ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.794

Green hydrogen as an energy source in the mining sector

Luis A. Chire[1], Bachiller de Ingeniería Industrial[1], Rafael G. Lujan[2], Bachiller de Ingeniería Industrial[2], Erika E. Arroyo[3], Magister[3], Sarichzada Chalco[4], Magister[4],Víctor S. Sologuren[5], Magister[5]
[1,2,3,4,5]Universidad Tecnológica del Perú, Perú. [1]*u20205078@utp.edu.pe*, Perú. [2]*u20227783@utp.edu.pe*, Perú, [3]*c27266@utp.edu.pe* ,Perú.[4]*c24444@utp.edu.pe*, Perú. [5]*c26987@utp.edu.pe*, Perú

Abstract:

Currently, studies on alternative energy sources suggest that green hydrogen produced by electrolysis is an efficient and sustainable option, which expands the supply of fuels for various industrial applications. The objective of this review is to promote the implementation of an energy system based on green hydrogen in the mining sector, in order to reduce costs and improve the economic stability of companies in the sector. A total of 242 reviewed articles were selected from the SCOPUS database, using the PICOC method, and covering the period between 2019 and 2024. Of these, 18 studies were included that present relevant information, evidencing that the adoption of green hydrogen, along with other alternative energy sources, will have a positive and sustainable impact on the mining sector in the long term. The results of the review indicate that the implementation of green hydrogen is mainly concentrated in emerging countries in Asia and Europe, where key aspects such as efficiency and costs associated with its use in fuel cells are emphasized. These systems leverage technologies such as electrolysis, ionization and other biofuels, complemented by advanced tools such as simulation software, methodologies applied in real

environments and economic evaluations. Such approaches present significant improvement opportunities for companies that choose to adopt this technology. In conclusion, the adoption of green hydrogen in the mining industry emerges as a viable and

promising solution, as it could generate greater financial stability, reduced operating costs and the possibility of integrating other biofuels, with efficiency yields ranging from 19% to 25%.

Keywords- Hydrogen, Green, Oil, Global, quality.

El hidrógeno verde como fuente de energía en el sector minería

Luis A. Chire[1], Bachiller de Ingeniería Industrial[1], Rafael G. Lujan[2], Bachiller de Ingeniería Industrial[2],

[1,2,]Universidad Tecnológica del Perú, Perú. [1]*U20205078@utp.edu.pe*, Perú. [2]*U20227783@utp.edu.pe*'

Resumen- Actualmente, los estudios sobre fuentes de energías alternativas sugieren que el hidrógeno verde producido mediante electrólisis es una opción eficiente y sostenible, lo que amplía la oferta de combustibles para diversas aplicaciones industriales. El objetivo de esta revisión es promover la implementación de un sistema energético basado en hidrógeno verde en el sector minero, con el fin de reducir costos y mejorar la estabilidad económica de las empresas del sector. Se seleccionaron 242 artículos revisados de la base de datos SCOPUS, utilizando el método PICOC, y cubriendo el período entre 2019 y 2024. De estos, se incluyeron 18 estudios que presentan información relevante, evidenciando que la adopción de hidrógeno verde, junto con otras fuentes de energía alternativa, tendrá un impacto positivo y sostenible en el sector minero a largo plazo. Los resultados de la revisión indican que la implementación del hidrógeno verde se concentra principalmente en países emergentes de Asia y Europa, donde se enfatizan aspectos clave como la eficiencia y los costos asociados a su uso en celdas de combustible. Estos sistemas aprovechan tecnologías como la electrólisis, la ionización y otros biocombustibles, complementados con herramientas avanzadas como software de simulación, metodologías aplicadas en entornos reales y evaluaciones económicas. Dichos enfoques presentan oportunidades de mejora significativa para las empresas que decidan adoptar esta tecnología. En conclusión, la adopción del hidrógeno verde en la industria minera emerge como una solución viable y prometedora, ya que podría generar una mayor estabilidad financiera, reducción de costos operativos y la posibilidad de integrar otros biocombustibles, con rendimientos de eficiencia que oscilan entre el 19% y el 25%.

Palabras clave- Hidrógeno, Verde, Petróleo, Global, calidad.

I. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 80 años los combustibles fósiles han sido nuestra principal fuente de energía, desde el uso de un vehículo para el transporte personal, como para el uso industrial [1], y si bien estos hidrocarburos son eficientes en cierta medida tienen

algunas fallas correspondientes, como los elevados costes al inicio y la proyección que presenta a un considerable largo plazo [2] por ello con el transcurrir del tiempo se han ido añadiendo diferentes alternativas como el biodiesel [3] del cual su fuente de materia prima es vasta ya sea biológico, químico, etc. [3], [4] pero a pesar de encontrar en cierta forma otros sustitutos, estos tienden a un problema el cual radica en su constante volatibilidad en los costos [4]. A través de los años, los constantes conflictos relacionados con el uso de combustibles han provocado tensiones que abarcan un tema político más que logístico, tanto por parte del grupo que lo consume como de los propios proveedores de estos, Por esta razón, las empresas en la industria minera recurren a estrategias como el movimiento constante de personal, cambios in significativos, o directamente recorte de personal para afrontar los costes en combustibles que varían constantemente [5]. Con lo mencionado en el sector empresarial de la minería, vemos que los cargos superiores tienden a buscar alternativas poco fiables, y he aquí es donde entra una nueva alternativa para solventar este problema, el hidrogeno verde, una energía capaz sustituir los hidrocarburos comunes, que abarca una intersección de energía, sostenibilidad y tecnología lo suficientemente capaz y funcional como para solventar las necesidades de costeo de las empresas [5], [6]. El hidrógeno verde tiene un enorme potencial como portador de energía limpia. Es una opción versátil para las industrias, incluido el transporte ya que, en un futuro lejano, los vehículos propulsados por electricidad e hidrógeno serán de mucha importancia [7].

