

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL USO DEL HIDRÓGENO COMO FUENTE DE
ENERGÍA ALTERNATIVA FRENTE A LA MATRIZ ENERGÉTICA ACTUAL
COLOMBIANA**



ANGGY LORENA TRUJILLO ESCOBAR
DIANA MILENA CARRASCAL HERNANDEZ
FRANCISCO JAVIER PEDRAZA CAMACHO

TUTOR:

LUZ MARINA SANCHEZ AYALA

ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE PROYECTOS

UNIVERSIDAD EAN

BOGOTÁ

2023

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	7
2. ABSTRACT.....	8
3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	9
3.1. Antecedentes del problema.	9
3.2. Descripción del problema.	10
3.3. Pregunta de investigación.	10
4. OBJETIVOS	11
4.1. Objetivo general	11
4.2. Objetivos específicos	11
5. JUSTIFICACIÓN.....	12
6. MARCO TEÓRICO	13
6.1. Transición energética	13
6.1.1. Definición y concepto de transición energética	13
6.1.2. Razones y necesidades para la transición energética	14
6.1.3. Principales desafíos y obstáculos en la transición energética	14
6.2. Matriz energética en Colombia	16
6.2.1. Definición de la matriz energética	16
6.2.2. Composición actual de la matriz energética colombiana.....	20
6.2.3. Impactos ambientales y sociales de la matriz energética colombiana	23

6.3.	Hidrógeno	24
6.3.1.	Propiedades y características del hidrógeno	24
6.3.2.	Aplicaciones del hidrógeno.....	25
6.3.3.	Políticas y regulaciones del hidrógeno.....	26
7.	METODOLOGÍA.....	31
7.1.	Primer Nivel.....	31
7.1.1.	Enfoque, alcance y diseño de la investigación.....	31
7.1.2.	Definición de Variables	31
7.1.3.	Población y Muestra.....	35
7.2.	Segundo nivel.....	41
7.2.1.	Selección de métodos o instrumentos para recolección de información	41
7.2.2.	Técnicas de análisis de datos	41
8.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	43
8.1.	Beneficios e Impactos	43
8.1.1.	Fortalezas	44
8.1.2.	Oportunidades	44
8.1.3.	Debilidades.....	45
8.1.4.	Amenazas	46
8.2.	Riesgos y Desafíos	47
8.2.1.	Fortalezas:	47

8.2.2.	Oportunidades:	50
8.2.3.	Debilidades:	53
8.2.4.	Amenazas:	56
8.3.	Políticas y Regulaciones	58
8.3.1.	Tipos de hidrógeno a desarrollar.....	58
8.3.2.	Exención de impuestos.....	58
8.3.3.	Fondo de financiamiento y ejecución de proyectos	59
8.3.4.	Apoyo a la investigación.....	60
8.3.5.	Vigilancia de actividades y CCUS.....	60
8.3.6.	Disminución de emisiones de carbono.....	62
8.3.7.	Fomento de vehículos a gas natural, eléctricos y/o con hidrógeno.....	63
8.3.8.	Políticas y compromiso de los ministerios a fomentar el uso del hidrógeno	64
8.3.9.	Estaciones de servicio de hidrógeno	65
8.3.10.	Flexibilidad en los proyectos “sandbox”	65
9.	CONCLUSIONES	67
10.	BIBLIOGRAFÍA	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de energía primaria en Colombia.....	21
Figura 2. Consumo de energía primaria de Colombia 2020 vs 2021	21
Figura 3. Matriz energética Colombia 2021 de acuerdo con BP	22
Figura 4. Matriz energética Colombia 2021 de acuerdo con el UPME.....	22
Figura 5. Emisiones de CO2 procedentes de energía, emisiones de procesos, metano y quema	23
Figura 6. Formato análisis FODA.....	42
Figura 7. Desarrollo análisis FODA	43
Figura 8. Desarrollo análisis FODA	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Bibliografía para evaluar las variables de Impactos y Beneficios	36
Tabla 2. Bibliografía para evaluar las variables de Riesgos y Desafíos	38
Tabla 3. Bibliografía para evaluar las variables de Políticas y Regulaciones (1/2).....	39
Tabla 4. Bibliografía para evaluar las variables de Políticas y Regulaciones (2/2).....	40
Tabla 5. Recolección y Análisis de Datos.....	41
Tabla 6. Tipos de hidrógeno a desarrollar.....	58
Tabla 7. Exención de impuestos	59
Tabla 8. Fondo de financiamiento y ejecución de proyectos.....	60
Tabla 9. Apoyo a la investigación.....	61
Tabla 10. Vigilancia de actividades y CCUS.....	61
Tabla 11. Disminución de emisiones de carbono	62
Tabla 12. Fomento de vehículos a gas natural, eléctricos y/o con hidrógeno.....	63
Tabla 13. Políticas y compromiso de los ministerios a fomentar el uso del hidrógeno.....	64
Tabla 14. Estaciones de servicio de hidrógeno	65
Tabla 15. Flexibilidad en los proyectos “sandbox”	66

1. RESUMEN

La transición energética como tendencia nacional y mundial como consecuencia del calentamiento global trae a colación la duda si Colombia está preparada para un cambio en su política energética nacional hacia las energías limpias y más específicamente hacia el hidrógeno como medio de almacenamiento de energía.

Siendo así, el objetivo principal del estudio se basa en realizar una búsqueda exhaustiva de información relacionada al hidrógeno (beneficios, impactos, riesgos, desafíos, políticas y regulaciones) y la matriz energética del país (beneficios e impactos), con el fin de poner en contexto al lector; realizar un análisis comparativo entre las variables y finalmente responder al cuestionamiento sobre el estado actual de Colombia en la incorporación del hidrógeno en el país.

Para el desarrollo de los objetivos se debe tener en cuenta que el enfoque es cualitativo y se llevará a cabo a través del “análisis de contenido” de los documentos estudiados. En consecuencia, las variables analizadas serán descriptivas (beneficios económicos, impactos sociales, política vehicular, entre otros), según sea el caso.

Al final del documento encontrará un análisis comparativo de beneficios e impactos entre las energías de la matriz energética colombiana y el hidrógeno; identificación de riesgos y desafíos en la implementación de esta nueva tecnología; y las mejores prácticas en cuanto a políticas y regulaciones mundiales del hidrógeno para acelerar su adopción en Colombia.

Palabras Clave: Fuente de energía, Gases de efecto invernadero, Hidrógeno, Matriz energética, Análisis de contenido, Análisis comparativo, FODA

2. ABSTRACT

The energy transition, as a national and global trend driven by global warming, raises the question of whether Colombia is prepared for a shift in its national energy policy towards clean energy, specifically hydrogen as an energy storage medium.

Therefore, the main objective of this study is to conduct a comprehensive search for information related to hydrogen (benefits, impacts, risks, challenges, policies, and regulations) and the country's energy matrix (benefits and impacts) in order to provide context to the reader. The study aims to perform a comparative analysis of the variables and ultimately address the question of Colombia's current status in incorporating hydrogen in the country.

In pursuing these objectives, it should be noted that the approach is qualitative and will be carried out through a "content analysis" of the documents under study. Consequently, the analyzed variables will be descriptive (economic benefits, social impacts, vehicular policy, among others), as the case may be.

At the end of the document, you will find a comparative analysis of the benefits and impacts between the energy sources in Colombia's energy matrix and hydrogen. The study will also identify risks and challenges in implementing this new technology and highlight best practices regarding global hydrogen policies and regulations to accelerate its adoption in Colombia.

Keywords: Energy source, Greenhouse gases, Hydrogen, Energy matrix, Content analysis, Comparative análisis, FODA

3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La preocupación frente al calentamiento global provocado por los gases de efecto invernadero de energías no renovables, como los hidrocarburos, han acelerado el desarrollo de nuevas fuentes de energía no contaminantes entre las que se destaca el hidrógeno (Morales Ramos, Pérez Figueroa, Pérez Gallardo y De León Almaraz, 2017). Actualmente en Colombia, la empresa nacional de hidrocarburos Ecopetrol S.A se ha comprometido a reducir sus emisiones netas de carbono a 0 en 2050 (Ecopetrol, 2021), siendo así, ha sido pionera en diversos proyectos de energías alternativas que buscan ser implementadas en Colombia como la energía eólica, solar, geotérmica e hidrógeno (UPME, 2015). De esta forma, se han desarrollado proyectos piloto de generación de hidrógeno verde (electrólisis impulsada por energías renovables) en la refinería de Cartagena con la ayuda de paneles solares y aguas industriales; y se tiene proyectado para los próximos años dos (2) megaproyectos de hidrógeno verde en las refinerías de Cartagena y Barrancabermeja (Ecopetrol, 2022a). Una vez mencionado lo anterior, se busca con este proyecto evaluar y estudiar la viabilidad que tiene el hidrógeno como medio de almacenamiento de energía y su aporte a la transición energética en Colombia.

3.1. Antecedentes del problema.

Actualmente la lucha contra el cambio climático se ha convertido en un tema de interés internacional, siendo así, durante el acuerdo de París de 2015 los países del mundo reunidos se comprometieron a mantener el aumento de la temperatura media global por debajo de 2 °C, con una recomendación prioritaria a trabajar para que no aumente por encima de 1,5 °C. Colombia siendo parte de los países firmantes, se comprometió a reducir sus emisiones a 51% para 2030 (Ministerio de Minas y Energía, s.f.), de un total aproximado de 258 millones de toneladas de CO2 equivalentes emitidos en 2012 (IDEAM, 2016).

Teniendo en cuenta lo anterior, el compromiso de Colombia obliga a las principales industrias y empresas emisoras de gases de efecto invernadero, como Ecopetrol S.A., a alinearse a los objetivos del acuerdo de París de 2015. Es así, como Ecopetrol S.A., se compromete a reducir sus emisiones netas de carbono a 0 en 2050 (Ecopetrol, 2021) y comienza a investigar e invertir en proyectos de energías alternativas que buscan ser implementadas en Colombia, como es el caso de granjas de paneles solares, energía geotérmica y generación de hidrógeno verde (UPME, 2015); poniendo a esta compañía como ejemplo a otros sectores del país.

Siendo el hidrógeno de interés para Ecopetrol, se han desarrollado proyectos piloto exitosos, como en la refinería de Cartagena, que han dado pie para el desarrollo e inversión en nuevos proyectos encaminados a este nuevo medio de almacenamiento de energía, un ejemplo son los 2 megaproyectos de hidrógeno verde que se proyectan desarrollar para 2024 en las refinerías de Cartagena y Barrancabermeja (Ecopetrol, 2022a), dando como resultado el desarrollo de un nuevo mercado en Colombia y el mundo.

3.2. Descripción del problema.

El desarrollo de una nueva energía en Colombia y el mundo como el hidrógeno, demanda un estudio concreto de nuevas industrias potenciales en la generación, almacenamiento y distribución de los diferentes tipos de hidrógeno (verde, amarillo, negro, entre otros).

Actualmente en Colombia se están desarrollando este tipo de proyectos a través de grandes compañías como Ecopetrol S.A., dejando rezagado a otras posibles industrias que aportarían a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Siendo así, esta investigación busca contextualizar y confirmar el potencial energético que tiene nuestro país en la generación, almacenamiento y distribución del hidrógeno.

3.3. Pregunta de investigación.

¿Cuál es el estado actual de Colombia frente al desarrollo del hidrógeno en su proceso de transición energética?

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Realizar un análisis comparativo del hidrógeno como fuente de energía alternativa frente a la matriz energética actual colombiana, identificando características específicas, beneficios e impactos en el proceso de la transición energética.

4.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión de la literatura sobre la transición energética, los tipos de fuentes de energía utilizados y el papel del hidrógeno como fuente de energía alternativa en Colombia.
- Evaluar los beneficios e impactos de la adopción del hidrógeno en la transición energética, comparándolo con las fuentes de energía actuales de la matriz energética colombiana.
- Identificar posibles riesgos y desafíos asociados a la implementación del hidrógeno como fuente de energía alternativa en el proceso de la transición energética en Colombia para la industria de hidrocarburos
- Investigar las políticas y regulaciones internacionales relacionadas con el uso del hidrógeno como fuente de energía, identificando las mejores prácticas y recomendaciones para impulsar su adopción y desarrollo en Colombia.

5. JUSTIFICACIÓN

La transición energética es un tema de importancia mundial, lo cual lo corrobora el Acuerdo de París de 2015, donde se firmó un tratado legalmente vinculante para enfrentar la crisis climática actual. A medida que el planeta sufre los impactos a causa del calentamiento global, la necesidad de cambiar la forma en que el ser humano genera y consume energía toma más relevancia, por tal razón surge la necesidad de analizar la composición de la matriz energética colombiana con el objetivo de contribuir a la reducción de gases de efecto invernadero que se asocia directamente al cambio climático.

Colombia enfrenta desafíos relacionados con la seguridad energética y la diversificación de fuentes de energía, lo anterior debido a la dependencia histórica de los combustibles fósiles como el petróleo y el carbón, es por ello por lo que el País ha aunado esfuerzos para incluir nuevas fuentes de energía más limpias y renovables, como la energía solar, eólica e hidroeléctrica.

Adicional a las fuentes de energía convencionales, Colombia ha venido trabajando en el desarrollo e incorporación de fuentes de energía alternativa como el hidrógeno, esta fuente genera una amplia gama de soluciones en cuanto a los medios de transporte y generación de electricidad por mencionar algunos.

Finalmente, en el desarrollo de este trabajo se abarcan los conceptos básicos de la transición energética en relación con las fuentes de energía y en términos de reducción de gases de efecto invernadero, con el fin de identificar los beneficios e impactos que tiene cada fuente de energía que compone la matriz energética colombiana en el proceso de la transición energética.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Transición energética

6.1.1. Definición y concepto de transición energética

Los cambios de una forma de producción de energía a otra han tenido sus inicios desde el paso de la madera al carbón en el siglo XIX y luego del carbón al petróleo en el siglo XX; (Enel Green Power, s.f.) es desde entonces que se habla de la transición energética, la cual pretende incentivar nuevas formas de energía renovables, es decir, energías que se obtengan a partir de fuentes naturales inagotables y que generan electricidad limpia, permitiendo satisfacer las necesidades del hombre sin tener que recurrir a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural que conllevan directamente a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) impactando al cambio climático.

Es así como la actual transición energética tiene que ver con el Acuerdo de París, dicho acuerdo estableció la meta de limitar el aumento de la temperatura Mundial por debajo de 2°C y preferiblemente en 1.5 °C en relación con los niveles preindustriales, lo anterior, requiriendo una transformación económica y social.

El Acuerdo de París de 2015 es un hito en el proceso multilateral del cambio climático porque, por primera vez, un acuerdo vinculante en el que actualmente hacen parte 194 países los cuales se unieron con el objetivo de emprender esfuerzos ambiciosos para combatir el cambio climático y adaptarse a sus efectos. (UNFCCC, s.f.)

La transición energética emprende la búsqueda y el desarrollo de nuevas energías renovables que se deriven de las fuentes naturales y que estas a su vez lleguen a reponerse más como la luz solar y el viento; ya que son fuentes se renuevan continuamente. Las fuentes de energía renovable abundan y las encontramos en cualquier entorno. Por el contrario, los combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas, constituyen fuentes de energía no renovables que tardan cientos de millones de años en formarse. Los combustibles fósiles producen la energía al quemarse, lo que provoca emisiones dañinas en forma de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (Naciones Unidas, s.f.)

6.1.2. Razones y necesidades para la transición energética

La razón fundamental por la que se promueve la transición energética actual es la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) causantes del cambio climático (Linares Llamas, 2018).

Dicha necesidad requiere de la disminución de las actividades humanas en cuanto a la quema de combustibles fósiles, la tala de bosques y la cría de ganado, sin embargo, y bajo el entendido que el ser humano requiere de alimento, agua, bienestar, entre otros, se requiere que la transición energética tenga una diversificación gradual y ordenada a energías renovables, es decir el aprovechamiento de los recursos de la industria petrolera por ejemplo para fortalecer las energías renovables entrantes y los negocios de bajas emisiones, las cuales deben estar en línea con la sostenibilidad económica y medioambiental del País.

Ahora bien, este proceso debe surtirse bajo un proceso justo, es decir, hacer que la economía sea lo más inclusiva posible para todos los interesados, permitiendo evidenciar los beneficios o impactos sociales, económicos y culturales que impulse el progreso y la estabilidad de las actividades humanas en un contexto de desarrollo sostenible.

Así mismo, los beneficios sobresalientes de la actual transición se asocian al mejoramiento de la salud, esto debido a la disminución en la contaminación atmosférica. Los daños y las enfermedades generadas por el cambio climático se prevén entre el 2030 y el 2050 puedan causar más aproximadamente 250.000 muertes anuales (OMS,2021), y especialmente en las ciudades, donde los niveles de contaminación superan en muchos casos a los recomendados por la Organización Mundial de la Salud.

