primero, recapitulamos rápidamente los antecedentes de la energía del hidrógeno en el sector del transporte y el estado de la investigación de la energía del hidrógeno. Después de esto, se revisan las aplicaciones de la energía del hidrógeno, se introducen el proceso de producción, los procesos y las tecnologías para la energía del hidrógeno, y también se discuten aquí la historia, el estado y las controversias de la energía del hidrógeno en el transporte. Posteriormente, realizamos una búsqueda y análisis bibliográfico, y se obtienen 148 artículos básicos. Se resumen los principales temas sobre la energía del hidrógeno en el transporte, es decir, el problema de la ubicación de las estaciones de servicio de hidrógeno, los impactos de las pilas de combustible de hidrógeno en las emisiones de gases de efecto invernadero, el uso de vehículos de pilas de combustible y el impacto ambiental de los vehículos de pilas de combustible de hidrógeno. En base a esto, se extraen los principales desafíos, incluida la reducción del costo de la producción de hidrógeno verde, la disminución del costo de almacenamiento y transporte, la reducción del costo de los equipos clave en las estaciones de servicio de hidrógeno y los componentes críticos en las celdas de combustible, y si los países y las organizaciones de todo el mundo pueden cooperar y apoyarse mutuamente.

En comparación con los vehículos de nueva energía basados en baterías de litio, los vehículos de pila de combustible de hidrógeno tienen varias ventajas, como estar libres de restricciones de temperatura, mayor kilometraje y reposición rápida de combustible. En comparación con los desafíos de seguridad, su costo es el problema clave que obstaculiza el desarrollo de la energía del hidrógeno. Hoy en día, muchos académicos se dedican al estudio de las aplicaciones y el desarrollo de la energía del hidrógeno en el sector del transporte. Todos los aspectos de la producción, almacenamiento, transporte y uso de hidrógeno han recibido atención. Actualmente, la aplicación de la energía del hidrógeno en el transporte es principalmente en pilas de combustible, reemplazando la energía fósil con energía de hidrógeno para desempeñar su papel en la conservación de energía y la reducción de emisiones. Sin embargo, la aplicación de la energía del hidrógeno en el transporte también está limitada por el costo de la producción de hidrógeno, la eficiencia del transporte, la seguridad de uso, etc.

Sobre la base de las tecnologías actuales del hidrógeno y las condiciones del mercado, se recomiendan las zonas urbanas y circundantes como lugares prioritarios para el despliegue de estaciones de repostaje de hidrógeno. Es más probable que estas regiones tengan un volumen de tráfico relativamente alto y sistemas de transporte público bien desarrollados, y los residentes de estas regiones tienden a ser más conscientes del medio ambiente, todo lo cual es propicio para el uso práctico de la energía del hidrógeno en el transporte. Además, deben proporcionarse subvenciones adecuadas para alentar a las empresas u organizaciones a participar en la construcción de estaciones de repostaje de hidrógeno. El gobierno también puede ofrecer reducciones de impuestos o subvenciones financieras para fomentar la inversión en la construcción de estaciones. Además, deben promoverse los vehículos de pila de combustible de hidrógeno para facilitar el uso de la energía del hidrógeno en vehículos pesados como camiones y autobuses. A través de subsidios, exención de impuestos a la compra de vehículos y peajes gratuitos, el gobierno puede desempeñar un papel importante en la promoción del consumo de vehículos impulsados por hidrógeno. Además, se debe alentar a las empresas / organizaciones académicas a participar en la investigación y el desarrollo (I&D) de la tecnología de energía de hidrógeno y promover la industrialización de vehículos de pila de combustible de hidrógeno y equipos relacionados, a fin de establecer una cadena industrial de vehículos de energía de hidrógeno.

Para garantizar el uso seguro de la energía del hidrógeno en el sector del transporte, es imperativo establecer leyes, reglamentos y normas de seguridad pertinentes para la energía del hidrógeno. Por ejemplo, la certificación y las pruebas de los vehículos de pila de combustible de hidrógeno deben reforzarse, mientras que los procesos de transporte y reabastecimiento de combustible de gas hidrógeno deben regularse. Por último, para promover mejor las aplicaciones de la energía del hidrógeno, los esfuerzos de publicidad y educación también son esenciales, y mejorar la protección de la propiedad intelectual y la conciencia ambiental del público también facilitará eficazmente el desarrollo de la tecnología de la energía del hidrógeno en el campo del transporte.

Aunque el costo de cada aspecto es relativamente alto y el desarrollo de la energía del hidrógeno es relativamente lento en la actualidad, dada la abundancia de hidrógeno y las características verdes de la energía del hidrógeno, el desarrollo de la energía del hidrógeno estará más allá de la imaginación de las personas. Como resultado de esta revisión, ahora entendemos más claramente que los obstáculos encontrados en el desarrollo de la energía del hidrógeno en el sector del transporte no son insuperables. En el contexto de la neutralidad de carbono, los gobiernos y las instituciones de todos los países realmente necesitan trabajar juntos para establecer un ecosistema económico que sea más adecuado para el desarrollo de la energía del hidrógeno. En resumen, la energía del hidrógeno está a punto de florecer.