No obstante, un creciente conjunto de evidencia sugiere que estas tecnologías constituyen una opción atractiva para la descarbonización profunda de los sistemas energéticos globales [8], y que las recientes mejoras en su costo y desempeño apuntan también hacia la viabilidad económica impulsado por la necesidad de luchar contra el cambio climático y la transición hacia una economía que reduzca las emisiones de carbono [1]. El constante nivel de contaminación y el inevitable derroche de los combustibles fósiles son problemas importantes en el nuevo siglo que requiere acciones inmediatas para su prevención [6]. Bajo este contexto, investigadores y científicos están invirtiendo mucho en el desarrollo y el despliegue de tecnologías de hidrógeno verde, con el fin de presentar estas ideas a grandes empresas y así promover el uso masivo de biocombustibles, que influirá a cambiar los impactos ambientales e impactos económicos que se produzcan en las corporaciones [9].

Con base a los señalado, el hidrogeno verde tiene todas las capacidades para poder establecerse como una alternativa predominante en el sector del combustible y energías, demostrado así en su evaluación con respecto al ingreso neto, el TIR, el período de recuperación y el precio de equilibrio [4], estos análisis económicos sirven para verificar cómo los cambios de parámetros afectan la utilidad neta, aunque por el momento esta energía no es conocida por todo el mundo.

El uso de hidrógeno verde para la recolección de energía barata puede imponer el uso de energías renovables en la minería. [5], [6], con un sistema descentralizado que trabaja en el uso de recursos locales, esta podría ser una mejor alternativa para estas áreas aisladas [4], [10], [11]. Esto genera resistencia al cambio por parte del sector minero, debido al miedo ya presentado por otras energías que aseguran ser el futuro de la industria, para poder garantizar la fiabilidad del suministro energético en sistemas de energías renovables, estas deben tener cero emisiones, por lo que se debe contar con varias centrales eléctricas, los costes de producción de este combustible depende enormemente en medida a la producción de hidrógeno electrolítico, que consume mucha energía [12] , ya que se requiere de ciertos parámetros costosos o que a corto plazo es inviable.

El uso del hidrógeno verde como fuente de energía en el sector minero, evalúa el potencial para optimizar procesos, mejorar la productividad y reducir costos comparados con los hidrocarburos actuales [2]. Se busca identificar las ventajas y posibles obstáculos del uso de un nuevo combustible sustentable en comparación con los combustibles fósiles tradicionales en la minería evaluando su viabilidad económica y técnicas de la implementación de tecnologías basadas en energías alternativas en operaciones mineras [13].

La integración del hidrógeno verde con energías limpias en entornos mineros implica acoplar generación renovable (solar, eólica) con electrolizadores para producir hidrógeno in situ, almacenarlo y usarlo posteriormente en celdas de combustible, garantizando una operación sostenible, continua y libre de emisiones, incluso en zonas remotas.

Por ende, para identificar el impacto y lograr que el hidrogeno verde sea más conocido y empleado se optó por el trabajo de realizar una revisión sistemática de literatura o “RSL”, en cuanto a la metodología se realiza mediante la revisión documentaria. En la sección 3, Resultados, se presenta y organiza los datos obtenidos sobre cómo se desarrolla el hidrogeno verde y como este influye en otros países en el contexto actual, a la par de evaluar el futuro de los hidrocarburos y su desarrollo en las empresas. Por consecuente, en la sección 4, Discusión, da pie a la comparación sobre los resultados obtenidos y la causa de que el hidrogeno verde es una fuente eficaz y capaz de reemplazar al agotado recurso que se usa actualmente, ofreciendo criterios económicos, perspectiva a futuro y limitaciones. Por último, en la sección 5, Conclusiones, permite dar la última revisión y análisis acerca de la nueva alternativa presentada, recalcando el propósito de la RSL.

En consecuencia, se plantea la siguiente pregunta ¿Cómo el hidrogeno puede optimizar los procesos de tal manera que mejore la productividad y genere ahorro en costos comparado con los otros hidrocarburos actuales?

II. METODOLOGÍA

A. Descripción de la Estrategia de Búsqueda Sistemática

.

Se empleó la metodología basada en la revisión documentaria en base a investigaciones anteriores.

1. *Pregunta PICO y sus Componentes*

TABLA 1 PREGUNTA PICOC
DE ACUERDO CON LOS PARÁMETROS PROPUESTO SE DA PASE A ORDENAR CON LAS PALABRAS ELEGIDAS EN LA PREGUNTA PICOC Y SUS RESPECTIVAS PALABRAS CLAVE.

P	Problema/ población	Hidrógeno verde	"Green", "hydrogen", "quality", "petroleum", "global".
I	Intervención	A través de su uso	Diesel, electricity, "fossil fuels", "heavy machinery"
C	Comparación	Hidrocarburos actuales	"Conventional energy", "Diesel", "electricity generated", "coal", "natural gas", "Green, hydrogen".
O	Resultados	Optimización de procesos para la productividad y ahorrar costos	Costs, time, "improve productivity", efficiency, save, maintenance, performance, "energy use".
C	Contexto	Empresas mineras	"Mining companies", "mines", "factories", "Workplace", "Workspace", "Commercial building", "industry".

B. *Determinación de las interrogantes secundarias de la investigación*

TABLA 2 INTERROGANTES SECUNDARIAS

Interrogantes de investigación	Motivación
PI1: ¿Cómo se ha conceptualizado la ineficacia de los hidrocarburos?	Cambios abruptos de gastos y presupuestos, continuos problemas en el abastecimiento
PI2: ¿Cuál es la necesidad de reemplazar los hidrocarburos actuales por una nueva alternativa?	Solventar los problemas que acarrea la gasolina o glp de manera que este disminuya gastos
PI3: ¿Por qué los hidrocarburos se consideran costos volátiles en el presupuesto de una empresa?	Mercado actual, desabastecimientos, huelgas constantes, demasiado caro
PI4: ¿Qué puede hacer el hidrogeno verde que no puede hacer el petróleo y la gasolina?	Aprovechar recursos de la misma empresa, más ecológico, es menos costoso
PI5: ¿Quiénes han demostrado que el hidrogeno verde es rentable?	Países desarrollados, de Europa y Asia demuestran una mejor rentabilidad a largo y plazo.