Por otro lado, una de las razones en las que se debe sustentar la transición energética se basa en los objetivos de Desarrollo Sostenible planteados por las Naciones Unidas, en especial el objetivo No. Siete (7) el cual busca garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos, pero a su vez asegurando que los consumidores vulnerables, los de menor renta, pueden también acceder a un uso suficiente de la energía. (Naciones Unidas, s.f.)

6.1.3. Principales desafíos y obstáculos en la transición energética

La planificación y gestión adecuada de los gobiernos en cuanto a los recursos energéticos, ha permitido que hoy día se pueda mantener la vida y las actividades diarias de las personas, sin embargo, con la transición energética se abre la puerta a la posibilidad que la

seguridad energética pueda verse afectada por la interrupción de servicios, por la incertidumbre que pueda llegar a tener la ejecución y aplicación de las nuevas energías renovables en el contexto de estabilidad económica, política y el desarrollo general, así como la seguridad alimentaria y el transporte, por lo que en el momento de existir alguna afectación en esta cadena se hace necesario garantizar que las economías funcionen sin interrupciones de energía proporcionando a la población el suministro de energía limpia adecuado, viable y asequible (CEPAL, 2019)

Las energías renovables están creciendo rápidamente y son clave para cambiar nuestra forma de obtener energía. Gracias a mejoras constantes, estas tecnologías se vuelven más eficientes y competitivas. Esto significa que en el futuro veremos nuevas y emocionantes formas de obtener energía.

La lucha contra estas emisiones es una meta imperativa para los gobiernos, las instituciones, los operadores y las industrias que buscan alcanzar los objetivos del Escenario de Desarrollo Sostenible. El desafío es enorme, pero necesario y posible, a condición de que todos los actores se reúnan de forma efectiva en este sentido. Al final, es un paso hacia la posibilidad de suministrar energía a nivel mundial y la reglamentación puede desempeñar un papel clave para garantizar el éxito.

De acuerdo con IRENA, 2022 (*International Renewable Energy Agency*) es necesario contar con un conjunto de políticas que abarquen todas las vías tecnológicas para alcanzar los niveles necesarios de despliegue para 2030. Por lo anterior, es importante la planeación, elaboración y ejecución de un marco normativo mundial en el que se sumen esfuerzos y necesidades de los países para una transición justa que fortalezca los flujos financieros, las capacidades y las tecnologías internacionales, y no deje a nadie atrás.

Si no se maneja con cuidado la transición hacia nuevas formas de energía, como se mencionaba antes, podríamos enfrentar problemas mucho más grandes. Esto incluye un aumento en la desigualdad social, trabajadores descontentos, posibles huelgas o disturbios, una caída en la productividad y empresas menos competitivas. Para evitar estos problemas, es crucial implementar políticas adecuadas y asegurar que la transición sea justa para todos y en todas las áreas.

Finalmente, el desafío consiste en seguir avanzando en la transición energética mientras se asegura una fuente segura de energía. El análisis se centra en cómo las estrategias de

diversificación de las empresas afectan el desarrollo de las energías renovables. Este impacto tiene al menos tres aspectos clave: aumenta la capacidad de producción, aporta tecnología nueva y reduce los costos en áreas como la energía eólica en el mar o la producción de hidrógeno verde.

6.2. Matriz energética en Colombia

6.2.1. Definición de la matriz energética

La matriz energética, se refiere a la combinación de fuentes y formas de energía que un país o una región utiliza para satisfacer sus necesidades energéticas, considerada como un subsistema del sistema energético. El sistema energético es un conjunto de componentes interrelacionados que trabajan juntos para producir, transmitir, distribuir y utilizar la energía en una región o área determinada; algunos componentes claves del sistema energético incluyen: fuentes de energía, infraestructura de generación, red de transmisión y distribución, almacenamiento de energía, consumidores, regulaciones y políticas. (Bertinat, 2016)

La importancia de la matriz energética radica en su impacto en la economía, el medio ambiente y la seguridad energética de una nación. Una matriz energética diversificada puede reducir la dependencia de un país de fuentes de energía específicas y minimizar los riesgos asociados con la volatilidad de los precios de los combustibles, la escasez de recursos y los problemas ambientales, como la emisión de gases de efecto invernadero. Además, la transición hacia una matriz más limpia y sostenible, con una mayor participación de fuentes de energía renovable, puede contribuir a la mitigación del cambio climático y la reducción de la contaminación ambiental.

6.2.1.1. Fuentes de energía

Una *fuerza de energía* es una fuente natural o artificial de la cual se puede extraer energía en diversas formas para realizar un trabajo o generar potencia. Estas fuentes de energía pueden ser utilizadas para satisfacer las necesidades humanas, como la generación de electricidad, la calefacción, la movilidad y muchas otras aplicaciones.

Las fuentes de energía pueden clasificarse en dos categorías principales: Fuente de energía primaria y fuente de energía secundaria (Crespo Martinez et al., 2003).

6.2.1.1.1. Fuentes de Energía Primaria:

Es una fuente de energía que se encuentra en su forma original como se produce naturalmente en la tierra, antes de que se transforme o se convierta en otras formas de energía para su uso humano. Dependiendo de los recursos de los que provenga pueden ser renovables y no renovables.

6.2.1.1.1.1. Fuentes de Energía No Renovable

Estas fuentes se agotan con el tiempo y no son sostenibles a largo plazo. Ejemplos de estas son el petróleo, el gas natural, el carbón y la energía nuclear. (Viloria, 2013).

- *Petróleo:* Una fuente de energía fósil consistente principalmente en hidrocarburos, que son compuestos orgánicos formados por carbono e hidrógeno. Adicionalmente, el petróleo puede incluir pequeñas cantidades de otros elementos como azufre, oxígeno, nitrógeno y metales.

El petróleo se origina a partir de la descomposición de materia orgánica, como plantas y microorganismos marinos, que se acumula en el lecho de océanos y lagos durante un largo periodo de millones de años. A medida que esta materia orgánica se somete a altas presiones y temperaturas en las profundidades del subsuelo, experimenta una transformación en petróleo crudo mediante un proceso geológico llamado catagénesis. (Díaz, 2015)

- *Gas Natural:* Es una fuente de energía fósil que se encuentra en forma de gas en yacimientos subterráneos. principalmente compuesto por metano (CH₄) en un rango del 90% al 95%, junto con otros gases como nitrógeno (N₂), etano (C₂H₆), dióxido de carbono (CO₂), butano (C₄H₁₀), propano (C₃H₈), mercaptanos y trazas de hidrocarburos más pesados.

El gas natural tiene un menor impacto ambiental en comparación con otros combustibles fósiles, ya que produce menos emisiones de dióxido de azufre (SO₂) y partículas en la atmósfera. No obstante, su quema aún emite dióxido de carbono (CO₂), un gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático, por lo que se buscan métodos para reducir estas emisiones, como la captura y almacenamiento de carbono (Díaz, 2015)

- *Carbón:* Recurso natural sólido compuesto principalmente por carbono, utilizado como una fuente de energía fósil. Se encuentra en diferentes formas, que van desde la turba, el

lignito (carbón marrón), el carbón sub-bituminoso, el carbón bituminoso (carbón negro) hasta la antracita (carbón de mayor calidad y contenido de carbono). La elección del tipo de carbón utilizado depende de su calidad y del propósito específico, como la generación de electricidad, la calefacción industrial o la producción de acero. A pesar de su importancia histórica como fuente de energía, el uso del carbón ha disminuido en algunas regiones debido a preocupaciones ambientales relacionadas con la emisión de gases de efecto invernadero. (Vega & Ramírez, 2014).

- *Energía Nuclear:* Es una forma de energía generada mediante la liberación controlada de la energía almacenada en los núcleos de átomos. Esto se logra a través de un proceso llamado fisión o fusión nuclear, que implica la división o la unión de núcleos atómicos. En la fisión nuclear, un átomo pesado como el uranio-235 se fragmenta en múltiples núcleos más pequeños, generando una gran cantidad de energía térmica. Esta energía se emplea para calentar agua y crear vapor, el cual impulsa una turbina acoplada a un generador eléctrico para producir electricidad. (Vega & Ramírez, 2014).

6.2.1.1.1.2. *Fuentes de Energía Renovable:*

Son fuentes de energía que se obtienen a partir de recursos naturales que son prácticamente inagotables a escala humana y se regeneran naturalmente. Ejemplos de estas fuentes incluyen la radiación solar que emite luz y calor, el flujo de agua en un río, la potencia del mar y su energía mareomotriz, así como la biomasa representada por la masa arbórea (Viloria, 2013).

- *Energía Solar:* La energía solar se genera a partir de la radiación proveniente del sol. Esta radiación se captura y se convierte en energía utilizable mediante dispositivos como paneles solares fotovoltaicos o colectores solares térmicos (Crespo Martínez et al., 2003). Esta energía puede ser utilizada para generar electricidad, calentar agua, proporcionar calefacción espacial y alimentar una amplia variedad de aplicaciones.
- *Energía Eólica:* Es una forma de energía que se genera mediante el aprovechamiento de la fuerza del viento. Se captura la energía cinética del movimiento del aire y se convierte en electricidad utilizando aerogeneradores o también conocidos como turbinas eólicas. (Díaz, 2015)

- *Energía Hidroeléctrica:* Es una forma de generación de electricidad que aprovecha la energía cinética y potencial del agua en movimiento, para convertirla en electricidad, lo anterior se logra con el uso de turbinas hidráulicas y generadores. (Díaz, 2015)
- *Energía Geotérmica:* Producida utilizando el calor de la Tierra, típicamente en regiones volcánicas o geotérmicamente activas. El proceso de obtención de energía geotérmica implica la perforación de pozos en la Tierra para acceder a los recursos geotérmicos. El calor subterráneo se utiliza para calentar agua o un fluido térmico, que luego se convierte en vapor. Este vapor se utiliza para girar turbinas que generan electricidad en una planta geotérmica. (Santoyo & Barragan, 2010)
- *Energía de Biomasa:* La biomasa hace referencia a cualquier sustancia de origen biológico (excluyendo los fósiles) que almacena energía química, inicialmente proporcionada por la radiación solar, y luego se convierte en energía secundaria, como calor, electricidad o combustible. A menudo, estas formas de energía se conocen como bioenergías y se derivan de biomasa en sus diferentes estados físicos: sólido, líquido o gaseoso. El origen de la biomasa ya sea de origen vegetal o animal, se divide en tres categorías: natural, que se encuentra en la naturaleza sin intervención humana; residual, que se genera como subproducto de actividades humanas como la agricultura, la ganadería y la gestión de residuos; y producida, que se refiere a cultivos específicos destinados a generar calor o servir como materia prima para la producción de combustible. (Moreno, 2021)
- *Energía de las Mareas:* Es una forma de energía renovable que se obtiene aprovechando el movimiento periódico de las mareas oceánicas debido a la atracción gravitacional de la Luna y el Sol sobre la Tierra. Este movimiento de las mareas genera flujos y reflujos del nivel del agua en zonas costeras, lo que puede ser utilizado para generar electricidad mediante dispositivos como las turbinas de mareas.

6.2.1.1.2. Fuentes de Energía Secundaria:

Estas son formas de energía derivadas de las fuentes primarias. Algunos ejemplos de estas son (ITC, 2008):

- El petróleo es una fuente de energía primaria, pero cuando se refina y se convierte en gasolina, diésel y otros productos derivados del petróleo, se convierte en una fuente de

energía secundaria utilizada para alimentar vehículos, generadores eléctricos y calefacción.

- La electricidad es una fuente de energía secundaria, ya que generalmente se produce a partir de fuentes de energía primaria como la energía solar, eólica, hidroeléctrica, térmica o nuclear antes de que se utilice en electrodomésticos, iluminación y equipos electrónicos.
- El hidrógeno se produce principalmente a partir de la reforma de gas natural o la electrólisis del agua. Aunque es un portador de energía versátil, el hidrógeno rara vez se encuentra en estado puro en la naturaleza.

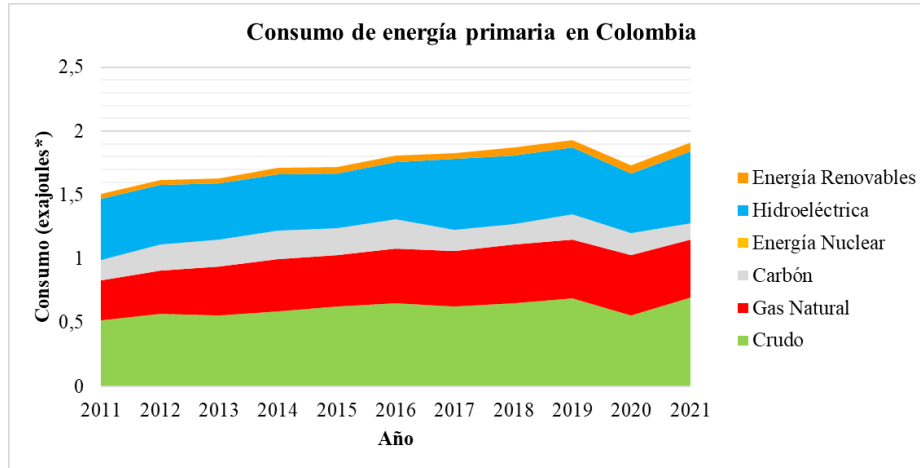
6.2.2. Composición actual de la matriz energética colombiana

La composición de la matriz energética de Colombia ha variado con el tiempo debido a cambios en la producción y el consumo de energía, así como a políticas gubernamentales y avances tecnológicos. La siguiente imagen (ver **Figura 1**), basada en datos tomados de Statistical Review of World Energy 2022 de British Petroleum (BP), trae a colación el consumo de energía primaria en Colombia desde el 2011 hasta el 2021, el cual ha experimentado un aumento constante durante este período de tiempo, se puede observar fluctuaciones en el consumo de energía en algunos años. Por ejemplo, en 2020, hubo una disminución en el consumo en comparación con el año anterior, seguido de un aumento en 2021, esta fluctuación puede estar relacionada a consecuencias de la pandemia del COVID-19, de acuerdo con estudios, en Colombia la producción eléctrica disminuyó un 16% en promedio, desde la declaración de cuarentena nacional del pasado 25 de marzo del 2020. (OLADE, 2020).

El aumento sostenido en el consumo de energía primaria plantea desafíos en términos de seguridad energética, sostenibilidad y gestión de recursos, por eso la importancia de la diversificación de la matriz energética.

Figura 1.

Consumo de energía primaria en Colombia

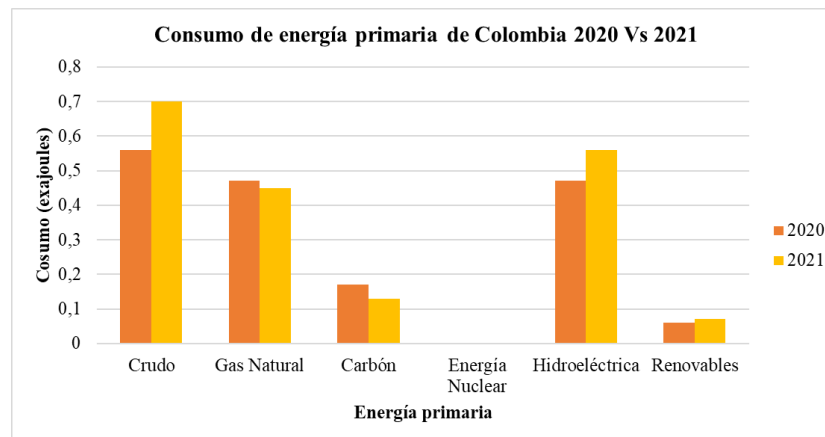


Nota: Elaboración propia a partir de datos de BP. (2022). Statistical Review of World Energy 2022. Recuperado de: <https://acortar.link/dbQlwm>. Un exajoule (EJ) es una unidad de medida de energía en el Sistema Internacional de Unidades (SI). Un exajoule es igual a 10^{18} joules

Comparando el consumo de energía primaria de Colombia entre el 2020 Vs 2021, de acuerdo con el último informe de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) referente al año 2021, la demanda de energía aumento en un 11,1%. Los energéticos que presentaron mayor aumento entre el 2020 y 2021 fueron: los combustibles líquidos con un 32,9%, energía eléctrica un 8,0%, carbón y coque un 6,9%.

Figura 2.