Las siguientes interrogantes requieren de ser respondidas a través de los artículos recolectados de las bases de datos. En la tabla 2 se provee algunas interrogantes de interés para la investigación, entonces, el propósito del trabajo consistió en la inspección profunda, que busca ofrecer energía rentable con el uso del hidrogeno verde y su implementación en empresas de carácter mineras y se buscarán identificar las posibles carencias en el proceso.

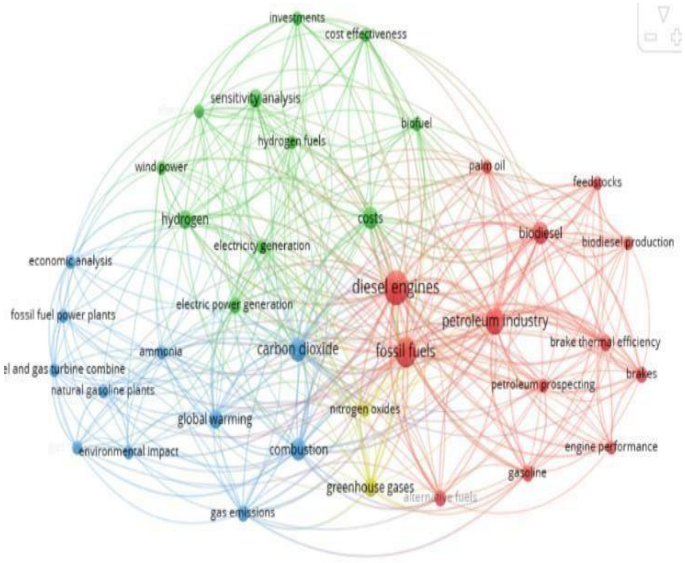


Fig. 1 Mapa de concurrencias de palabras clave

C. *Palabras en inglés para la fórmula PICOC*

En la esfera del centro se observan las palabras claves, este conjunto de palabras deriva a la rama de hidrocarburos; denotando la relación entre el tema que se trata con los combustibles fósiles, combustibles; se adentra en la parte sobre cada uno de los tipos de combustibles el cual puede mejorar o cambiar para la investigación, MINING COMPANIES; esta
palabra es clave ya que trata de las industrias mineras, fábricas espacios de trabajo, etc. , PERFOMANCE; se analiza el aspecto de las realizaciones públicas que abarca el tema general que sería el HYDROGEN GREEN; como algo subjetivo tenemos el petróleo, el medio global y por

último la calidad que se logra adquirir. D. *Proceso de Búsqueda*

Para el estudio se ha empleado la base de datos Scopus. Esta plataforma o sitio web fue escogida por su extensa búsqueda de información bibliográfica de calidad y de investigaciones actuales. Dichas bases de datos incluyen una amplia gama de artículos y revistas académicas que han sido revisados por diferentes personas. que aportan sobre el tema en diversos campos de las ciencias y sus diversas áreas de investigación que pueda reforzar el estudio. Se utilizó un campo combinado para buscar resúmenes, palabras exactas y títulos de varios documentos, por lo que con la ayuda del PICOC se determina la siguiente formula:

"(Green OR hydrogen OR quality OR petroleum OR global) AND (Diesel, electricity OR "fossil fuels" OR "heavy machinery") AND ("Conventional energy" OR Diesel OR "electricity generated" OR coal OR "natural gas" OR Green OR hydrogen) AND (Costs OR time OR "improve productivity" OR efficiency OR save OR maintenance OR performance OR "energy use") AND ("Mining companies" OR mines OR factories OR Workplace OR "Work space" OR "Commercial building" OR industry)"

En la revisión se considera incluir y excluir diferentes criterios

Los criterios establecidos para garantizar la objetividad de los artículos elegidos son:

1. De la fórmula de PICOC resulta un total de 242.
2. Al momento de filtrar las fechas fueron descartados 163, resultan 79.
3. Al filtrar por temas no relacionados fueron 12, se obtuvo 67.
4. Luego por objetivos y contexto se excluye 45, resulta 22.
5. Por último, se excluyó 9 documentos debido al poco acceso.
6. Resulta un total de 18 artículos para la RSL.

E. Selección de Datos

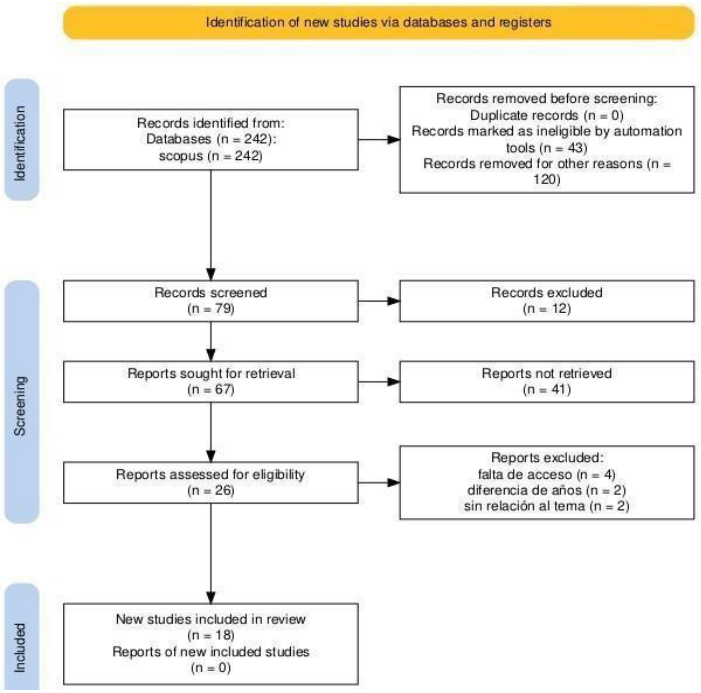


Fig. 2 Diagrama de flujo PRISMA del proceso de revisión sistemática.

Se ordenaron los datos de los artículos más pertinentes al final del proceso de depuración y recopilación de información. Para ello, se utiliza una matriz de datos para simplificar y resumir la información relevante, además de poder crear estadísticas a partir de la información. El autor, el título, el país de origen, la autoridad de la fuente, el instrumento, el tipo de fuente, el año de publicación y la base de datos se encuentran en las columnas de la matriz.

III Resultados

1.Resultados bibliométricos:

En este capítulo se describe los documentos elegidos con los cuales la RSL se ha fundamentado ya sea por sus investigaciones, su procedencia, el tipo de estudio y que herramientas se emplearon a la hora de destacar estos artículos. Para ello se procedió seleccionar investigaciones recientes, con un margen de 5 a 6 años, debido a que estas soluciones se plantean en un contexto actual, con resultados que sirven tanto para el presente como para un futuro próximo, con ideas innovadoras, estos documentos reflejan una recolección crítica y resume toda la evidencia disponible con respecto a la efectividad del hidrogeno verde y su uso en el sector minero.

TABLA 3
TABLA DE ARTÍCULOS UTILIZADOS

Articulo	Año	País	tipo de estudio	herramientas usadas
[1]	2024	Noruega	Estudio de caso	EMPIRE
[2]	2021	España	Experimento	Costos totales de propiedad
[3]	2019	India	Experimento	Box-Behnken
[4]	2019	Indonesia	Estudio de caso	TIR-VAN
[5]	2020	Canadá	Investigación-acción	ESS
[6]	2020	Canadá	Investigación-acción	software HOMER
[7]	2024	Alemania	Experimento	Estudios logísticos
[8]	2024	China	Estudio de caso	LHF
[9]	2020	Polonia	Experimento	Métricas
[10]	2024	Bangladesh	Investigación Acción	Estudios logísticos
[11]	2019	Bolivia	Investigación-acción	Análisis de sensibilidad
[12]	2024	Estados Unidos	Simulación	Estudios
[13]	2024	Etiopía	Experimento	PAC
[14]	2020	India	Investigación-acción	Exámenes variados
[15]	2019	Alemania	Estudio de caso	B/C-WACC
[16]	2024	Portugal	Estudio de caso	Estudios
[17]	2021	Noruega	Experimento	análisis tecno económico
[18]	2023	India	Estudio de caso	Estudio de pirólisis

En la tabla 3 se puede visualizar un resumen donde se enumeran los diferentes artículos utilizados de acuerdo con parámetros como el país, tipo de estudio utilizado y herramienta usada para así, encontrar patrones.

Es importante evidenciar que el tema abarca gran cantidad de países, demostrando que el hidrogeno verde, no solo es interés de ciertos países desarrollados como Estados Unidos o China, sino también de países emergentes como Canadá, India, Bolivia, etc.

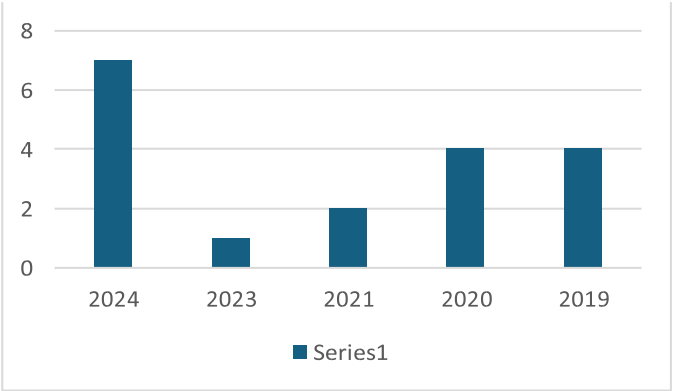


Fig. 3 Artículos por años

En la figura 3 se aprecia la distribución brindada por los artículos con referente a los años en los que las investigaciones se han usado, se observa cuantos artículos fueron realizados desde el 2019 hasta el 2024, cada uno de ellos organizados por la fecha de publicación que servirán como apoyo a la RSL.

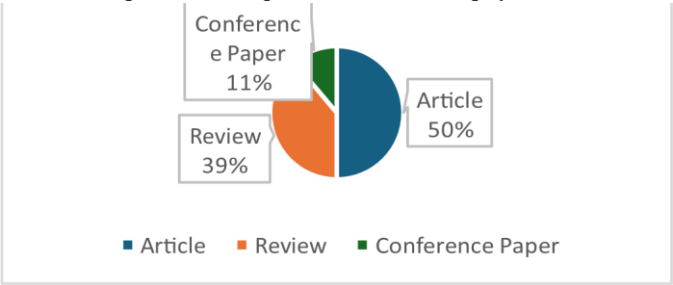
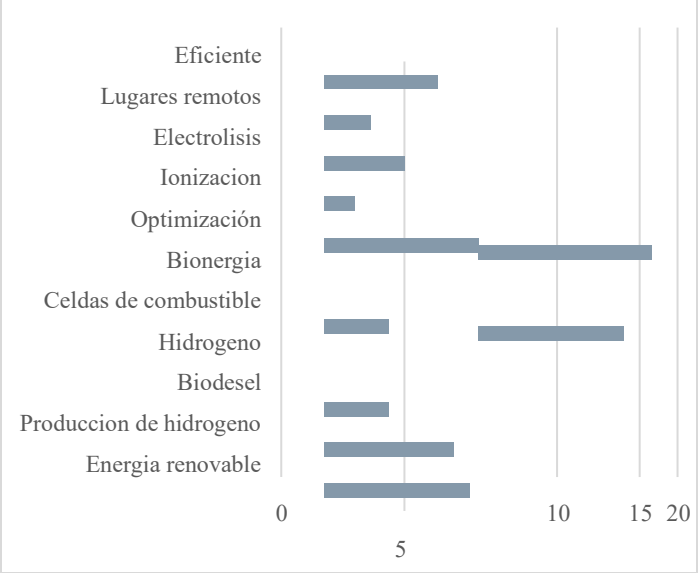