Consumo de energía primaria de Colombia 2020 vs 2021

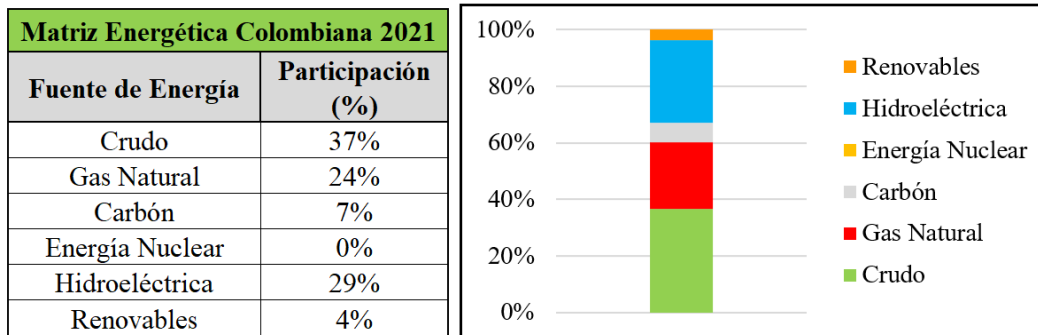


Nota: Elaboración propia a partir de datos de BP. (2022). Statistical Review of World Energy 2022. Recuperado de: <https://acortar.link/dbQlwm>

Es importante destacar que los cálculos proporcionados por BP y la UPME muestran algunas diferencias menores en cuanto al porcentaje de participación de cada fuente de energía, pero al mismo tiempo coinciden en cuanto a cómo se distribuyen las fuentes de energía en la matriz energética del país.

Figura 3.

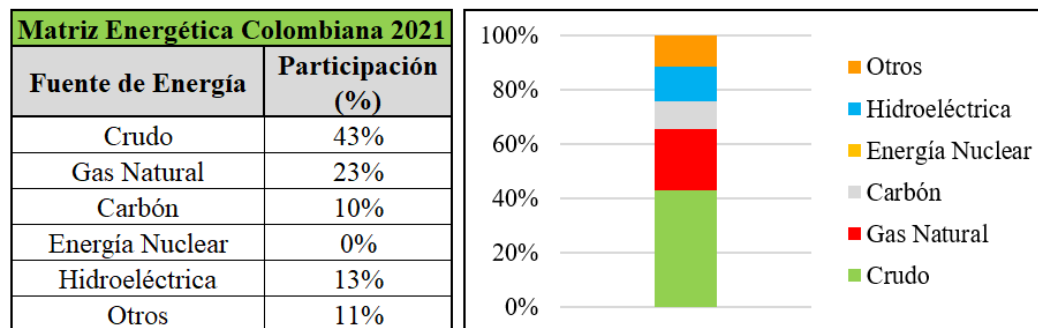
Matriz energética Colombia 2021 de acuerdo con BP



Nota: Elaboración propia a partir de datos de BP. (2022). Statistical Review of World Energy 2022. Recuperado de: <https://acortar.link/dbQlwm>

Figura 4.

Matriz energética Colombia 2021 de acuerdo con el UPME



Nota: Elaboración propia a partir de datos del balance energético colombiano UPME.

La matriz energética colombiana actual (2021), evidencia una dependencia significativa de los combustibles fósiles (Crudo y gas natural), adicional es de tener en cuenta el potencial de la energía hidroeléctrica la cual constituye una parte importante de la matriz energética, esto

sugiere que Colombia ha aprovechado su geografía montañosa y rica en recursos hídricos para generar energía renovable y limpia.

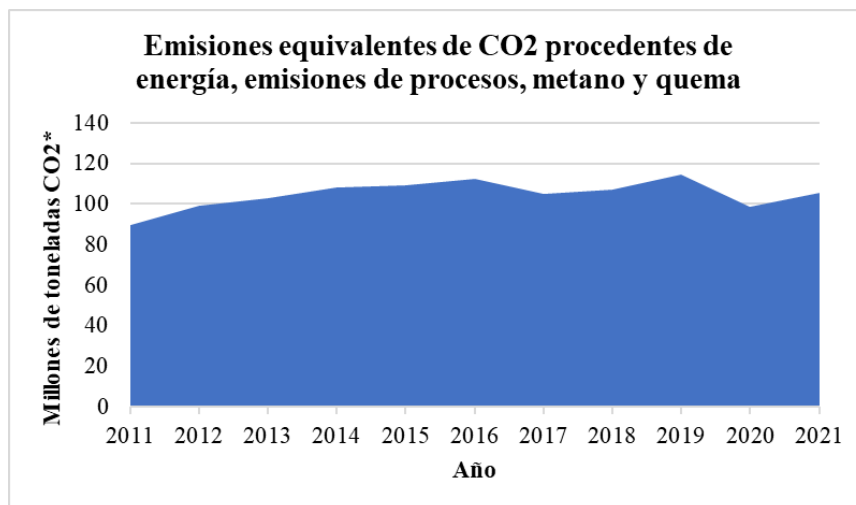
6.2.3. Impactos ambientales y sociales de la matriz energética colombiana

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) están estrechamente relacionadas con la matriz energética de un país, ya que la forma en que se genera distribuye y consume la energía tiene un impacto significativo en las emisiones totales de GEI. De acuerdo con la matriz actual colombiana, se evidencia que las emisiones de GEI tienen una tendencia de aumento desde 2011 hasta 2019 (Ver **Figura 5**). Este período muestra un aumento constante en las emisiones, pasando de 89,4 millones de toneladas en 2011 a 114,4 millones de toneladas en 2019. Sin embargo, a partir de 2020, se observa una disminución en las emisiones, con una cifra de 98,7 millones de toneladas, seguida de un aumento nuevamente en 2021, con 105,4 millones de toneladas. Estas fluctuaciones pueden deberse a factores económicos, políticos y ambientales, como la pandemia de COVID-19 y las políticas de mitigación del cambio climático.

A pesar de las fluctuaciones, las emisiones de dióxido de carbono equivalente siguen siendo significativamente altas en 2021. Esto subraya la necesidad de un enfoque sostenible y a largo plazo para abordar las emisiones de GEI y mitigar el cambio climático.

Figura 5.

Emisiones de CO2 procedentes de energía, emisiones de procesos, metano y quema



Nota: Elaboración propia a partir de datos de BP. (2022). Statistical Review of World Energy 2022. Recuperado de: <https://acortar.link/dbQlwm>. CO2: Dióxido de carbono, El CO2 es uno de los gases de efecto invernadero más importantes.

6.3. Hidrógeno

6.3.1. Propiedades y características del hidrógeno

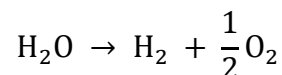
Es un hecho que el hidrógeno es el primer elemento que encontramos en la tabla periódica, así como el elemento más abundante e inflamable en la naturaleza, se caracteriza por tener una masa de 1,00797 g/mol y ser inodoro e incoloro (Ecosmep, 2011).

De igual forma, comparte características con los hidrocarburos gaseosos (principalmente metano) que usamos actualmente como fuente de energía para muchas industrias al ser un gas comprimible e inflamable, con la principal diferencia que su combustión genera vapor de agua a diferencia de los hidrocarburos que generan agentes contaminantes como el dióxido de carbono y vapor de agua.

Siendo así, existen distintos tipos de hidrógeno dependiendo de su fuente, así (Aldana Rivera & León Peñuela, 2022):

- Hidrógeno Gris: Gas natural o petróleo sin captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS)
- Hidrógeno Azul: Gas natural o petróleo con captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS)
- Hidrógeno Verde: Energías Renovables
- Hidrógeno Blanco: Naturaleza
- Hidrógeno Rosa: Energía Nuclear
- Hidrógeno Amarillo: Fuentes mixtas de energía
- Hidrógeno Turquesa: Pirólisis del gas natural (residuo carbón sólido)
- Hidrógeno Marrón: Carbón Lignito
- Hidrógeno Negro: Carbón bituminoso o hulla
- Hidrógeno Dorado: Amoníaco, biogás

De las tecnologías anteriormente mencionadas, se destaca el hidrógeno verde al ser el único que no emite agentes contaminantes y puede llegar a considerarse la energía del futuro. Su proceso se lleva a cabo a través de la electrolisis del agua donde se induce una corriente eléctrica en el agua reaccionando de la siguiente forma (Chi & Yu, 2018):



De dicha reacción se obtiene un hidrógeno de alta pureza de cerca del 99,9% (Chi & Yu, 2018) el cual debe ser capturado y almacenado, por estar en estado gaseoso, para luego ser aprovechado.

6.3.2. Aplicaciones del hidrógeno

Adicional a los usos del hidrógeno en la industria química y petroquímica para la producción de amoníaco (51%) y procesos de hidrocrqueo e hidrotreatmento (31%), el hidrógeno se convierte en realidad en un medio de almacenamiento de energía y no una fuente, exceptuando el hidrógeno blanco, pues su producción proviene de otras fuentes de energía como las energías renovables, los hidrocarburos y la energía nuclear (Castiblanco & Cárdenas, 2020).

En cuanto al uso en vehículos, existen las celdas de hidrógeno y los motores de combustión interna con hidrógeno, las cuales el producto final o residual será el agua (vapor), haciéndolas ambientalmente sostenibles. A pesar de ello, existe solo la dificultad de ampliar las estaciones de servicio de hidrógeno para masificar el uso de estos vehículos (Castiblanco & Cárdenas, 2020).

Por otra parte, se ha extendido la idea de usar el hidrógeno en las diferentes aplicaciones que tiene el gas natural, al ser inyectado en concentraciones bajas en los gasoductos existentes, siendo así, podría usarse en termoeléctricas y uso doméstico como estufas y calefactores (Castiblanco & Cárdenas, 2020).

Ahora, ¿qué ventaja tiene el hidrógeno si su principal fuente proviene de energías contaminantes?, teniendo en cuenta que el hidrógeno gris es la principal fuente a nivel mundial, emitiendo grandes cantidades de carbono a la atmosfera, existe la ventaja de poder captar todo este gas contaminante y disponerlo de otras formas (captura y utilización de carbono CCUS) en lugar de ser emitido por cada uno de los consumidores (vehículos, industrias, entre otros), convirtiéndolo en hidrógeno azul.

Finalmente, en cuanto al uso del hidrógeno como un medio de almacenamiento de energía Marchenko y Solomin (2015) concluyen en su comparativo que en el almacenamiento de energía a corto plazo (50 a 110 horas) es preferible usar la energía eléctrica mientras que para largos periodos de tiempo el hidrógeno sería el ideal, siendo así, podrían coexistir en un futuro próximo.

6.3.3. Políticas y regulaciones del hidrógeno

6.3.3.1. Colombia

Para entender las políticas y regulaciones del hidrógeno en la matriz energética del país se debe tener como referencia la ley 1715 de 2014, donde se promueve el desarrollo, uso y almacenamiento de las energías renovables. Donde, a pesar de no contar con una hoja de ruta concreta como otras fuentes de energía (solar, eólica, geotérmica), si se mencionan los principales tipos de hidrógeno a desarrollar en los próximos años en el país (Verde, Azul, Blanco), adicionados a partir de la ley 2099 de 2021 (Verde y Azul), con la modernización de la legislación vigente referente a la transición energética del país, y la ley 2294 de 2023 (Verde y Blanco) referente al Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026.

A partir de lo anterior, la ley 2099 de 2021 al modernizar la legislación vigente referente a la transición energética del país y adicionar al hidrógeno verde y azul a la ley 1715 de 2014; establece la “deducción en el impuesto de renta, exclusión de IVA, exención de aranceles y depreciación acelerada [...] El Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía - FENOGE podrá financiar y/o ejecutar proyectos” (Ley 2099 de 2021, art. 21) referentes al hidrógeno y el “apoyo a la investigación, desarrollo e innovación” (Ley 2099 de 2021, art. 23) del mismo; lo cual aplica a las demás fuentes de energía no convencionales (solar, eólica, geotérmica). Adicionalmente se establece que “ el Gobierno Nacional definirá los mecanismos y metodologías de medición y verificación objetivas y transparentes que garanticen que las actividades [...] así como toda tecnología de captura utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) [...] tengan un balance cero emisiones netas” (Ley 2099 de 2021, art. 57).

Por otra parte, se encuentra la ley 2169 de 2021, la cual impulsa la disminución de emisiones de carbono a través de metas y medidas mínimas, como continuidad a los compromisos internacionales adquiridos. Uno de los puntos importantes es el fomento de flotas completas de vehículos eléctricos y/o de hidrógeno, pues se establece que quedan eximidas de los artículos 13, 14, 15 y 16 de la ley 2128 de 2021, los cuales establecen que a través de programas y políticas públicas se debe llegar a la meta de que el 30% de los vehículos de transporte público de pasajeros, particular, de carga y especial deberán trabajar con gas combustible (adicional al gas natural se incluye el hidrógeno); en caso de aumentar su flota o cuando requieran ser reemplazados, a término de 1 año una vez entrada en vigencia la ley.

Finalmente, uno de los decretos más importantes y recientes referentes al uso del hidrógeno en la matriz energética del país es el decreto 1476 de 2022, el cual adiciona las condiciones y lineamientos generales sobre el hidrógeno al decreto 1073 de 2015, que contiene el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía. Dichos lineamientos comprometen a gran parte de los ministerios (Ambiente y Desarrollo Sostenible; Transporte; Minas y Energía; Comercio, Industria y Turismo; Ciencia, Tecnología e Innovación) a fomentar políticas públicas que faciliten el desarrollo del hidrógeno en el país; entre ellas se destaca la regulación del uso de formaciones geológicas para almacenamiento de hidrógeno, la importación de autopartes y repuestos para los vehículos propulsados con hidrógeno, y la flexibilidad (proyectos sandbox) en la duración de proyectos relacionados con hidrógeno, ya que son proyectos experimentales en el país.

6.3.3.2. *En el Mundo (Estados Unidos, China y Chile)*

El hidrógeno como medio de almacenamiento de energía ha tomado un papel protagónico al igual que las fuentes de energía renovable como la solar y eólica (principales fuentes para la producción de hidrógeno verde) a tal punto de desarrollar grandes proyectos a nivel mundial y al alcance de países en vía de desarrollo como es el caso de Chile. Siendo así, se expondrán políticas públicas para el desarrollo del hidrógeno en Estados Unidos (mayor acción política), China (mayor productor) y Chile (país latinoamericano).

6.3.3.2.1. *Estados Unidos*

Actualmente Estados Unidos ha centrado sus esfuerzos en la producción de hidrógeno gris, azul y verde; y aunque su producción (8,55 millones de toneladas por año “MTPA” de hidrógeno gris, 0,25 MTPA de hidrógeno azul y 0,2 MTPA de hidrógeno verde) no es mayor frente a grandes productores como China (33 MTPA), si poseen la mayor capacidad de almacenamiento para gases de efecto invernadero con cerca de 3.000 gigatoneladas (CMS Law Tax Future, 2021).

En cuanto a la legislación, una de las principales leyes regulatorias y promotoras del hidrógeno en Estados Unidos es la Ley de Política Energética (la “EPA”) (2005), la cual en el título VIII compromete a otros sectores públicos y busca disminuir la dependencia del petróleo del país, a través de políticas públicas y financiación de proyectos que estrechen relaciones con

sectores privados e instituciones de educación superior para la inversión e investigación en temas referentes al hidrógeno.

Por otra parte, se destaca el crédito fiscal 45Q de 2020, el cual otorgaba un crédito fiscal por tonelada de dióxido de carbono capturada y almacenada, para el pago de impuestos (CMS Law Tax Future, 2021). Dicho crédito fue implementado y mejorado en la ley de reducción de la inflación (IRA) (2022), al pasar de 50 a 80 dólares de crédito fiscal por tonelada de dióxido de carbono capturada y almacenada.

Finalmente, cada estado de los Estados Unidos cuenta con sus propias leyes regulatorias, entre los que se destacan California y Texas con leyes como el Plan de Promoción de Vehículos de Cero Emisiones (ZEV) y el Programa de Flotas Limpias de Texas (TCFP), los cuales tienen como principal objetivo renovar el parque automotor con vehículos eléctricos o que funcionen con hidrógeno. Siendo así, se destacan empresas privadas como Shell (una de las grandes empresas petroleras del mundo) la cual está entregando estaciones de servicio de hidrógeno junto con el apoyo de otras grandes empresas como Toyota y Honda (CMS Law Tax Future, 2021).

6.3.3.2.2. *China*

En la actualidad China es el mayor productor de hidrógeno del mundo con cerca de 33 MTPA (principalmente hidrógeno gris) para el 2020, lo que significa un 30% de la producción mundial (IEA, 2022), aun así, su política regulatoria ha sido menor a la de países como Estados Unidos y Reino Unido (CMS Law Tax Future, 2021).