Fig. 4 Tipos de documentos empleados

La figura 4 se aprecia los tipos de documentos empleados para la RSL que varían entre diversos tipos de investigaciones. Se han llevado a cabo diversos trabajos de investigación para conocer formas de utilizar el hidrógeno verde en zonas de difícil acceso, estos se encuentran en diferentes textos como variables de investigación con impactos medibles, aspectos importantes y necesarios para tener en cuenta a la hora de desarrollar la presente investigación. Por tanto, cuando se refiere a fuentes de energía renovables como el hidrógeno verde, las investigaciones consideradas se presentan en formato de artículos; ofrecen sugerencias para mejorar el uso del hidrógeno en el campo de los combustibles para automóviles, en tanto que las revisiones que se encontró tienden a ser de tipo social, dar una visión más amplia de lo que consiste las energías renovables y como este interactúa con otra propuestas sustentables, como el biodiesel [4] o "hidrotano", una mezcla de amoníaco (NH_3) y hidrógeno (H_2) usada como combustible en generación de energía para hacerla más limpia, eficiente y con menos óxidos de nitrógeno.[16],

[17], otra alternativa presentada fue la pirólisis, proceso en el que se descompone un material mayormente orgánico para producir carbón vegetal a partir de madera, obtener biocombustibles a partir de residuos agrícolas o plásticos, y lo que nos interesa. Generar hidrógeno limpio, siempre y cuando se aplique la pirólisis con amoníaco o gas natural. [18]. Mientras que los documentos de conferencia identificados exponen las propuestas del hidrogeno para el sector minero, demostrando procesos de guardado, recolección, aplicando



simulaciones.

Fig. 5 Ocurrencias en palabras claves en los documentos

Como consecuencia de los términos técnicos tienden a repetirse debido a su implicancia de uno con el otro. La Figura 5 describe la cantidad de tecnicismos relevantes que se ha encontrado, algunos con términos relativamente comunes en el campo de la ingeniería como Energía renovable, termino para definir cualquier energía obtenida de fuentes naturales que se reponen continuamente de tal manera que pueda generar un impacto positivo; Eficiencia, capacidad de lograr un objetivo o resultado deseado; hasta términos más infrecuentes, como electrolisis, se usa electricidad para separar los componentes de una sustancia [13], celdas de combustible dispositivo de alta tecnología que convierte la energía química de un combustible directamente en electricidad [12]; o ionización, proceso en el que un átomo o una molécula pierde o gana electrones y pasa a ser un ion[8].

2. *Hallazgos obtenidos del contenido de la revisión sistemática.*

Los artículos seleccionados corresponden a estudios de casos, con metodología de investigación cualitativa, la cual se enfoca en examinar a fondo un fenómeno, evento o situación en un contexto específico y se caracteriza por la observación detallada de un sujeto o grupo específico con el objetivo de generalizar los conocimientos obtenidos a situaciones similares. La simulación es un método de investigación y aprendizaje que utiliza modelos computacionales para reproducir y estudiar el comportamiento de sistemas o procesos , por ejemplo, se usó un sistema de microrred híbrido optimizado para equilibrar la oferta y la demanda de energía [10], que simuló una nueva situación en la que el hidrogeno verde sustentaba a toda una planta, demostrando su efectividad y solidez a la hora de compararlo con la gasolina común, útil en el experimento, el proceso controlado que se realiza para respaldar, refutar o validar la hipótesis propuesta.

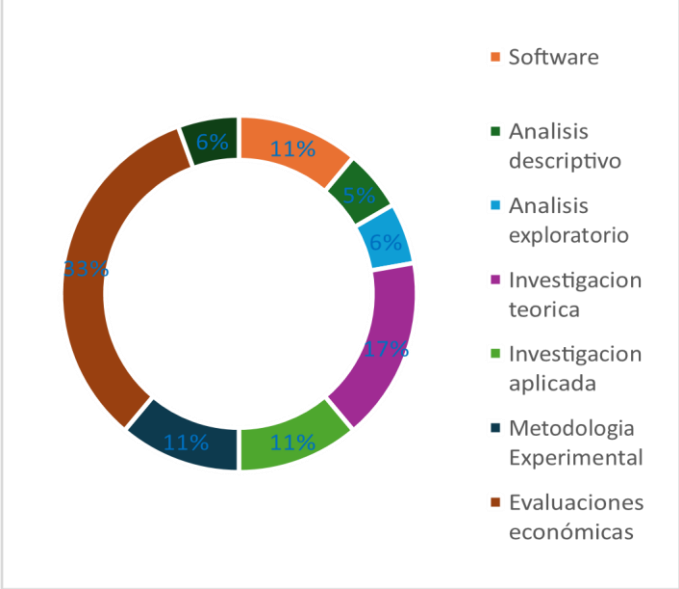


Fig. 6 Herramientas identificadas para el desarrollo del artículo.

La figura 6 muestra en porcentajes las diferentes alternativas de herramientas empleadas, las cuales se identificaron para una mejor clasificación. De acuerdo con el gráfico se aprecia que, para simular las nuevas fuentes de energía, se emplea un software de simulación que identifica un 17% de las actividades que implica la utilización de este programa informático, por otro lado, los análisis descriptivos consisten en investigaciones realizadas en base a estudios previos. Por

otro lado, el análisis exploratorio surge de la identificación de un proceso crítico, el cual sirve como punto de partida para llevar a cabo nuevas investigaciones iniciales sobre los datos para descubrir patrones que representan un 6%.

Las investigaciones teóricas presentadas son exámenes sistemáticos de un conjunto de creencias y supuestos con un 17%, la investigación aplicada, son citas donde se aprecia que los datos ejecutan un plan para abordar la hipótesis, tienen el 11%; el método experimental, que incluye algunos pasos del método científico, cubre el 11%, por último y el más importante, ya que refleja en datos aplicables a nuestra realidad mediante la rentabilidad, las valoraciones económicas, que ocupan un 33% son todos documentos revelados que tienen que ver con costos y apoyo presupuestario, entrando aquí indicadores de gestión como VAN, el cual mide si el proyecto vale la pena hoy, tomando en cuenta todo el dinero que se va invertir o gastar en el futuro TIR, la mejor manera de ver el porcentaje de rentabilidad que tienen los proyectos y el B/C indicador que compara todo lo que se gana dividido entre todo lo que gastas, con el fin de ver si la implementación de una nueva metodología de trabajo es factible [4], y otros diversos trabajos de simulación e investigación para dar a conocer las formas de utilizar el hidrógeno verde en zonas de difícil acceso. Por lo tanto, estos textos contienen variables de investigación con impactos medibles, aspectos importantes y necesarios a tener en cuenta. Entonces, cuando se habla de fuentes de energía renovables como el hidrógeno verde, se debe pensar de la manera más científica. Los artículos suelen presentarse en sugerencias para mejorar el uso del hidrógeno en el campo de los combustibles para maquinaria sumado a otros combustibles renovables. El método económico para evaluar si los proyectos son rentables representa el 28%, y finalmente la programación lineal, que es el uso de un método que asegura una línea de producción exitosa que permite conectar el hidrógeno verde con la industria [2]. A través de esta tabla, se aprecia la prioridad que se da a las evaluaciones económicas sobre otras, enfatizando que todos los documentos seleccionados conducen a un uso eficiente y rentable del hidrógeno verde como combustible alternativo al convencional.