Por otra parte, la legislación China tiene características similares a las de Estados Unidos, pues las políticas locales (estados y provincias) normalmente son pilotos que se acomodan a la nueva industria del hidrógeno. Aun así, existen políticas gubernamentales como el 13.º Plan Quinquenal Estratégico Nacional de Desarrollo de Industrias Emergentes de 2016, que junto con el 14.º Plan Quinquenal para el Desarrollo Económico y Social Nacional y los objetivos a largo plazo hasta el año 2035 para la República Popular China de 2021, promueven por primera vez todo el tema referente al hidrógeno (producción, almacenamiento, vehículos, estaciones de servicio). Asimismo, el Informe de Labor Gubernamental del Consejo de Estado de 2019 incluye por primera vez al hidrógeno como energía, dándole una gran importancia en el país para su desarrollo (CMS Law Tax Future, 2021).

En cuanto al transporte, la construcción y licencias de estaciones de servicio cambia de acuerdo con las regulaciones locales, un ejemplo es Shanghái donde es controlado por el

Departamento de Desarrollo Urbano-Rural de Vivienda, mientras que en Dalian es la Comisión de Reforma y Desarrollo Municipal (CMS Law Tax Future, 2021).

Finalmente, en cuanto a subsidios y privilegios, se fomenta la inversión extranjera a través de exención de impuestos o derechos de seguridad sobre la tierra. Mientras que, para 2020, el Ministerio de Finanzas, el Ministerio de Industria y Tecnología de la Información, el Ministerio de Ciencia y Tecnología y la Comisión de Desarrollo y Reforma anunciaron conjuntamente subsidios de compra de vehículos con pilas de combustible de hidrógeno (FCV) que otorgan recompensas por compensación a las ciudades en las que se matriculan (CMS Law Tax Future, 2021).

6.3.3.2.3. *Chile*

Al igual que los grandes productores de hidrógeno del mundo, la producción de hidrógeno en Chile se centra en el hidrógeno gris, con una pequeña participación del hidrógeno verde a través de energía eólica, y llega a cerca de las 58.500 toneladas por año (CMS Law Tax Future, 2021).

En cuanto a la legislación nacional, se destaca la estrategia nacional de hidrógeno verde de 2020, en la cual, según sus propios estudios, se estima que Chile puede llegar a producir el hidrógeno verde más barato del mundo. Asimismo, se divide en 3 grandes fases (CMS Law Tax Future, 2021):

- *De 2020 a 2025:* Acelerar el despliegue del hidrógeno y la cadena de suministro a través de incentivos a 6 grandes productores y consumidores como las refinerías de petróleo, productores de amoníaco, camiones de transporte minero, camiones pesados, autobuses de largo alcance y la mezcla en redes de gas (inyección de hidrógeno en redes de gas existentes).
- *De 2025 a 2030 en adelante:* Exportación del hidrógeno.
- *Tercera fase:* Líder global en la producción de hidrógeno con enfoque en el uso de amoníaco en la industria naval y combustibles sintéticos en la aviación.

Por otra parte, el gobierno se compromete a ser flexible en la regulación de la industria mientras se acomodan inversores y nuevos proyectos en el país, establecer una mesa público-privada para establecer impuestos al carbono, establecer un equipo operativo para facilitar la

solicitud de permisos y realizar rondas de financiamiento de hasta \$50 MUSD para apoyar proyectos seleccionados de hidrógeno verde (CMS Law Tax Future, 2021).

En cuanto a la regulación en el transporte y almacenamiento del hidrógeno, existe el decreto supremo N° 43, el cual establece distancias de seguridad y capacidad máxima de almacenamiento, con el dato de que los combustibles líquidos y gaseosos, utilizados como recursos energéticos deben ser regulados por el Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción. De igual forma el Decreto Supremo N° 298 y la Resolución N° 96, regulan el transporte de cargas peligrosas en calles (camino) y zonas portuarias, las cuales indirectamente regularían al hidrógeno.

Finalmente, a pesar de lo mencionado anteriormente, el marco regulatorio del hidrógeno en Chile sigue siendo insuficiente, por tal razón en 2020, el Ministerio de Energía de Chile estableció con la Pontificia Universidad Católica de Chile el desarrollo de un eventual marco regulatorio referente al hidrógeno (CMS Law Tax Future, 2021).

7. METODOLOGÍA

7.1. Primer Nivel

7.1.1. Enfoque, alcance y diseño de la investigación

Con el fin de abordar el problema de investigación sobre el estado actual de Colombia en relación con el desarrollo del hidrógeno en el proceso de transición energética, se llevará a cabo un estudio descriptivo basado en la recopilación y análisis de información cualitativa. Esto implica la revisión exhaustiva de documentos, políticas gubernamentales e informes de expertos en el campo de la energía. El enfoque cualitativo permitiría una comprensión profunda de diferentes factores como beneficios, impactos, riesgos, desafíos y oportunidades relacionados con el hidrógeno en Colombia. Los hallazgos cualitativos se utilizarán para narrar y describir detalladamente la situación actual del hidrógeno en el contexto de la transición energética colombiana, brindando una visión completa y contextualizada de la situación.

Finalmente, la metodología que se presenta a través de la investigación planteada se enfocó en determinar artículos con criterios generales basados en las fuentes de energía mencionadas en la Matriz energética colombiana.

7.1.2. Definición de Variables

7.1.2.1. *Beneficios e Impactos*

Las variables definidas *Fuente de energía, impacto, beneficio, Contribuye al objetivo de disminución de Gases de Efecto Invernadero (GEI) al 2050 y finalmente los Impactos y beneficios asociados Acuerdo de París*; todos ellos se seleccionaron con el fin de evaluar los beneficios e impactos que se describen en cada uno de los artículos consultados en comparación en la transición energética, comparándolo con las fuentes de energía actuales de la matriz energética

- *Fuente de energía*: Se identifican cualquier recurso natural que proporcione la capacidad de generar y que este acorde con las que hoy en día con la transición energética y en el Acuerdo de París, como pueden ser:
 1. Energía solar: Utilización de la radiación solar para generar electricidad a través de paneles solares.

2. Energía eólica: Aprovechamiento del viento para producir electricidad mediante aerogeneradores.
 3. Energía hidroeléctrica: Generación de electricidad a partir de la fuerza del agua en presas o corrientes fluviales.
 4. Energía geotérmica: Aprovechamiento del calor proveniente del interior de la Tierra para generar electricidad o calefacción.
 5. Energía de biomasa: Utilización de materia orgánica, como residuos agrícolas o forestales, para producir calor o electricidad.
 6. Energía marina: Aprovechamiento de las mareas, corrientes oceánicas y el calor del agua para generar electricidad.
- *Impacto:* En el contexto de evaluar los impactos de las diferentes fuentes de transición energética, el término "impacto" se refiere a los efectos o consecuencias que dichas fuentes tienen en diversos aspectos, como el medio ambiente, la economía, la sociedad y la salud. Implica analizar y evaluar tanto los impactos positivos como los negativos que pueden surgir como resultado de la adopción y uso de estas fuentes de energía renovable en comparación con las fuentes de energía convencionales.
 - *Beneficio:* En ese mismo contexto, los beneficios se refieren a las ventajas o resultados positivos que se obtienen al utilizar las fuentes de energía en la transición energética. Estos beneficios pueden incluir la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles, la creación de empleo en el sector de energías renovables, la promoción del desarrollo sostenible y la mejora de la calidad del aire y del medio ambiente en general.
 - *Contribuye al objetivo de disminución GEI al 2050:* La contribución al objetivo de la disminución de los gases de efecto invernadero a 2050 con cada una de estas fuentes de energía se refiere al papel que desempeñan en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero para cumplir con los objetivos establecidos en el Acuerdo de París.
 - *Impactos y beneficios asociados Acuerdo de París:* Los impactos asociados al Acuerdo de París y la transición energética se refieren a los efectos que tienen en términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, mitigación del cambio climático, adaptación a los impactos del cambio climático y promoción del desarrollo sostenible. Los beneficios están relacionados con la protección del medio ambiente, la salud pública,

la creación de empleo en el sector de energías renovables, la seguridad energética y la promoción de una economía baja en carbono, por tal motivo se evalúa que para cada artículo se refleje el Acuerdo de París.

7.1.2.2. Riesgos y Desafíos

Las variables definidas (*Tipos de Hidrógeno, Técnicos, Económicos, Regulatorios, Sociales, Ambientales y Eficiencia Energética*) se seleccionaron debido a su relevancia en la evaluación y la toma de decisiones relacionadas con la implementación del hidrógeno como fuente de energía alternativa de la matriz energética colombiana en medio de la transición energética.

- *Tipos de Hidrógeno:* Identificación de los diferentes tipos de hidrógeno (*verde, azul, gris*) en cuanto a sus fuentes de producción y características ambientales y económicas.
- *Aspectos Técnicos:* La factibilidad técnica es fundamental, ya que se refiere a la capacidad de producir, almacenar y utilizar hidrógeno de manera eficiente y segura. Medible con la identificación de los diferentes procesos de producción, almacenamiento y conversión del hidrógeno, identificando posibles desafíos técnicos.
- *Aspectos Económicos:* Importante identificar los riesgos financieros que puede conllevar la viabilidad de los proyectos de hidrógeno. Identificando los costos, que incluyen costos de inversión, operativos y de mantenimiento de la producción/almacenamiento/transporte de hidrógeno.
- *Aspectos Políticos:* Las regulaciones y políticas gubernamentales tienen un impacto significativo en la viabilidad de los proyectos de hidrógeno. Se pueden medir mediante un análisis del marco regulatorio existente y futuro, identificando cualquier obstáculo o requisito para la implementación.
- *Aspectos Sociales:* La aceptación pública y la percepción social son críticas para el éxito de cualquier proyecto energético. Identificar las tendencias en la sociedad.
- *Aspectos Ambientales:* El impacto ambiental es un aspecto clave, ya que el hidrógeno se promueve como una fuente de energía más limpia. Medible mediante porcentajes de emisiones de GEI.

- *Eficiencia Energética*: La eficiencia energética se refiere a cuánta energía se obtiene del hidrógeno en comparación con la energía invertida en su producción y uso. Medible con la comparación de eficiencia de energía de los diferentes tipos de hidrógeno.

En conjunto, estas variables permiten una evaluación holística de los riesgos y desafíos de la implementación del hidrógeno durante la transición energética.

7.1.2.3. Políticas y Regulaciones

Las variables definidas (*Tipos de Hidrógeno a Desarrollar, Exención de impuestos, Fondo de financiamiento y ejecución de proyectos, Apoyo a la investigación, Vigilancia de actividades y CCUS, Disminución de emisiones de carbono, Fomento de vehículos a gas natural, eléctricos y/o con hidrógeno, Políticas y compromiso de los ministerios a fomentar el uso del hidrógeno, Estaciones de servicio, Flexibilidad en los proyectos “sandbox”*) se seleccionaron debido a su relevancia en la regulación gubernamental del hidrógeno implementadas en los 4 países estudiados (*Colombia, Estados Unidos, China y Chile*).

- *Tipos de hidrógeno a desarrollar*: Tipo de hidrógeno al cual van encaminadas las políticas y regulaciones del país. Medible con la cantidad de tipos de hidrógeno a desarrollar en el país.
- *Exención de impuestos*: Beneficios económicos facilitados por el gobierno en la industria del hidrógeno. Medible con las políticas implementadas en cada país encaminadas a esta variable.
- *Fondo de financiamiento y ejecución de proyectos*: Ente gubernamental encargado del financiamiento y ejecución de proyectos encaminados al hidrógeno. Medible con la cantidad de dinero y entes creados para a estos proyectos.
- *Apoyo a la investigación*: Apoyo de todo tipo facilitado por el gobierno a los proyectos de investigación enfocados en el hidrógeno. Medible con la cantidad de dinero y acciones destinadas a estos proyectos.
- *Vigilancia de actividades y CCUS*: Intención del gobierno de vigilar las actividades referentes al hidrógeno y la captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS). Medible con los entes creados para tal fin.

- *Disminución de emisiones de carbono*: Metas y medidas encaminadas a la disminución de emisiones de carbono. Medible con las metas gubernamentales enfocadas a la disminución de emisiones de carbono.
- *Fomento de vehículos a gas natural, eléctricos y/o con hidrógeno*: Beneficios económicos facilitados por el gobierno a la industria automotriz a base de gas natural, electricidad y/o con hidrógeno. Medible con las políticas enfocadas al fomento de estos vehículos.
- *Políticas y compromiso de los ministerios a fomentar el uso del hidrógeno*: Compromiso de los ministerios públicos de promover el uso del hidrógeno en el país a través de la política nacional. Medible en las políticas que son responsabilidad de cada ministerio para el fomento del hidrógeno en el país.
- *Estaciones de servicio de hidrógeno*: Fomento en la distribución del hidrógeno en estaciones de servicio para su uso en vehículos. Medible con la financiación y políticas de estos proyectos.
- *Flexibilidad en los proyectos “sandbox”*: Disminución de regulaciones en los proyectos de generación de hidrógeno, con el fin de facilitar su desarrollo. Medible con las políticas implementadas en cada país enfocadas a esta variable.

7.1.3. Población y Muestra

7.1.3.1. Beneficios e Impactos

Para definir la población y la muestra en este estudio, se consideraron las siguientes variables: *Fuente de energía, impacto, beneficio, Contribuye al objetivo de disminución de Gases de Efecto Invernadero (GEI) al 2050 y finalmente los Impactos y beneficios asociados Acuerdo de Paris*. Para definir la población y muestra para evaluar los impactos y beneficios en la transición energética, es importante indicar que dentro del alcance del estudio y los criterios utilizados para seleccionar la población de interés se tuvo en cuenta un máximo de 50 artículos/paper los cuales se consideraron de alta importancia para una evaluación integral de la información. Esto puede incluir características demográficas, geográficas o sectoriales relevantes para el tema de la transición energética.

Tabla 1.

Bibliografía para evaluar las variables de Impactos y Beneficios

Artículo / Investigación	Bibliografía	Fuente de Energía	Impacto	Beneficio	Contribuye al objetivo de disminución GEI al 2050?	¿Impactos y beneficios asociados Acuerdo de París?
Perspectivas de la transición energética mundial: camino de 1,5 °C	IRENA. 2022 (International Renewable Energy Agency)	Electrificación, Eficiencia energética, Hidrógeno verde	Tecnológico	Desarrollo de nuevos productos	Sí (1.5 °C)	Sí
			Político	Implementación de regulaciones		Sí
			Socioeconomio	modernización y ampliación de infraestructura		Sí
El Acuerdo de París	UNFCCC. (s.f.)	Sin especificar	Economico	Asistencia financiera	Sí (1.5 °C)	Sí
			Tecnológico	Desarrollo y transferencia		Sí
			Ambiental	planificación y desarrollo		Sí
			Político	Marco de transparencia mejorado		Sí
Plan Energético Nacional 2020-2050.	UPME. (s.f.)	Hidrocarburo, eléctrica, solar y eólica	Ambiental	Sustitución de combustibles	Sí (1.5 °C)	Sí
			Político	Nuevos negocios		Sí
			Economico	Desarrollo de nuevos productos		Sí
			Social	Formación de capital humano		Sí
			Tecnológico	Inversiones		Sí
			Fin de la autosuficiencia energética	Cobertura en calidad y servicio		Sí
La transición energética.	Linares Llamas, P. (2018).	Fuentes de energía transversales	Social	Energía limpia y asequible para todos.	Sí (2°C)	Sí
				Modelo que contribuya al bienestar de la humanidad		Sí
			Socioeconomio	Energía limpia y accesible		Sí
			Tecnológico	Tecnologías renovables competitivas.		Sí
			Político-Ambiental	Fiscalidad ambiental que internalice los costes externos de las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos		Sí
			Ambiental	marco regulatorio en el que se den las señales para que ahorren energía		Sí
Hoja de Ruta del hidrogeno en Colombia	Ministerio de Minas y Energía (s.f.).	Hidrogeno	Ambiental	Reemplazo de uso de combustibles y materias primas de origen fósil en las industrias	Sí (2°C)	Sí
				Diversidad y disponibilidad de recursos naturales que cubren sus necesidades energéticas		Sí
			Político	Marco regulatorio y político estable.		Sí
			Político	Marco regulatorio y político estable.		Sí
Energías renovables	Viloría, J. R. (2013).	Petrole, Carbón, gas natural electricidad	Político	Marco regulatorio y político estable.	Sí (2°C)	Sí
			Economico	Insuficiente y costoso le procese de transición		Sí
			Socio ambiental	Moderación en el consumo de energía		Sí

Nota: Elaboración propia, recopilación de información bibliográfica

7.1.3.2. Riesgos y Desafíos

Para definir la población y la muestra en este estudio, se consideraron las siguientes variables: *Tipos de Hidrógeno, Técnicos, Económicos, Regulatorios, Sociales, Ambientales y Eficiencia Energética*. La población de interés comprende todos los artículos relacionados con el uso del hidrógeno como fuente de energía alternativa en Colombia, publicados en fuentes académicas y científicas. En este caso, se identificó más de 50 artículos disponibles, pero solo 8 de ellos se consideraron representativos y relevantes para el estudio, ya que abordan de manera adecuada las variables de interés. La selección de estos 8 artículos se llevó a cabo mediante un proceso de muestreo selectivo basado en la adecuación de su contenido a los aspectos claves que se desean analizar. Este enfoque se eligió para asegurar que la muestra sea representativa y proporcione información significativa para el análisis.

Tabla 2.

Bibliografía para evaluar las variables de Riesgos y Desafíos

Artículo / Investigación	Bibliografía	Tipos De Hidrógeno	Técnicos	Económicos	Regulatorios	Sociales	Ambientales	Eficiencia energética
Hidrógeno en Colombia Si se hace mal, podría ser peor.	(Aldana & Leon, 2022)	Si	R/D	D	D		R/D	Si
Producción de hidrógeno y su perspectiva en Colombia: una revisión. Gestión y Ambiente	(Castiblanco & Cárdenas, 2020)		D					Si
Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia	(Ministerio de minas y Energía, s.f.)	Si	D					
Environmental impacts associated with hydrogen production in La Guajira, Colombia.	(Ullman, A. N. & Kittner, N.,2022)		R/D			R/D	R/D	Si
Techno-economic analysis of biomass-to-hydrogen process in comparison with coal-to-hydrogen process.	(Yinglong Wang, Guoxuan Li, Zhiqiang Liu, Peizhe Cui, Zhaoyou Zhu, Sheng Yang, 2019).		D	D			D	Si
Hidrógeno verde en América Latina. Posibilidades, barreras y oportunidades.	(Schneider, 2021)			R/D	R/D	R/D	R	
Green Hydrogen: A guide to policy making, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi	(IRENA, 2020)			D	R/D		D	Si
Recomendaciones para el desarrollo de la economía del hidrógeno en Colombia. Una estrategia nacional de hidrógeno.	(Cobo, M. I., Barraza, C. L., Cantillo, N. M. & Uribe, M. Á.,2022)	Si	D	D	R/D		D	

Nota: Elaboración propia, recopilación de información bibliográfica

7.1.3.3. Políticas y Regulaciones

Para el análisis de las políticas y regulaciones a nivel mundial enfocadas en la regulación del hidrógeno es necesario definir las características de la población y muestra seleccionada. Inicialmente su característica principal es que son leyes, decretos y análisis de estos, por parte de firmas de abogados internacionales (en este caso CMS Law Tax Future).

Tabla 3.

Bibliografía para evaluar las variables de Políticas y Regulaciones (1/2)

Contenido	Bibliografía	País	Tipos de Hidrógeno a Desarrollar	Exención de impuestos	Fondo de financiamiento y ejecución de proyectos	Apoyo a la investigación	Vigilancia de actividades y CCUS
Disposiciones para la transición energética y la dinamización del mercado energético	Ley 2099 de 2021	Colombia	X	X	X	X	X
Impulsa el desarrollo bajo carbono del país mediante el establecimiento de las metas y medidas mínimas	Ley 2169 de 2021	Colombia					
Integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional	Ley 1715 de 2014	Colombia	X				
Plan nacional de desarrollo 2022- 2026	Ley 2294 de 2023	Colombia	X				
Promueve el abastecimiento, continuidad, confiabilidad y cobertura del gas combustible en el país	Ley 2128 de 2021	Colombia					
Promueve la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno	Decreto 1476 de 2022	Colombia				X	
Ley de política energética EPA	Ley de Política Energética de 2005	EEUU				X	
Ley de reducción de la inflación IRA	Ley de Reducción de la Inflación de 2022	EEUU		X			
Regulación del Hidrógeno en el mundo	CMS Law Tax Future, 2021	EEUU	X	X		X	
		China	X	X			
		Chile	X	X	X	X	

Nota. Elaboración propia, recopilación de información bibliográfica

Adicional a Colombia, se expondrán políticas públicas para el desarrollo del hidrógeno en Estados Unidos, por tener la mayor acción política en el tema; China, por ser el mayor productor de hidrógeno a nivel mundial; y Chile, por ser un país en el mismo contexto colombiano (Latinoamérica).

Por otra parte, la población es limitada debido a que las políticas públicas referentes al hidrógeno son recientes y reducidas; en cualquiera de los casos (Colombia, EEUU, China y Chile). Siendo así, la muestra de 9 referencias (**Tabla 3** y **Tabla 4**) contiene gran parte de la población, por no decir toda.

Tabla 4.

Bibliografía para evaluar las variables de Políticas y Regulaciones (2/2)

Contenido	Bibliografía	País	Disminución de emisiones de carbono	Fomento de vehículos a gas natural, eléctricos y/o con hidrógeno	Políticas y compromiso de los ministerios a fomentar el uso del hidrógeno	Estaciones de servicio	Flexibilidad en los proyectos "sandbox"
Disposiciones para la transición energética y la dinamización del mercado energético	Ley 2099 de 2021	Colombia		X			
Impulsa el desarrollo bajo carbono del país mediante el establecimiento de las metas y medidas mínimas	Ley 2169 de 2021	Colombia	X	X			
Integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional	Ley 1715 de 2014	Colombia					
Plan nacional de desarrollo 2022- 2026	Ley 2294 de 2023	Colombia					
Promueve el abastecimiento, continuidad, confiabilidad y cobertura del gas combustible en el país	Ley 2128 de 2021	Colombia		X			
Promueve la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno	Decreto 1476 de 2022	Colombia			X		X
Ley de política energética EPA	Ley de Política Energética de 2005	EEUU			X		
Ley de reducción de la inflación IRA	Ley de Reducción de la Inflación de 2022	EEUU					
Regulación del Hidrógeno en el mundo	CMS Law Tax Future, 2021	EEUU	X	X	X	X	
		China		X	X		X
		Chile	X		X		X

Nota. Elaboración propia, recopilación de información bibliográfica

7.2. Segundo nivel

7.2.1. Selección de métodos o instrumentos para recolección de información

Con el fin de reunir la mayor cantidad de información referente al hidrógeno para desarrollar los objetivos propuestos y conocer el estado actual de Colombia en la incorporación del hidrógeno, se usará *el análisis documental* como método de recolección de información, usando entre 6 y 10 referencias en el desarrollo de cada objetivo.

Siendo así, se extraerá la información necesaria para responder a los objetivos de la investigación, como: beneficios, impactos, desafíos, riesgos, políticas y regulaciones; y a partir de allí analizar, comparar, recopilar y concluir respondiendo al objetivo planteado.

7.2.2. Técnicas de análisis de datos

Una vez recopilada la información necesaria, se usará el análisis de contenido para el análisis de datos, junto con las siguientes herramientas:

Tabla 5.

Recolección y Análisis de Datos

Objetivo	Instrumento de recolección de datos	Técnica de análisis de datos	Herramienta	Descripción
Beneficios e Impactos			Análisis FODA	Evaluación de la situación de acuerdo con la información
Riesgos y Desafíos	Análisis documental	Análisis de contenido	Análisis FODA	Situación actual del proyecto
Políticas y Regulaciones			Análisis comparativo	Comparación y recopilación de información

Nota. Elaboración propia, recopilación de información bibliográfica

El análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) ayuda a identificar y comprender los riesgos y desafíos asociados con la implementación del hidrógeno

como fuente de energía alternativa en la transición energética en Colombia. Si bien el análisis FODA se utiliza tradicionalmente para evaluar factores internos y externos en una organización o situación específica, su adaptación en este contexto resulta esencial. A continuación, se detalla cómo se podría desarrollar este análisis en el contexto mencionado:

Figura 6.

Formato análisis FODA



Nota. Elaboración propia

Cuando se emplea el *análisis de contenido* dentro de un enfoque como el *análisis comparativo*, es posible extraer detalles precisos que facilitarán la comparación y contraste imparcial de las perspectivas, los beneficios percibidos y los desafíos asociados a la adopción del hidrógeno en Colombia. Además, esta metodología ofrece la versatilidad requerida para ajustar el análisis ante las variaciones y similitudes que puedan manifestarse en los datos cualitativos recolectados.

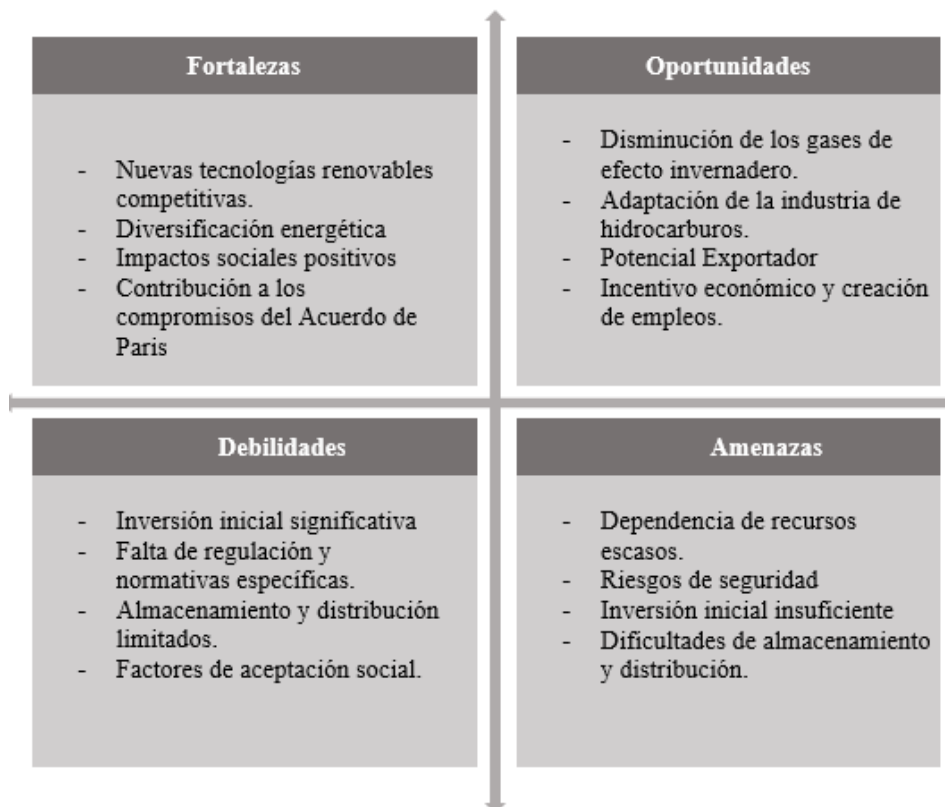
8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

8.1. Beneficios e Impactos

De acuerdo con la bibliografía consultada podemos decir que la transición energética es un tema crucial en la actualidad, ya que busca reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el impacto ambiental asociado a su uso. En este contexto, el hidrógeno se ha posicionado como una alternativa prometedora para la industria de hidrocarburos en Colombia y en el mundo. Teniendo en cuenta lo anterior, se presentará un análisis FODA (Ver **Figura 8**) y discusión de los resultados obtenidos en cuanto a los impactos y beneficios de la implementación del hidrógeno como fuente de energía alternativa en el marco de la transición energética de la industria de hidrocarburos en Colombia.

Figura 7.

Desarrollo análisis FODA



Nota. Elaboración propia

8.1.1. Fortalezas

- *Nuevas tecnologías renovables competitivas:* La implementación del hidrógeno impulsa la investigación y desarrollo de tecnologías limpias relacionadas, como la electrólisis del agua y las pilas de combustible. Esto puede generar oportunidades económicas y tecnológicas a largo plazo, así como la creación de empleos en el sector de energías renovables.
- *Diversificación energética:* La introducción del hidrógeno como fuente de energía alternativa diversifica el suministro energético de un país o una región. Esto reduce la dependencia de los combustibles fósiles y aumenta la resiliencia energética, lo que es especialmente importante en caso de fluctuaciones en los precios del petróleo o problemas de suministro.
- *Impactos sociales positivos:* La adopción del hidrógeno puede tener un impacto positivo en las comunidades locales al crear empleos en la producción, distribución y mantenimiento de tecnologías de hidrógeno, así como al mejorar la calidad del aire y la salud pública al reducir la contaminación.
- *Contribución a los compromisos del Acuerdo de París:* Como Fortaleza, significa que Colombia está tomando las medidas para cumplir con los compromisos establecidos en el Acuerdo de París, es decir el acuerdo internacional adoptado en 2015 en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

El Acuerdo de París tiene como objetivo principal limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2 grados Celsius por encima de los niveles preindustriales, con esfuerzos para limitar el aumento a 1,5 grados Celsius. Para lograr esto, los países que son partes del acuerdo se comprometen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en sus respectivos territorios.

8.1.2. Oportunidades

- *Disminución de los gases de efecto invernadero:* La implementación del hidrógeno como fuente de energía alternativa ofrece una oportunidad clave para reducir las emisiones de carbono y mitigar el cambio climático. El hidrógeno verde, producido a partir de fuentes renovables, no emite dióxido de carbono en su proceso de generación ni durante su uso,

lo que lo convierte en una opción atractiva para reducir las emisiones en múltiples sectores, incluida la movilidad y la generación de electricidad.

- *Adaptación de la industria de hidrocarburos:* La industria de hidrocarburos debe tener la capacidad para ajustar y transformar sus operaciones, infraestructura y actividades en respuesta a los desafíos y cambios en el entorno energético y económico. En este contexto, se considera una "oportunidad" porque permite a la industria mantener su relevancia y sostenibilidad en un mundo en el que la demanda de combustibles fósiles está disminuyendo debido a la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.
- *Potencial exportador:* Colombia, al tener recursos naturales adecuados para la producción de hidrógeno verde, podría convertirse en un exportador de este recurso a nivel regional e internacional. Esto podría generar ingresos y mejorar la posición económica del país en el mercado global de energías limpias.
- *Incentivo económico y creación de empleo:* La implementación del hidrógeno impulsa la inversión en nuevas infraestructuras y tecnologías relacionadas con la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno. Esto crea oportunidades de empleo en sectores como la energía renovable, la ingeniería y la fabricación de equipos de hidrógeno, lo que puede tener un impacto positivo en la economía.

8.1.3. Debilidades

- *Inversión inicial significativa:* La infraestructura necesaria para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno es costosa. Esto puede representar una barrera financiera significativa para los gobiernos, las empresas y otros actores interesados en la adopción del hidrógeno como fuente de energía.
- *Falta de regulación y normativas específicas:* En muchos lugares, la falta de marcos regulatorios y normativas claras para el hidrógeno puede ralentizar su implementación y crecimiento. La ausencia de estándares y regulaciones específicas puede generar incertidumbre en el mercado.
- *Almacenamiento y distribución limitados:* La infraestructura de almacenamiento y distribución de hidrógeno está menos desarrollada en comparación con otros

combustibles, como la gasolina o el gas natural. Esto puede dificultar la integración de hidrógeno en la infraestructura existente.

- *Factores de aceptación social:* La aceptación del hidrógeno como fuente de energía alternativa puede variar en función de la percepción pública y los prejuicios. La falta de conciencia o la preocupación por la seguridad del hidrógeno pueden ser obstáculos para su adopción.

8.1.4. Amenazas

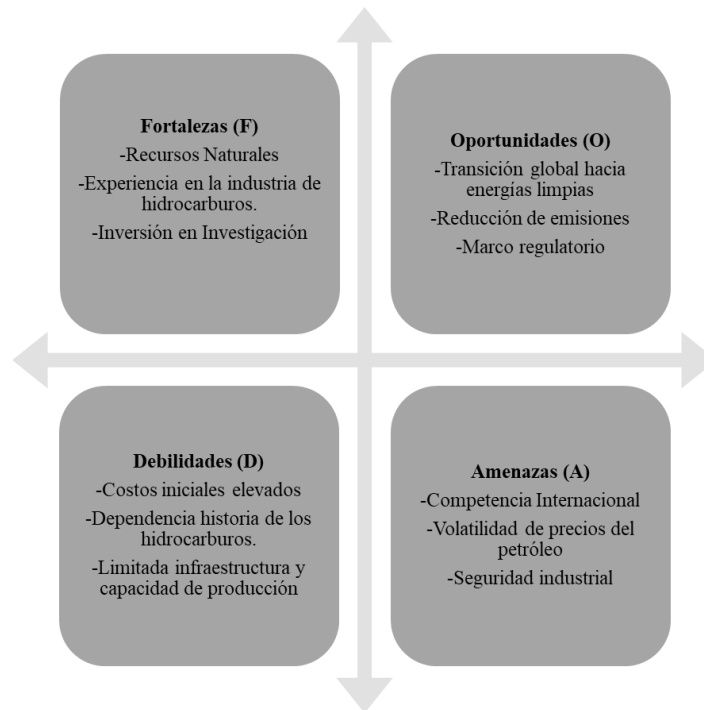
- *Dependencia de recursos escasos:* La producción de hidrógeno, en particular el hidrógeno verde, depende de recursos naturales como la energía solar y eólica. La disponibilidad limitada de estos recursos podría limitar la expansión del hidrógeno como fuente de energía.
- *Riesgos de seguridad:* El hidrógeno es altamente inflamable y puede presentar riesgos de seguridad en su producción, almacenamiento y transporte. La percepción de estos riesgos puede ser una amenaza para su adopción y aceptación pública.
- *Inversión insuficiente:* La inversión inicial requerida para desarrollar infraestructura de hidrógeno y tecnologías asociadas puede ser un obstáculo si no se proporcionan los fondos y recursos necesarios.
- *Dificultades de almacenamiento y distribución:* El hidrógeno es un gas difícil de almacenar y transportar, lo que puede requerir infraestructura costosa y tecnologías especializadas.