PI1: ¿Cómo se ha conceptualizado la ineficacia de los hidrocarburos?

Los hidrocarburos, con el pasar de los años han cargado con problemas, siendo responsables de aproximadamente el 24% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero[15], sumado a ello, el uso y el precio del combustible aumenta gracias a la demanda y la oferta [14]; el poco acceso que se encuentra en áreas donde urgen otra alternativas distintas a la convencional [4], [10], [11]; Con el tiempo, los hidrocarburos han demostrado ser ineficientes: sus costos (ambientales, económicos y sociales) superan sus beneficios [8]. Pese a esto, persiste una dependencia al status quo [2], [13], incluso ante su agotamiento irreversible.

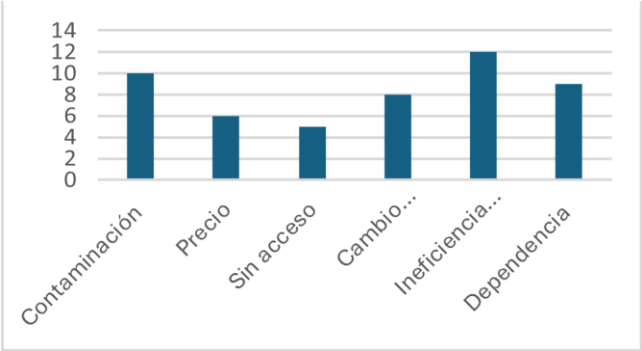


Fig. 7 Problemas actuales de los hidrocarburos

- Contaminación
- Precio
- Sin acceso
- Cambio climático
- Ineficiencia energética
- Dependencia

La Figura 7 evidencia las deficiencias comunes de los hidrocarburos actuales, coincidiendo con lo señalado por [1], [5], [7], [8], [12], [13], [15]. Su uso descontrolado agrava la contaminación y acelera su agotamiento, perpetuando una dependencia insostenible. Esta ineficiencia, impulsada por una visión cortoplacista, exacerba los impactos ambientales y energéticos a largo plazo

PI2: ¿Cuál es la necesidad de reemplazar los hidrocarburos actuales por una nueva alternativa?

TABLA 4
RESULTADOS Y EFECTOS DE UTILIZAR EL HIDROGENO VERDE EN EL SECTOR MINERO

Artículos	Efecto	Porcentaje	Aporte
[5]	capaz de beneficiar al sector minero	19%	Los combustibles de hidrocarburos líquidos requieren cambios
[7]			nuevos vehículos con hidrogeno verde
[10]			instalación de celdas
[12]			La demanda de electricidad es menor con el hidrogeno
[1]			uso de sistema B/FC/BET
[11]	Aumento de eficiencia	12%	este sistema puede reducir casi 427 toneladas/año

[3]			El consumo de energía renovable debería aumentar un 300% para 2050
[17]			alternativa favorable al diésel sintético y al metanol
[2]	Capaz de trabajar con otras energías	23%	es esencial almacenar el excedente de energía
[3]			optimizar la síntesis de bioproductos con beneficios
[14]			el hidrogeno puede unirse al metano
[4]			El método de pirólisis tiene potencial para abordar la gestión
[18]			Compara los costos y los ingresos de la producción del biodiesel y el hidrogeno
[17]			Unión de hidrogeno orgánico y metanol
[5]	Reducción de costes	19%	Reducción de costos en un 8% frente a la gasolina común
[6]			Rentabilidad fuentes de combustibles
[15]			precios de combustible de amoniaco y h. por debajo de 400 USD/t
[17]			Los costes dependen de la producción de hidrógeno
[10]			Los mejores resultados muestran que la electricidad generada reduce costos
[10]	Mejora el impacto ambiental	12%	Sistemas descentralizados basados en el uso de recursos locales
[13]			Permite estabilidad, la oportunidad y la moderación
[8]			Recomendación de uso de medios de transporte ecológicos
[9]	Implementación de hidrogeno verde	15%	Hidrógeno verde eventualmente gana en el impacto mundial
[5]			Mejora para el proceso SR
[10]			Comparación con otros sistemas
[12]			Modelo de optimización del ESS

La Tabla 4 clasifica los artículos seleccionados según su postura frente a alternativas energéticas. Un 19% respalda el hidrógeno verde para el sector minero, destacando su potencial de reducir costos al integrarse con otras renovables disponibles localmente [5], [7], [10]. Esto coincide con un 12% de estudios que confirman su mayor eficiencia y ahorros (19%), mientras que un 15% propone plantas dedicadas para su almacenamiento y uso en maquinaria. Sin embargo, el hidrógeno verde enfrenta competencia de biocombustibles [4], [14], [17], cuyos costos iniciales y plazos de implementación son mayores [12], [15]. Adicionalmente, se destacan aplicaciones clave como la producción de hidrógeno, pilas de combustible y gestión térmica en motores mediante LHF SR [5].

PI3: ¿Por qué los hidrocarburos son costos volátiles en el presupuesto de una empresa?