8.2. Riesgos y Desafíos

Tras la recopilación de información y la investigación realizada, se ha elaborado el siguiente análisis FODA (Ver **Figura 8**), centrado en los riesgos y desafíos que rodean la implementación del hidrógeno como fuente de energía alternativa en el contexto de la transición energética de la industria de hidrocarburos en Colombia.

Figura 8.

Desarrollo análisis FODA



Nota. Elaboración propia

8.2.1. Fortalezas:

- *Recursos naturales:* Colombia cuenta con una abundancia de recursos naturales que son propicios para la producción de hidrógeno, especialmente a través de fuentes como la energía hidroeléctrica y solar. Esta ventaja natural es un recurso valioso para el país y lo posiciona para contribuir de manera significativa a la producción de hidrógeno en la región y en el ámbito internacional.

En el contexto de América Latina, la región se destaca internacionalmente por su riqueza en recursos naturales, que incluyen abundantes fuentes de agua, energía solar y eólica.

Esta abundancia de recursos naturales posiciona a la región, incluyendo a Colombia, para

liderar la producción de hidrógeno, especialmente la variedad verde, lo que podría ser beneficioso tanto para la región como para aquellos países que no disfrutaban de estas ventajas naturales. Además, el compromiso de la región, en la implementación de políticas climáticas ha llamado la atención de naciones desarrolladas que buscan descarbonizar sus sistemas de energía. Sin embargo, la falta de tecnologías plenamente desarrolladas que aprovechen estos recursos energéticos primarios puede representar un desafío que limite las oportunidades en la región (Aldana & Leon, 2022).

- *Experiencia en la industria de hidrocarburos:* Colombia se encuentra entre los seis países de América Latina que poseen recursos energéticos significativos y un potencial prometedor para el futuro. En el ámbito de los hidrocarburos, el país alberga considerables reservas probadas de petróleo, estimadas en 1.668 millones de barriles, y gas natural, que ascienden a 7.3 terapiés cúbicos. La industria petrolera colombiana destaca por su alta sofisticación y diversificación. Además de las empresas enfocadas en la extracción y producción, en Colombia existen dos refinerías, una sólida industria petroquímica, compañías de servicios para el petróleo y gas, junto con consultoras y otros elementos esenciales en la cadena de valor de esta industria. Cerca de una docena de instituciones académicas ofrecen programas especializados en geociencias e ingeniería de petróleos, lo que contribuye a la formación de profesionales y al desarrollo del conocimiento en el sector. La extensa experiencia del país en la exploración y explotación de hidrocarburos ha resultado en una amplia base de profesionales con habilidades y bagaje en la industria del petróleo (ANH, s.f.).

Un destacado actor en la industria petrolera de Colombia es Ecopetrol, cuyo compromiso con la responsabilidad social y ambiental ha impulsado avances significativos en la transición hacia una matriz energética más sostenible. Por ejemplo, al finalizar el año 2021, Ecopetrol y su Grupo de Energías Especiales (GEE) informaron la generación de un total de 54.5 GWh-año de energía solar, siendo el 98% vinculado a las operaciones de la Granja Solar Castilla y la Granja Solar San Fernando (CENIT), mientras que el restante 2% se destinó a operaciones en Pozos Colorados y Esenttia (Ecopetrol, 2021). Además, la compañía ha implementado estrategias en relación con el gas y al gas licuado de petróleo (GLP). Desde 2021, Ecopetrol ha establecido un plan estratégico para la

producción de hidrógeno con bajas emisiones de carbono, incluyendo variantes azules, verdes y blancas, en consonancia con la Hoja de Ruta del Gobierno Nacional. Esta iniciativa apunta a diversas aplicaciones, entre las que destaca la movilidad sostenible (Ecopetrol, 2022b).

- *Inversión en investigación:* La hoja de ruta del hidrógeno en Colombia juega un papel fundamental en impulsar la inversión en investigación relacionada con esta fuente de energía. Esta hoja de ruta establece un plan estratégico que abarca el horizonte de 2030-2050 y se basa en cinco pilares esenciales destinados a promover el desarrollo social, medioambiental y económico de Colombia. Estos pilares están enfocados en la reducción de emisiones, el crecimiento económico, la transición justa, los objetivos nacionales y el bienestar de las comunidades locales. Para alcanzar con éxito estos pilares, es imperativo contar con una sólida base de inversión que permita identificar los desafíos y riesgos, y desarrollar estrategias efectivas para superarlos.

En el proceso de investigación y desarrollo de la tecnología del hidrógeno verde en Colombia, se han llevado a cabo varios proyectos piloto y experimentales en todo el país. Estos proyectos se centran en la producción, almacenamiento y aplicaciones del hidrógeno en diversos sectores, incluyendo el transporte y la generación de energía. Uno de los actores clave en este proceso ha sido Ecopetrol, que ha anunciado planes y proyectos concretos para avanzar hacia una matriz energética más sostenible. Algunos ejemplos de estos proyectos son (Ecopetrol, 2022a):

1. El primer piloto de producción de hidrógeno verde en la refinería de Cartagena, que utiliza un electrolizador de membrana de intercambio de protones con una capacidad de 50 kilovatios, lo que permite producir hasta 20 kilogramos de hidrógeno por día.
2. Movilidad de bus para 50 pasajeros con celda de hidrógeno en Transmilenio
3. Nuevas plantas de hidrógeno verde y azul en las refinerías de 40 a 60 megavatios
4. La evaluación de las concentraciones de hidrógeno en las cuencas colombianas, lo que contribuye a comprender mejor el potencial de hidrógeno en el país.
5. La asignación de una inversión de 200 millones de dólares entre 2022 y 2024 para el desarrollo de proyectos y estudios estratégicos en el marco del plan de hidrógeno

Los proyectos en curso y la inversión planificada reflejan el compromiso de Colombia con la transición hacia una economía más sostenible y la promoción del hidrógeno verde como una fuente de energía limpia y renovable. No obstante, es importante considerar la exploración de otras tecnologías con el objetivo de optimizar costos en la producción y el almacenamiento de energía. Esto permitirá avances tecnológicos adicionales.

Un ejemplo relevante en este contexto es el potencial de la biomasa como una fuente de energía. La biomasa se perfila como una alternativa prometedora para la producción de energía, especialmente en la generación de hidrógeno, gracias a su alta volatilidad y bajos contenidos de azufre, nitrógeno y cenizas. Sin embargo, es importante reconocer que aún existen desafíos en el desarrollo completo de las tecnologías necesarias para su conversión.

Destaca el hecho de que el potencial energético estimado de las principales fuentes de biomasa residual asciende a 129,814.62 terajulios por año, lo que equivaldría a una generación eléctrica aproximada de 4,116.4 megavatios. Esto subraya la capacidad sustancial de la biomasa residual como una fuente de energía significativa que podría ser aprovechada en el futuro (Castiblanco & Cárdenas, 2020).

8.2.2. Oportunidades:

- *Transición Global hacia Energías Limpias:* La creciente demanda global de fuentes de energía limpias en el contexto de la lucha contra el cambio climático abre perspectivas prometedoras para producción de hidrógeno en Colombia. El país cuenta con un potencial significativo para la generación de hidrógeno a partir de diversas fuentes, incluyendo energía solar, eólica, biomasa residual de cultivos como banano, plátano, arroz y caña de azúcar, bioetanol, gas natural y carbón (Cobo, Barraza, Cantillo & Uribe, 2022).

Sin embargo, uno de los puntos fuertes de Colombia es la energía hidroeléctrica. Según un análisis realizado por CorfiColombiana en 2022, se generaron 76,905 gigavatios-hora (GWh) de electricidad en el país, y la energía hidroeléctrica representó el 83.66% de esta cantidad (Figueroa & Mojica, 2023).

En particular, las plantas hidroeléctricas medianas ubicadas en áreas de flujo continuo de agua, sin necesidad de embalses, ofrecen ventajas notables para Colombia. Su instalación es más sencilla y menos costosa en comparación con las plantas hidroeléctricas convencionales con embalses. Estas plantas también pueden atender las demandas locales, reduciendo las pérdidas de transmisión y evitando los impactos ambientales asociados a las represas.

Además, estas plantas medianas son ideales para el almacenamiento de energía en forma de hidrógeno. Dado que experimentan oscilaciones diarias y estacionales en el caudal de agua, pueden generar electricidad en exceso, lo que resulta en un proceso más eficiente y económico para la producción de hidrógeno (Carvajal-Osorio, Babativa & Alonso, 2010).

Si bien Colombia tiene diversas opciones de fuentes energéticas, como la eólica, solar, hidráulica, carbón y combustibles fósiles, es crucial elegir la técnica de producción y almacenamiento de hidrógeno más idónea basándonos en investigaciones como el estudio realizado por Ullman, A. N. y Kittner, N., titulado “Environmental impacts associated with hydrogen production in La Guajira”. Según este estudio, si Colombia optara por producir 50 toneladas de hidrógeno a través de la electrólisis basada en carbón, las emisiones totales de CO₂ equivalente podrían aumentar en 3.3 millones de toneladas al año. En contraste, los escenarios que involucran electrólisis eólica externa y electrólisis eólica en el lugar de consumo generan aproximadamente 0.3 millones de toneladas de CO₂ equivalente al año, lo que demuestra emisiones significativamente más bajas. Este análisis resulta esencial para mantener un enfoque constante en la búsqueda de diversificar la matriz energética durante el proceso de transición energética.

- *Reducción de emisiones:* el hidrógeno se plantea como una solución para abordar la responsabilidad del sector energético a mediano y largo plazo y cumplir con los compromisos internacionales, como el Acuerdo de París., ya que el país se comprometido con una reducción de emisiones del 51% en 2030. Por ende, El hidrógeno, en particular el hidrógeno azul y verde, ha ganado relevancia, ya que ofrece la posibilidad de mantener ciertas aplicaciones y productos esenciales para la sociedad moderna, al tiempo que reduce las emisiones de GEI. El hidrógeno azul y verde son opciones que permiten a las

empresas extractivas continuar sus actividades, en parte gracias al despliegue de tecnologías de captura y uso de carbono. (Aldana & Leon, 2022).

- Es fundamental seleccionar la tecnología de producción y la fuente de energía al considerar el hidrógeno, ya que la Comisión Europea ha establecido categorías de clasificación que reflejan la sostenibilidad y las emisiones asociadas (Ministerio de Minas y Energía, s.f.). Estas categorías son las siguientes:
 1. Hidrógeno generado a partir de combustibles fósiles como el gas natural o el carbón, con tasas de emisión de 9,5 kg de CO₂ por kg de H₂ para el gas natural y 20 kg de CO₂eq por kg de H₂ para el carbón.
 2. Hidrógeno derivado de combustibles fósiles con CCUS (captura, almacenamiento y uso de carbono), lo que disminuye las emisiones de CO₂, con tasas de emisión que pueden oscilar entre 1 y 2 kg de CO₂ por kg de H₂.
 3. Hidrógeno generado a partir de electricidad, cuya sostenibilidad depende de la fuente de energía empleada para la generación eléctrica. En el caso de Colombia, la producción de hidrógeno a partir de la red eléctrica resultaría en aproximadamente 8,2 kg de CO₂ por kg de H₂.
 4. Hidrógeno renovable o limpio, producido a partir de fuentes renovables con emisiones prácticamente nulas.
 5. Hidrógeno de bajas emisiones, que abarca tecnologías con emisiones notablemente menores que las formas de producción convencionales.

Estas categorías son esenciales para evaluar el impacto ambiental y la sostenibilidad del hidrógeno en función de su proceso de producción y la fuente de energía utilizada.

- *Marco regulatorio:* En Colombia, se han establecido una serie de marcos legales y regulaciones que abren un amplio abanico de oportunidades en el ámbito de la energía, particularmente en relación con fuentes alternativas y la transición hacia una matriz energética más sostenible. Leyes como la Ley 1665 de 2013, que introduce la noción de fuentes alternativas, y la Ley 1715 de 2014, que se enfoca en fuentes no convencionales y cambio climático, han sentado las bases para el fomento de tecnologías más limpias y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Una de las iniciativas más destacadas es la creación del Fondo de Energías No Convencionales y de Gestión Eficiente de la Energía (Fenoge), que se encarga de seleccionar proyectos piloto relacionados con el hidrógeno y otras tecnologías. Este fondo también establece sanciones para aquellos que infrinjan las regulaciones ambientales, en particular, dirigidas al sector de hidrocarburos, que ya ha iniciado proyectos piloto relacionados con el hidrógeno. La inclusión de estas sanciones refuerza el compromiso del país con el desarrollo sostenible y la reducción de emisiones (Aldana & Leon, 2022).

Además de las sanciones, la Ley 2099 de 2021 establece un conjunto de beneficios tributarios, que incluyen deducciones especiales en el impuesto sobre la renta, exclusión del Impuesto al Valor Agregado (IVA) en bienes y servicios relacionados con energías no convencionales, exención de gravámenes arancelarios para la importación de equipos y materiales, así como la depreciación acelerada de activos necesarios para proyectos de energía no convencional. Estos estímulos buscan incentivar la inversión y el desarrollo de tecnologías limpias en Colombia.

En este contexto, el Decreto 1476 de 2022 emitido por el Ministerio de Minas y Energía ha establecido condiciones adicionales, como la creación de certificados de origen del hidrógeno, requisito para acceder a los beneficios tributarios. También, se hace obligatorio para los proyectos de hidrógeno azul tener un sistema de captura de carbono (CCUS). La creación de un sistema de información aplicable a los agentes y actores de la cadena de valor del hidrógeno facilitará la evaluación y certificación de hidrógeno. Estas medidas son fundamentales para garantizar el cumplimiento de los objetivos establecidos en la legislación y promover la transición hacia una economía más sostenible en Colombia.

8.2.3. Debilidades:

- *Costos iniciales elevados:* La construcción de la infraestructura necesaria para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno puede implicar costos significativos, lo que representa un posible desafío para su adopción.

El costo de producción de hidrógeno es altamente variable y depende tanto de la tecnología empleada como de la fuente de energía utilizada. Las diferencias suelen ser

notables según la región geográfica. Antes de la crisis energética global desencadenada por la invasión de Ucrania por parte de Rusia, la producción de hidrógeno a partir de fuentes fósiles sin captura de carbono se situaba en un rango de costo nivelado de USD 1.0-3.0 por kg de H₂ en 2021, lo que lo convertía en la alternativa más económica.

Sin embargo, el costo de producir hidrógeno mediante electrólisis está influenciado por los gastos de capital de los electrolizadores y los costos asociados con la electricidad utilizada. Se prevé que, a corto plazo, gracias a economías de escala y avances tecnológicos, los costos de los electrolizadores disminuirán. Además, el costo de la electricidad generada a partir de fuentes renovables ha experimentado una marcada reducción en la última década.

En un escenario de implementación a gran escala, como se describe en el Escenario de Emisiones Netas Cero (NZE), se proyecta que el costo de producir hidrógeno a través de electrólisis utilizando energía solar podría disminuir significativamente a USD 1.6 por kg de H₂ para el año 2030 en regiones con abundante radiación solar. Esto convierte a la electrólisis basada en paneles solares en una opción económicamente atractiva para la producción de hidrógeno en la próxima década. Además, en regiones con recursos eólicos notables, se podrían alcanzar costos competitivos, situándose en alrededor de USD 2.1 por kg de H₂ en la región del noroeste de Europa y en USD 2.3 por kg de H₂ en los Estados Unidos (IEA, 2023). Cabe destacar que en Colombia se está incursionando en la adopción de fuentes de energía no convencionales, como la solar y la eólica.

- *Dependencia histórica de los hidrocarburos:* La estrategia del Ministerio de Minas y Energía en Colombia (Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia) para promover la producción y uso de hidrógeno se relaciona directamente con la necesidad de abordar la dependencia histórica de los hidrocarburos en la economía del país. Dado que Colombia ha tenido una fuerte dependencia de los hidrocarburos, la transición hacia la adopción de tecnologías de hidrógeno representa un desafío importante. Esta transición implica una reconfiguración sustancial de la industria energética, que históricamente ha estado centrada en los hidrocarburos, y es probable que se enfrente a resistencia de diversos actores involucrados en esta industria.

La estrategia delineada por el Ministerio se enfoca en introducir gradualmente el hidrógeno en el país, comenzando con la aplicación en industrias existentes, lo que incluiría en gran medida hidrógeno azul y gris. A medida que avanza en fases subsiguientes, busca desarrollar nuevas aplicaciones y reducir costos para el hidrógeno verde, que se espera sea una alternativa competitiva en el futuro. Este proceso de transición hacia el hidrógeno representa un esfuerzo para diversificar la matriz energética del país y reducir la dependencia histórica de los hidrocarburos.

- *Limitada infraestructura y capacidad de producción:* El posicionamiento geográfico de Colombia se destaca como estratégico según la hoja de ruta gubernamental para el hidrógeno en el país. Colombia actúa como un importante punto de conexión entre América Central y América del Sur, y se encuentra interconectado mediante redes de transporte, distribución y comercio con otros cinco países de la región. Además, cuenta con puertos que pueden ser adaptados para facilitar el transporte de hidrógeno (Ministerio de minas y Energía, s.f.). No obstante, esta ventaja geográfica también conlleva la necesidad de realizar inversiones significativas para lograr la adopción efectiva del hidrógeno como fuente de energía en el país.

Las limitaciones en la infraestructura actual dificultan la movilidad y la distribución eficiente del hidrógeno a nivel nacional, lo que, a su vez, restringe su adopción en varios sectores. Además, la capacidad de producción actual no satisface la demanda proyectada, lo que podría generar un cuello de botella en el suministro y aumentar los costos de producción. Para superar esta debilidad, será necesario realizar inversiones sustanciales tanto en infraestructura como en el desarrollo tecnológico.

El almacenamiento y la distribución del hidrógeno también plantean desafíos técnicos significativos debido a sus propiedades, como su baja densidad energética por unidad de volumen, lo que lo hace propenso a fugas. En este sentido, las tecnologías de almacenamiento y transporte, como el almacenamiento en forma de hidratos y la compresión, deberán mejorarse y perfeccionarse para superar los desafíos logísticos asociados con el hidrógeno verde. (AES, s.f)

8.2.4. Amenazas:

- *Competencia internacional:* La competencia global en la producción y exportación de hidrógeno es feroz y puede dificultar la entrada de Colombia en el mercado.

La demanda de hidrógeno alcanzó un máximo histórico en 2022, pero sigue concentrada en aplicaciones tradicionales. El uso mundial de hidrógeno alcanzó los 95 Mt en 2022, un aumento interanual de casi el 3%, con un fuerte crecimiento en todas las principales regiones consumidoras excepto Europa, que sufrió un golpe a la actividad industrial debido al fuerte aumento de los precios del gas natural. Este crecimiento global no refleja un éxito de los esfuerzos políticos para ampliar el uso del hidrógeno, sino que más bien está vinculado a las tendencias energéticas globales generales (IEA, 2023).

Es relevante destacar que este aumento en el consumo de hidrógeno no necesariamente está vinculado al éxito de los esfuerzos políticos dirigidos a su expansión, sino que guarda una estrecha relación con las tendencias generales en el panorama energético global. Esto enfatiza la importancia de que Colombia, al adentrarse en un mercado altamente competitivo, formule estrategias sólidas y se concentre en la creación de aplicaciones innovadoras y sostenibles para el hidrógeno, con el propósito de destacar a nivel internacional y contribuir a la transición global hacia fuentes de energía más limpias.

- *Volatilidad de los precios del petróleo:* La economía de Colombia está estrechamente vinculada a los precios del petróleo, lo que plantea un desafío para la transición hacia el hidrógeno debido a la volatilidad de dichos precios. En los primeros seis meses de este año (2023), el precio promedio del petróleo Brent fue de alrededor de \$79,8 USD por barril, marcando una disminución del 25,4% en comparación con el mismo período de 2022. Al mismo tiempo, la Tasa de Cambio Representativa del Mercado (TRM) promedió cerca de \$4.596 pesos por dólar, reflejando una depreciación del 17,4% en comparación con el promedio del primer semestre de 2022. Estos factores contribuyeron a que los ingresos del sector de hidrocarburos en la economía colombiana durante la primera mitad de 2023 alcanzaran alrededor de \$44,3 billones de pesos, en contraste con los cerca de \$51,4 billones de pesos generados en el mismo período de 2022. La disminución de aproximadamente \$7,2 billones de pesos se atribuyeron principalmente a

la caída en el precio del petróleo, a pesar de un aumento en la producción y cambios en la tasa de cambio (CAMPETROL, 2023).

La transición hacia fuentes de energía más limpias, como el hidrógeno, implica la necesidad de realizar inversiones considerables. La volatilidad de los precios del petróleo podría afectar la capacidad del gobierno y las empresas para asegurar financiamiento para proyectos de energía limpia. Esto plantea un desafío adicional mientras Colombia busca posicionarse en el mercado internacional de energías limpias y puede impactar su competitividad en comparación con otros países que han avanzado más en esta transición. Además, esta volatilidad genera incertidumbre entre los inversores interesados en proyectos de energía limpia en Colombia, lo que podría tener consecuencias en la atracción de inversiones y en el cronograma de la transición hacia fuentes de energía más sostenibles.

- *Seguridad industrial:* A pesar de que el hidrógeno se presenta como una prometedora alternativa para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), es necesario abordar los desafíos relacionados con la seguridad y la salud en su implementación a gran escala sin obstáculos. A pesar de ser considerado un gas no tóxico, su alta inflamabilidad, atribuida a su rápida velocidad de llama y baja energía de ignición, suscita preocupaciones significativas. Además, su llama es incolora e inodora, lo que dificulta la detección manual de incendios y fugas. No obstante, su característica de alta flotabilidad y difusividad permite una rápida dispersión en caso de incidentes (Schneider, 2021).

Por lo tanto, en las etapas de diseño e ingeniería de las instalaciones de producción y manejo de hidrógeno, que abarcan desde las fases conceptuales hasta las de detalle, resulta fundamental incorporar medidas de seguridad intrínseca. Estas medidas tienen como objetivo minimizar los riesgos tanto dentro como fuera de las instalaciones. En esta fase, es esencial llevar a cabo análisis exhaustivos de riesgos y aplicar técnicas adecuadas para gestionar todas las posibles situaciones peligrosas. (Reyes, Santos, & Navarro, s.f.). Los riesgos físicos asociados al hidrógeno, como fugas, llamas y explosiones, pueden gestionarse de manera similar a otros combustibles con medidas de seguridad adecuadas. No obstante, es crucial continuar investigando y desarrollando protocolos de seguridad a medida que el uso del hidrógeno en el sistema energético se expande.

8.3. Políticas y Regulaciones

8.3.1. Tipos de hidrógeno a desarrollar

Como se observa en la **Tabla 6**, en el mundo predominan las políticas hacia hidrógeno verde y azul. Por otro lado, Colombia se destaca por ser el único de los 4 países estudiados en implementar el hidrógeno blanco (natural del subsuelo) en sus políticas y no incluir, como los otros 3 países, al hidrógeno gris; posiblemente por ser igual de contaminante que los mismos hidrocarburos de donde proviene.

Tabla 6.

Tipos de hidrógeno a desarrollar

Contenido	Bibliografía	País	Tipos de Hidrógeno a Desarrollar
Disposiciones para la transición energética y la dinamización del mercado energético	Ley 2099 de 2021	Colombia	Verde y Azul
Integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional	Ley 1715 de 2014	Colombia	Verde, Azul y Blanco
Plan nacional de desarrollo 2022- 2026	Ley 2294 de 2023	Colombia	Verde, Azul y Blanco
Regulación del Hidrógeno en el mundo	CMS Law Tax Future, 2021	EEUU	Gris, Azul y Verde
		China	Gris, Azul y Verde
		Chile	Gris y Verde

Nota. Elaboración propia, recopilación de información bibliográfica

8.3.2. Exención de impuestos

Actualmente Colombia cuenta con una política de exención de impuestos dirigida a la cadena de valor del hidrógeno completa. Aun así, es posible complementarla con casos como los de Estados Unidos, China y Chile, donde se otorga un crédito fiscal por tonelada de dióxido de carbono capturada y almacenada para proyectos de hidrógeno azul, exenciones para inversión extranjera, subsidios por la compra de vehículos con pila de hidrógeno e incentivos para la cadena de valor del hidrógeno (**Tabla 7**).

Tabla 7.*Exención de impuestos*

Contenido	Bibliografía	País	Exención de impuestos
Disposiciones para la transición energética y la dinamización del mercado energético	Ley 2099 de 2021	Colombia	Deducción en el impuesto de renta, exclusión de IVA, exención de aranceles y depreciación acelerada
Ley de reducción de la inflación IRA	Ley de Reducción de la Inflación de 2022	EEUU	Se mejora el crédito fiscal 45Q de 2020, al pasar de 50 a 80 dólares de crédito fiscal por tonelada de dióxido de carbono capturada y almacenada.
Regulación del Hidrógeno en el mundo	CMS Law Tax Future, 2021	EEUU	Crédito fiscal 45Q de 2020, el cual otorgaba un crédito fiscal por tonelada de dióxido de carbono capturada y almacenada
		China	Para inversión extranjera y subsidios para compra de vehículos con pila de hidrógeno
		Chile	Estrategia nacional de hidrógeno verde de 2020 a través de incentivos a 6 grandes productores y consumidores

Nota. Elaboración propia, recopilación de información bibliográfica

8.3.3. Fondo de financiamiento y ejecución de proyectos

En cuanto a los fondos de financiamiento para la ejecución de proyectos relacionados al hidrógeno, Colombia se encuentra bien preparada con 3 fondos exclusivos para proyectos de hidrógeno verde: Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE), el Presupuesto General de la Nación y el Sistema General de Regalías. Por otro lado, Chile presenta una alternativa similar al realizar rondas de financiamiento de hasta \$50 MUSD, igualmente para proyectos de hidrógeno verde (**Tabla 8**); dándonos a entender que el hidrógeno verde es la prioridad en los 2 países estudiados.

Tabla 8.*Fondo de financiamiento y ejecución de proyectos*

Contenido	Bibliografía	País	Fondo de financiamiento y ejecución de proyectos
Disposiciones para la transición energética y la dinamización del mercado energético	Ley 2099 de 2021	Colombia	El Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía - FENOGE (H2 Verde) Presupuesto General de la Nación y el Sistema General de Regalías (H2 Verde)
Regulación del Hidrógeno en el mundo	CMS Law Tax Future, 2021	Chile	Rondas de financiamiento de hasta \$50 MUSD para apoyar proyectos seleccionados de hidrógeno verde

Nota. Elaboración propia, recopilación de información bibliográfica

8.3.4. Apoyo a la investigación

Este es uno de los temas en común en 3 de los 4 países estudiados, por un lado Colombia tiene como objetivo aumentar los programas de estudio (CTeI) enfocados en el hidrógeno, mientras Estados Unidos busca realizar inversiones públicas para establecer solidas relaciones con sectores privados e instituciones de educación superior, promoviendo el desarrollo de esta alternativa. Finalmente, Chile consciente de la falta de investigación en su territorio, solo tiene la intención de crear un marco regulatorio de la mano con la Pontificia Universidad Católica de Chile (**Tabla 9**).

8.3.5. Vigilancia de actividades y CCUS

Durante el estudio realizado, el único país con intención de vigilar y reglamentar la práctica de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) es Colombia, pues se menciona que el responsable de ello será el Ministerio de Minas y Energía (**Tabla 10**), aunque a la fecha no se encuentra información adicional al tema.

Tabla 9.*Apoyo a la investigación*

Contenido	Bibliografía	País	Apoyo a la investigación
Disposiciones para la transición energética y la dinamización del mercado energético	Ley 2099 de 2021	Colombia	Intención sin detalles
Promueve la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno	Decreto 1476 de 2022	Colombia	Programas de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTel) para promover la formación en la cadena de valor de la industria del hidrógeno
Ley de política energética EPA	Ley de Política Energética de 2005	EEUU	Inversiones públicas para construir vínculos sólidos con la industria privada, instituciones de educación superior, laboratorios nacionales e instituciones de investigación
Regulación del Hidrógeno en el mundo	CMS Law Tax Future, 2021	EEUU	El Plan del Programa de Hidrógeno es un marco estratégico que incorpora los esfuerzos de investigación y desarrollo
		Chile	Es necesario aumentar la cantidad de investigación (la Pontificia Universidad Católica de Chile desarrolla un eventual marco regulatorio)

Nota. Elaboración propia, recopilación de información bibliográfica

Tabla 10.*Vigilancia de actividades y CCUS*

Contenido	Bibliografía	País	Vigilancia de actividades y CCUS
Disposiciones para la transición energética y la dinamización del mercado energético	Ley 2099 de 2021	Colombia	El Ministerio de Minas y Energía será quien reglamente esta práctica

Nota. Elaboración propia, recopilación de información bibliográfica

8.3.6. Disminución de emisiones de carbono

Durante el acuerdo de París los países firmantes se comprometieron a reducir sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) según sus capacidades, para el caso de Colombia quedó establecido reducir un 51% de sus emisiones a 2030 y llegar al carbono neutralidad (emitir la misma cantidad de GEI que se absorben) para 2050. Dicho esto, una de las políticas a favor de esta meta es el programa que busca reemplazar el 30% del parque automotor por vehículos que trabajen con gas combustible o hidrógeno. Por otro lado, una alternativa adicional para la reducción de emisiones de GEI, pueden ser las implementadas en Estados Unidos, donde se otorga crédito fiscal a las prácticas de CCUS; y Chile, mediante el establecimiento de impuestos al carbono a través de un acuerdo publico privado (**Tabla 11**).

Tabla 11.

Disminución de emisiones de carbono

Contenido	Bibliografía	País	Disminución de emisiones de carbono
Impulsa el desarrollo bajo carbono del país mediante el establecimiento de las metas y medidas mínimas	Ley 2169 de 2021	Colombia	Para 2030 reducir en un 51% las emisiones de GEI (max. emisiones 169.44 millones de tCO ₂ eq) y para 2050 alcanzar la carbono neutralidad Programas para que un 30% de los vehículos de transporte público de pasajeros, particular, de carga y especial deban trabajar con gas combustible y/o hidrógeno
Regulación del Hidrógeno en el mundo	CMS Law Tax Future, 2021	EEUU	Credito fiscal por la CCUS
		Chile	Establecer una mesa público-privada para establecer impuestos al carbono

Nota. Elaboración propia, recopilación de información bibliográfica

8.3.7. Fomento de vehículos a gas natural, eléctricos y/o con hidrógeno

En cuanto al fomento de los vehículos a gas natural, eléctricos y/o con hidrógeno, Colombia adicional a reemplazar el 30% del parque automotor por este tipo de alternativas y eximir impuestos a la cadena de valor, puede adoptar políticas y acciones como las implementadas en Estados Unidos, donde se realizan alianzas publico privadas y se construye infraestructura adecuada como estaciones de servicio; y China, donde se brindan subsidios a la compra de este tipo de vehículos y se recompensa a las ciudades donde se matriculan (**Tabla 12**).

Tabla 12.

Fomento de vehículos a gas natural, eléctricos y/o con hidrógeno

Contenido	Bibliografía	País	Fomento de vehiculos a gas natural, eletricos y/o con hidrógeno
Disposiciones para la transición energética y la dinamización del mercado energético	Ley 2099 de 2021	Colombia	Deducción en el impuesto de renta, exclusión de IVA, exención de aranceles y depreciación acelerada
Impulsa el desarrollo bajo carbono del país mediante el establecimiento de las metas y medidas mínimas	Ley 2169 de 2021	Colombia	Programas para que un 30% de los vehículos de transporte público de pasajeros, particular, de carga y especial deban trabajar con gas combustible y/o hidrógeno
Promueve el abastecimiento, continuidad, confiabilidad y cobertura del gas combustible en el país	Ley 2128 de 2021	Colombia	Programas para que un 30% de los vehículos de transporte público de pasajeros, particular, de carga y especial deban trabajar con gas combustible y/o hidrógeno
Regulación del Hidrógeno en el mundo	CMS Law Tax Future, 2021	EEUU	Alianzas publico privada y subvenciones para el fomento de vehículos Infraestructura de abastecimiento de combustible adecuada para 2025 Incentivos financieros para la cadena de valor del hidrógeno
		China	Subsidios de compra de vehículos con pilas de combustible de hidrógeno (FCV) y recompensas por compensación a las ciudades en las que se matriculan

Nota. Elaboración propia, recopilación de información bibliográfica

8.3.8. Políticas y compromiso de los ministerios a fomentar el uso del hidrógeno

En la **Tabla 13** se evidencia que los 4 países estudiados comprometen al estado a fomentar el hidrógeno a través de políticas públicas y financiación de proyectos. Para el caso colombiano (mencionado **más atrás**), se destaca la regulación del uso de formaciones geológicas para almacenamiento de hidrógeno, la importación de autopartes y repuestos para los vehículos propulsados con hidrógeno, y la flexibilidad (proyectos sandbox) en la duración de proyectos relacionados con hidrógeno.