En relación con las anteriores preguntas, los hidrocarburos presentan costos volátiles en el presupuesto de una empresa debido a factores que afectan sus precios en el mercado, el principal de ellos es el crecimiento económico, cambios en el consumo energético y la producción de petróleo y gas afectan la disponibilidad y el precio [13], mientras que a diferencia de las energías renovables, como la solar y la eólica, esto es una oportunidad para almacenar el exceso de energía potencial para utilizarlo en un momento posterior.[5]; también, a lo largo de los años, los conflictos relacionados con su acceso y uso, generan dependencia de los combustibles fósiles, involucrando a varios gobiernos regionales y nacionales [2], este problema energético-ambiental se propaga más en las operaciones remotas, donde no hay acceso a la red eléctrica ni gasoductos naturales, lo que las hace depender únicamente de un solo combustible puede generar perdidas a las empresas [6]; dicho esto, no podemos dejar pasar que una de las causas de la volatibilidad de los combustibles convencionales es la introducción de nuevas alternativas crecientes para su reemplazo [2], [7], [15]

PI4: ¿Qué puede hacer el hidrogeno verde que no puede hacer el petróleo y la gasolina?

El estudio de las fuentes de energía renovables, en particular el hidrógeno verde, requiere un enfoque riguroso desde el punto de vista científico y técnico. En este contexto, la aplicación del hidrógeno como combustible para maquinaria, en combinación con otros combustibles renovables, representa un área clave de desarrollo. Su implementación tiene un impacto ambiental significativo, especialmente en la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y gases de efecto invernadero (GEI), lo que contribuye a la mitigación del cambio climático, para evaluar la viabilidad de estos

proyectos, se realiza un análisis económico que constituye el 28 % de la valoración global, lo que evidencia la importancia de determinar su rentabilidad. Adicionalmente, la programación lineal se emplea como una herramienta de optimización que permite diseñar una línea de producción eficiente, facilitando la integración del hidrógeno verde en la industria y mejorando su competitividad en el mercado energético. [2]. Los resultados expuestos en la tabla evidencian que la evaluación económica ocupa un lugar prioritario frente a otros factores, lo que refleja un objetivo común en los estudios analizados: fomentar el uso del hidrógeno verde como una opción viable y competitiva en comparación con los combustibles tradicionales. Sumado a eso la posibilidad su almacenamiento tambien supone una ventaja clara frente a los hidrocarburos, En el caso del hidrógeno y derivados , el riesgo de una explosión es mucho menor que otros combustibles más habituales ya que se vuelve explosivo en concentraciones entre el 20,% y el 65%, por lo que tanto su traslado como su almacenamiento en celdas de combustible son una mejor opción
[6]

PI5: ¿Quiénes han demostrado que el hidrogeno verde es rentable?

El hidrogeno verde y su uso como combustible; plantea una propuesta innovadora [1], muchas empresas aún evalúan el uso de gasolina y diésel [9], por ello, las organizaciones tratan de reinventar esta idea creando el biodiesel [4] el cual obtienen a partir de elementos orgánicos [4], [14], [15] y del mencionado hidrógeno verde, creando una relación que demuestre la implementación de una planta que genere su propia energía a través de recursos sustentables, dando como resultado reducción de costos en el campo de la logística con respecto al transporte, y generando nuevos empleos. La recopilación de los archivos muestra un patrón de evolución en la investigación: tenemos 4 artículos correspondiente a 2019, otros 4 artículos en 2020, unos 3 artículos en el 2021, 1 en el 2023 y 6 artículo del 2024. Estos datos indican que el tema está en constante desarrollo y con el tiempo se tenga mejores resultados.

Fig. 8 Distribución de países por publicación

De acuerdo con la figura, Países como Canadá, India, China, Alemania, están realizando trabajos de simulación e investigación, además de recolectar métodos para emplear el hidrógeno verde en áreas de difícil acceso [15] esto puede facilitar su transporte y su almacenamiento para reabastecer el sector automotriz de la empresa, e incluso esta energía puede ser aprovechada para el uso total de un sistema de electrificación o para el funcionamiento de maquinarias, dispuestas a operar una jornada entera [[7], [15]].

IV. DISCUSIÓN

El estudio de revisión evaluó el potencial del hidrógeno verde como fuente energética en minería, concluyendo que su adopción puede reducir costos y mejorar la estabilidad económica del sector. Aunque la transición demandará años, las empresas que implementen estrategias innovadoras como el almacenamiento en celdas locales, electrólisis, pirólisis o hidrótano tendrán ventajas competitivas frente a los combustibles fósiles tradicionales. Además, investigaciones recientes [7], [12] respaldan su viabilidad: el 67% de las empresas mineras que usan hidrógeno verde producido mediante electrólisis (con energías eólica/solar) reportan mayor sostenibilidad y rentabilidad en comparación con los derivados del petróleo.

La implementación de un sistema de energía basado en hidrógeno verde se presenta como una solución eficaz para los problemas asociados con los combustibles fósiles. Sin embargo existen problemas que incluyen altos costos iniciales y una volatilidad significativa en los precios a largo plazo con un 80% de empresas en Asia que mencionan lo costoso que resulta la transición [18]. Sumado a eso, otros autores afirman que los constantes conflictos políticos y logísticos relacionados con el uso de combustibles fósiles han llevado a las empresas mineras a buscar alternativas más fiables y sostenibles [6]. Un estudio comparativo muestra que el hidrógeno verde no solo es más económico a largo plazo 27% más rentable que los hidrocarburos, sino que también tiene un menor impacto ambiental, lo cual es crucial en el contexto actual de cambio climático y necesidad de descarbonización de los sistemas energéticos globales [1].

En particular, países desarrollados en Europa y Asia han demostrado la rentabilidad del hidrógeno verde, destacando su viabilidad económica y sus beneficios ambientales frente auditorías ambientales que redujeron en un 45% su reporte de desviaciones en cuanto a calidad [4], [10]. Sin embargo, a pesar de sus ventajas, la adopción del hidrógeno verde en la minería enfrenta desafíos significativos, como los costos iniciales de producción y la necesidad de una infraestructura adecuada para su implementación [7].

La producción de hidrógeno mediante electrólisis consume mucha energía, lo que puede ser un obstáculo para su adopción a gran escala 62% de empresas lo mencionan [13], [15]. A pesar de estos desafíos, el hidrógeno verde representa una alternativa prometedora para la minería, con el potencial de reemplazar a los combustibles fósiles y mejorar la productividad y la eficiencia operativa , en un 23% de

reducción de gastos [11]. La continua inversión en investigación y desarrollo de tecnologías de hidrógeno verde es crucial para superar estos obstáculos y promover su adopción en la industria minera [6].