Tabla 13.

Políticas y compromiso de los ministerios a fomentar el uso del hidrógeno

Contenido	Bibliografía	País	Políticas y compromiso de los ministerios a fomentar el uso del hidrógeno
Promueve la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno	Decreto 1476 de 2022	Colombia	Compromete a gran parte de los ministerios a fomentar políticas públicas que faciliten el desarrollo del hidrógeno en el país
Ley de política energética EPA	Ley de Política Energética de 2005	EEUU	Compromete a otros sectores públicos a buscar disminuir la dependencia del petróleo del país, a través de políticas públicas y financiación de proyectos
Regulación del Hidrógeno en el mundo	CMS Law Tax Future, 2021	EEUU	Compromete a otros sectores públicos a buscar disminuir la dependencia del petróleo del país, a través de políticas públicas y financiación de proyectos
		China	Se promueve todo el tema referente al hidrógeno (producción, almacenamiento, vehículos, estaciones de servicio)
		Chile	Estrategia nacional de hidrógeno verde de 2020 a través de incentivos a 6 grandes productores y consumidores La Pontificia Universidad Católica de Chile desarrolla un eventual marco regulatorio

Nota. Elaboración propia, recopilación de información bibliográfica

8.3.9. Estaciones de servicio de hidrógeno

Uno de los temas que no se ve reflejado en las políticas públicas en Colombia es el tema de las estaciones de servicio de hidrógeno. Aunque indirectamente se ve reflejada en el compromiso que adquiere el Ministerio de Minas y Energía, al comprometerse a fomentar el hidrógeno en el país y en la reglamentación que ya existe para gases combustibles como el gas natural, aún no existen políticas concretas como en el caso de Estados Unidos donde se financian las estaciones de servicio por medio de alianzas publico privadas como en el caso de la Comisión de Energía de California (CEC), Shell, Toyota y Honda (**Tabla 14**).

Tabla 14.

Estaciones de servicio de hidrógeno

Contenido	Bibliografía	País	Estaciones de servicio
Regulación del Hidrógeno en el mundo	CMS Law Tax Future, 2021	EEUU	La Comisión de Energía de California "CEC" busca financiar 134 estaciones de servicio de hidrógeno adicionales Shell está entregando estaciones de servicio de hidrógeno junto con el apoyo de la CEC y otras grandes empresas como Toyota y Honda

Nota. Elaboración propia, recopilación de información bibliográfica

8.3.10. Flexibilidad en los proyectos “sandbox”

Finalmente, en cuanto a la flexibilidad en la regulación de los proyectos (sandbox) de hidrógeno, vemos que es un tema común en 3 de los 4 países estudiados (exceptuando Estados Unidos que contiene la mayor regulación referente al hidrógeno). El común denominador en los 3 casos es que las políticas se flexibilizan y adaptan a los proyectos según su evolución (**Tabla 15**), ya que permiten que la inversión no se vea ahogada por excesiva burocracia.

Tabla 15.*Flexibilidad en los proyectos "sandbox"*

Contenido	Bibliografía	País	Flexibilidad en los proyectos "sandbox"
Promueve la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno	Decreto 1476 de 2022	Colombia	El Ministerio de Minas y Energía desde el 2022 realiza el diseño e implementación del sandbox regulatorio para el sector energético para promover el hidrógeno
Regulación del Hidrógeno en el mundo	CMS Law Tax Future, 2021	China	Las políticas locales (estados y provincias) normalmente son pilotos que se acomodan a la nueva industria del hidrógeno
		Chile	El gobierno se compromete a ser flexible en la regulación de la industria mientras se acomodan inversores y nuevos proyectos en el país

Nota. Elaboración propia, recopilación de información bibliográfica

9. CONCLUSIONES

- Colombia tiene un potencial significativo para desempeñar un papel destacado en la producción de hidrógeno, aprovechando sus recursos naturales y su compromiso con la transición hacia energías limpias, con el objetivo de diversificar su matriz energética y reducir las emisiones de GEI. Sin embargo, el país se enfrenta a desafíos importantes relacionados con costos, su histórica dependencia de los hidrocarburos y la necesidad de expandir su infraestructura y capacidad de producción de hidrógeno. Además, la competencia internacional en el ámbito del hidrógeno y la volatilidad de los precios del petróleo son amenazas clave que deben abordarse.
- La adopción exitosa del hidrógeno como fuente de energía sostenible en Colombia depende de una sólida investigación que permita identificar y emplear las mejores técnicas de producción y almacenamiento de hidrógeno. Esta investigación es esencial para reducir los costos de implementación y garantizar que Colombia esté bien preparada para aprovechar las oportunidades que ofrece el hidrógeno en el contexto de la transición global hacia fuentes de energía limpias.
- A pesar de la histórica dependencia de Colombia en los hidrocarburos, esta industria muestra un compromiso notable con la transición energética. Esto se refleja en proyectos como la producción de hidrógeno verde y la movilidad impulsada por el hidrógeno, promoviendo así una transición energética justa y sostenible. Además, se destaca la inversión en investigación y proyectos para incorporar fuentes de energía más limpias en la matriz energética de Colombia, contribuyendo a una diversificación de la base energética y un futuro más sostenible en línea con objetivos ambientales globales.
- Las políticas y regulaciones actuales en Colombia representan un avance importante hacia el desarrollo del hidrógeno verde, azul y blanco; destacándose la exención de impuestos, fondos de financiamiento y compromiso de los ministerios de fomentar la cadena de valor del hidrógeno.
- Se recomienda implementar políticas públicas en Colombia encaminadas a la instalación de una mesa público privada a favor de los proyectos de hidrógeno, inversión en infraestructura de la cadena de valor del hidrógeno, como estaciones de servicio; e impuestos al carbono, con el fin de reducir las emisiones de GEI y acelerar la implementación de nuevas tecnologías como hidrógeno.

- La implementación del hidrógeno como fuente de energía alternativa ofrece una serie de fortalezas que van desde la reducción de emisiones de carbono y la diversificación energética hasta el fomento de tecnologías limpias y oportunidades económicas y sociales. Estas fortalezas hacen que el hidrógeno sea una opción atractiva en el contexto de la transición hacia una matriz energética más sostenible.
- Si bien el hidrógeno como fuente de energía alternativa ofrece beneficios significativos en varias áreas, también enfrenta amenazas y desafíos, como la competencia con las tecnologías existentes, la dependencia de recursos naturales limitados y riesgos de seguridad. Por lo anterior, desde la investigación realizada se recomienda que las amenazas expuestas sean abordadas para que la implementación del hidrógeno sea efectiva y sostenible.

10. BIBLIOGRAFÍA

- AES. (s.f.) *Los desafíos del hidrógeno verde en Colombia: Hacia una transición energética sostenible*. Recuperado de <https://acortar.link/f7OTHV>
- Aldana Rivera, S. E., & León Peñuela, F. A. (2022) *Hidrógeno en Colombia | Si se hace mal, podría ser peor. Reflexiones sobre su apuesta*. Bogotá D.C. Fundación Heinrich Boll. Recuperado de <https://acortar.link/U9k4WF>
- ANH. (s.f.). *Sector colombiano del petróleo y gas*. Recuperado de <https://acortar.link/bhr5zQ>
- Bertinat, P. (2016). *Transición energética justa. Pensando la democratización energética*. Recuperado de <https://acortar.link/19j1e6>
- BP. (2022). *Statistical Review of World Energy 2022*. Recuperado de <https://acortar.link/dbQlwm>
- CAMPETROL. (2023). *Balance Petrolero*. Recuperado de <https://campetrol.org/balance-petrolero/>
- Carvajal-Osorio, H., Babativa, J. & Alonso, J. (2010). *Estudio sobre producción de H con hidroelectricidad 2para una economía de hidrógeno en Colombia*. Recuperado de <https://acortar.link/VVeQxX>
- Castiblanco, O. y Cárdenas, D. J. (2020). Producción de hidrógeno y su perspectiva en Colombia: una revisión. *Gestión y Ambiente*, 23(2), 299–311. <https://doi.org/10.15446/ga.v23n2.86466>
- CEPAL (2019). *Seguridad energética*. Recuperado de <https://acortar.link/MZDPTL>
- Chi, J., & Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Chinese Journal of Catalysis*, 39(3), 390–394. doi:10.1016/s1872-2067(17)62949-8
- CMS Law Tax Future. (2021). *CMS Expert Guide to hydrogen energy law and regulation*. Recuperado de <https://acortar.link/J8QLUu>
- Cobo, M. I., Barraza, C. L., Cantillo, N. M. & Uribe, M. Á. (2022). *Recomendaciones para el desarrollo de la economía del hidrógeno en Colombia. Una estrategia nacional de hidrógeno*. Recuperado de <https://acortar.link/uzhm8v>
- Crespo Martínez, A., De Francisco García, A., Fernández González, J, Herrero García, M. Á., De Juana Sardón, J, y Santos García, F. (2003). *Energías renovables para el desarrollo*. Ediciones Paraninfo, SA. Recuperado de <https://acortar.link/B9QJ30>

Decreto 1073 de 2015. [Ministerio de Minas y Energía]. Por la cual medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía. 26 de mayo de 2015.

Decreto 1476 de 2022. [Ministerio de Minas y Energía]. Por el cual se reglamentan los artículos 21 y 23 de la ley 2099 de 2021 y se adiciona el título VII a la parte 2 del libro 2 del decreto 1073 de 2015, con el fin de adoptar disposiciones dirigidas a promover la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno. 03 de agosto de 2022.

Díaz, J. P. (2015). *Sistemas de energías renovables*. Ediciones Paraninfo. España. Recuperado de <https://acortar.link/vR5f1o>

Ecopetrol. (2016). *Grupo Ecopetrol anuncia compromiso y plan para lograr cero emisiones netas de carbono en 2050*. Recuperado de <https://n9.cl/xc6q73>

Ecopetrol. (2021). *Energía renovables- Renewable energy*. Recuperado de <https://acortar.link/ifp3kM>

Ecopetrol. (2022a). *El Grupo Ecopetrol inició la producción de hidrógeno verde en Colombia*. Recuperado de <https://n9.cl/jfs17>

Ecopetrol. (2022b). *Plan Estratégico de Hidrógeno del Grupo Ecopetrol - Ecopetrol Group Hydrogen Strategic Plan*. Recuperado de <https://acortar.link/UdKPGt>

Ecosmep (2011). *Ficha de datos de seguridad / Hidrógeno*. Recuperado de <https://acortar.link/Y6bEY3>

Enel (s.f.) *La transición energética*. Recuperado de <https://acortar.link/e5ySt4>

Figuerola, A. C. & Mojica, J. L. (2023). *Perspectiva sectorial energía. Actualidad del sector energético colombiano*. Recuperado de <https://acortar.link/HRMyuJ>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2016). *En 20 años Colombia aumentó en un 15% sus emisiones de CO2 equivalentes*. Recuperado de <https://n9.cl/dxf8z>

International Energy Agency (IEA). (2022). *Opportunities for Hydrogen Production with CCUS in China*. Recuperado de <https://acortar.link/S4MyEJ>

International Energy Agency (IEA). (2023). *Global Hydrogen Review 2023*. Recuperado de <https://acortar.link/XCqBxb>

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). *Green Hydrogen: A guide to policy making*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Recuperado de <https://acortar.link/ZzstjF>

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). *Perspectivas de la transición energética mundial: camino de 1.5 °C*. Recuperado de <https://acortar.link/152Gs4>

ITC. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Recuperado de <https://acortar.link/gJVTXO>

Ley 1715 de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. 13 de mayo de 2014. D.O. No. 49150.

Ley 2099 de 2021. Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones. 10 de julio de 2021. D.O. No. 51731.

Ley 2128 de 2021. Por medio de la cual se promueve el abastecimiento, continuidad, confiabilidad y cobertura del gas combustible en el país. 04 de agosto de 2021. D.O. No. 51756.

Ley 2169 de 2021. Por medio de la cual se impulsa el desarrollo bajo en carbono del país mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono neutralidad y resiliencia climática y se dictan otras disposiciones. 22 de diciembre de 2021. D.O. No. 51896.

Ley 2294 de 2023. Por el cual se expide el plan nacional de desarrollo 2022- 2026 “Colombia potencia mundial de la vida”. 19 de mayo de 2023. D.O. No. 52400.

Ley de Política Energética de 2005, Pub. L. No. 109-58, 119 Stat. 594 (2005). Recuperado de <https://acortar.link/1hro5z>

Ley de Reducción de la Inflación de 2022, H.R. 5376 — 117th Congress (2022). Recuperado de <https://acortar.link/z3WIC8>

Linares Llamas, P. (2018). *La transición energética*. Recuperado de <https://acortar.link/nsCtJ1>

Marchenko, O. V., & Solomin, S. V. (2015). The future energy: Hydrogen versus electricity. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(10), 3801–3805.
doi:10.1016/j.ijhydene.2015.01.132

Ministerio de Minas y Energía (s.f.). *Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia*. Recuperado de <https://n9.cl/mz5yk>

- Morales Ramos, A. C., Pérez Figueroa, M., Pérez Gallardo, J. R. y De León Almaraz, S. (2017). *Energías renovables y el hidrógeno: un par prometedor en la transición energética de México. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes.* (70), 92-101. Recuperado el 14 de agosto de 2023, de <https://n9.cl/fao78>
- Moreno, C. (2021). *Fuentes renovables de energía. Tecnología y aplicaciones.* Recuperado de <https://acortar.link/0p9Pm4>
- Naciones Unidas (s.f.) *Objetivos de Desarrollo sostenible* Recuperado de <https://acortar.link/137s>
- OLADE. (2020). *Análisis de los impactos de la Pandemia del COVID-19 sobre el sector energético de América Latina y el Caribe.* Recuperado de <https://acortar.link/ryDyGB>
- OMS (2021) *Cambio climático y salud.* Recuperado de <https://acortar.link/sYIFLH>
- Reyes, G., Santos, J. & Navarro, P. (s.f.). *La seguridad en la industria del hidrógeno verde. Gerencia de riesgos y seguros.* Recuperado de <https://acortar.link/yQXHTW>
- Sánchez, R. F. (2023). Diferencias estratégicas de las majors del petróleo ante la transición energética: opciones, motivaciones e implicaciones. *Arbor*, 199(807), a691-a691.
- Santoyo, E. & Barragán, R. M. (2010). *Energía geotérmica.* Recuperado de <https://acortar.link/L77o16>
- Schneider, H. (2021). *Hidrógeno verde en América Latina. Posibilidades, barreras y oportunidades.* Recuperado de <https://acortar.link/Ner1nY>
- Ullman, A. N. & Kittner, N. (2022). *Environmental impacts associated with hydrogen production in La Guajira, Colombia.* Recuperado de <https://acortar.link/gZw4Y0>
- UNFCCC. (s.f.). *United Nations Climate Change.* El acuerdo de París. Recuperado de <https://acortar.link/HypNwf>
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia.* Recuperado de <https://n9.cl/dg2psr>
- UPME. (2023). *Balance energético colombiano.* Recuperado de <https://acortar.link/L3dTzE>
- UPME. (s.f.). *Plan Energético Nacional 2020-2050. La transformación energética que habilita el desarrollo sostenible.* Recuperado de <https://acortar.link/gdhxUM>
- Vega, J. C. & Ramírez, S. (2014). *Fuentes de Energía, Renovables y no Renovables. Aplicaciones.* 1ra Edición. Alfaomega. México. Recuperado de <https://acortar.link/5YQMQi>

Viloria, J. R. (2013). *Energías renovables. Lo que hay que saber*. Ediciones Nobel. España.

Recuperado de <https://acortar.link/IWgh2I>

Yinglong Wang, Guoxuan Li, Zhiqiang Liu, Peizhe Cui, Zhaoyou Zhu, Sheng Yang. (2019).

Techno-economic analysis of biomass-to-hydrogen process in comparison with coal-to-hydrogen process. Recuperado de <https://acortar.link/VVJphg>