V. CONCLUSIONES

Esta revisión sistemática identificó los puntos clave para dar a conocer los beneficios que puede brindar esta nueva energía, en concordancia con el objetivo de analizar el comportamiento actual del hidrógeno verde como alternativa a los hidrocarburos en el sector minero, se puede concluir que esta fuente de energía representa una solución viable y prometedora. El efecto de mayor repercusión es que este tipo de energía es capaz de beneficiar al sector minero, con valores que oscilan entre 19% y 25%. Con esto se demuestra que el hidrógeno verde ofrece beneficios económicos a largo plazo; así, los hidrocarburos líquidos requieren un cambio que incluyan la implementación de celdas y el uso de un sistema B/FC/BET. A pesar de los desafíos iniciales en la implementación, la adopción del hidrógeno verde en la industria minera puede conducir a una mayor estabilidad financiera y reducción de costos operativos con un 8% de frente a la gasolina, logrando que el combustible en los resultados finales solo sea de 400 USD/T.

Esta transición energética beneficiará a la hora de la evaluación anual de diferentes herramientas socio económicas como el B/C, WACC, y que esta nueva energía trabaje a la par con otras nuevas y emergentes, como el uso de metanol, la unión de hidrogeno con etano y algunos biodiesel orgánicos, todo con el fin de animar a que las empresas mineras consideren seriamente la integración del hidrógeno verde en sus estrategias energéticas futuras, puesto que, representa una solución sostenible y económicamente viable a largo plazo. Para futuros trabajos, se recomienda evaluar las consecuencias a corto plazo para que asi las empresas se motiven a cambiar de paradigma, los elevados costes iniciales, debido que el resultado a largo plazo es uno de los factores que más desmotiva a las empresas al proponerle estas nuevas opciones de combustible.

REFERENCIAS

[1] H. Shen, P. Crespo del Granado, R. S. Jorge, and K. Löffler, "Environmental and climate impacts of a large-scale deployment of green hydrogen in Europe," *Energy and Climate Change*, vol. 5, 2024, doi: 10.1016/j.egycc.2024.100133.

[2] P. Reimers, "The subsidized green revolution: The impact of public incentives on the automotive industry to promote alternative fuel vehicles (afvs) in the period from 2010 to 2018," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 18, 2021, doi: 10.3390/en14185765.

[3] K. Puniyani, R. Malik, H. Kumar, and G. Dwivedi, "Optimization of fuel properties of cottonseed biodiesel and its impact on engine performance and emission," *SN Appl Sci*, vol. 1, no. 11, 2019, doi: 10.1007/s42452-019-1348-9.

[4] F. Harahap, S. Silveira, and D. Khatiwada, "Cost competitiveness of palm oil biodiesel production in Indonesia," *Energy*, vol. 170, pp. 62– 72, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.115.

[5] A. Romero, D. Millar, M. Carvalho, and R. Abrahão, "100% renewable fueled mine," *Energy*, vol. 205, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117964.

[6] H. Kalantari, S. A. Ghoreishi-Madiseh, and A. P. Sasmito, "Hybrid renewable hydrogen energy solution for application in remote mines," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 23, 2020, doi: 10.3390/en13236365.

[7] J. Winkelmann, S. Spinler, and T. Neukirchen, "Green transport fleet renewal using approximate dynamic programming: A case study in German heavy-duty road transportation," *Transp Res E Logist Transp Rev*, vol. 186, 2024, doi: 10.1016/j.tre.2024.103547.

[8] Z. Xiao *et al.*, "A comprehensive review on steam reforming of liquid hydrocarbon fuels: Research advances and Prospects," *Fuel*, vol. 368, 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2024.131596.

[9] Ł. Sobol and A. Dyjakon, "The influence of power sources for charging the batteries of electric cars on CO2 emissions during daily driving: A case study from Poland," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 6, 2020, doi: 10.3390/en13164267.

[10] I. Ahmed, M. A. Razzak, and F. Ahmed, "Sustainable hybrid renewable energy management system for a community in island: A model approach utilising Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources optimization and priority setting-based Supervisory Control and Data Acquisition operation," *IET Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 940–966, 2024, doi: 10.1049/stg2.12192.

[11] A. Magne and E. Cardozo, "Analysis of environmental impacts due to the generation of electricity using sugar cane bagasse pellets in rural areas of Bolivia," in *ECOS 2019 - Proceedings of the 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, 2019, pp. 847–859.

[12] Z. Saadat, M. Farazmand, and M. Sameti, "Integration of underground green hydrogen storage in hybrid energy generation," *Fuel*, vol. 371, 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2024.131899.

[13] Y. Dessie, E. Tilahun, and T. H. Wondimu, "Functionalized carbon electrocatalysts in energy conversion and storage applications: A review," *Heliyon*, vol. 10, no. 20, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39395.

[14] B. Venkatesh and G. Prasanthi, "Detailed analysis on emission and performance characteristics of neat biofuel-fuelled diesel engine," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 41, no. 7, pp. 841–848, 2020, doi: 10.1080/01430750.2018.1477067.

[15] P. Runge, C. Sölch, J. Albert, P. Wasserscheid, G. Zöttl, and V. Grimm, "Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035," *Appl Energy*, vol. 233–234, pp. 1078–1093, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.023.

[16] S. A. Alavi-Borazjani, L. A. da Cruz Tarelho, and M. I. Capela, "Biohythane production via anaerobic digestion process: fundamentals, scale-up challenges, and techno-economic and environmental aspects," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, no. 38, pp. 49935–49984, 2024, doi: 10.1007/s11356-024-34471-8.

[17] Z. Cesaro, M. Ives, R. Nayak-Luke, M. Mason, and R. BañaresAlcántara, "Ammonia to power: Forecasting the levelized cost of electricity from green ammonia in large-scale power plants," *Appl Energy*, vol. 282, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116009.

[18] K. Radhakrishnan *et al.*, "A critical review on pyrolysis method as sustainable conversion of waste plastics into fuels," *Fuel*, vol. 337, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.126890.