

El hidrógeno como alternativa principal de energía en la transición energética en Colombia

Johan Sebastián Culma Zota

Jorge Luis Turizo Montero

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Aristóbulo Bejarano W.

Máster en GT

Máster en economía

Ingeniero de Petróleos

UIS 1975

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Programa Académico

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Dedico este gran logro, principalmente a Dios, por haberme dado salud y vida; y, por guiarme siempre por el buen camino. Gracias a eso pude dar lo mejor de mí.

De igual manera, a mi madre, Maricela Zota, que ha sido mi motor y mi gran apoyo. Aquella que me enseñó a nunca darme por vencido o rendirme y que todo lo que me pueda proponer lo puedo lograr con mucha dedicación y esfuerzo.

A mi padre, Robinson Culma, que es mi amigo, mi compañero y un gran ejemplo a seguir. Le agradezco por tantas enseñanzas de vida que me ha dado. Este logro es para ti.

A mis hermanas, Michelt y María José, que me brindan amor a su manera y me han aconsejado en algunos momentos de mi vida, que me permitieron llegar hasta este punto.

A mi hermano, Robinson, le dedico este gran logro, por ser mi gran amigo, siempre brindarme su apoyo y cariño, y, finalmente espero seguir siendo esa figura que tanto admira.

A mis abuelos, que son de los primeros en demostrar la felicidad que sienten al verme cumplir los logros y metas que me propongo en la vida.

- Johan Sebastián Culma Zota
Ingeniero de Petróleos

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi director de tesis, Aristóbulo bejarano por su constante apoyo, compromiso y dedicación.

Gracias a todo el gremio de docentes, un agradecimiento por las enseñanzas y experiencias vividas en cada una de sus clases.

Por ultimo y no menos importante, quiero agradecerle a Angelica Ramirez, por su gran apoyo, comprensión y paciencia. Gracias a ella pude culminar este gran logro, que siempre tuvo disposición para colaborarnos en todo.

- Johan Sebastián Culma Zota

Ingeniero de Petróleos

Agradecimientos

Al padre de todo, por permitirme seguir con vida y sabiduría para enfrentar las situaciones difíciles.

A mi madre Jannys, quien me apoyo para seguir adelante y nunca me abandonó.

A mi mejor amigo Jorge, quien ha sido un hermano y por su respaldo constante e incondicional.

A mi compañero de tesis Johan, que más que ser un compañero fue un gran amigo a lo largo de esta carrera.

A mis amigos Juan, Sergio y Nicolas que sin su apoyo esto no habría sido posible.

A Aristóbulo Bejarano Wallens, M. Sc. Ingeniería de Petróleos y director del proyecto, por su paciencia, enseñanza y orientación para el manejo del tema escogido como tesis de grado.

A mi compañera Angelica por su paciencia y colaboración a lo largo de este proyecto.

- Jorge Luis Turizo Montero

Ingeniero de Petróleos

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Objetivos	20
1.1 Objetivo General	20
1.2 Objetivos Específicos.....	20
2. Hidrógeno	21
2.1 Propiedades físicas y químicas	21
2.1.1 Combustión del hidrógeno.....	22
2.2 Ventajas de producir hidrógeno	23
2.3 Desventajas de producir hidrógeno.....	24
2.4 Fuentes de energía principales para la producción de hidrógeno	25
2.4.1 Energía nuclear	26
2.4.2 Recursos renovables.....	26
2.4.3 Recursos no renovables.....	28
2.5 Producción de hidrógeno	37
3. Métodos de producción de hidrógeno a partir de recursos renovables.....	39
3.1 Por energía nuclear	39
3.1.1 Ruptura termoquímica del agua.....	39
3.2 Por energía renovable	39
3.2.1 Termólisis	39
3.2.2 Procesos fotoelectroquímicos	40
3.2.3 Procesos fotobiológicos	40

3.2.4	Electrolisis.....	41
3.2.5	Electrolisis a alta temperatura.....	42
3.2.6	Pirolisis	44
3.2.7	Gasificación	44
4.	Hydrocarburos para la generación de hidrógeno	45
4.1	Producción de hidrógeno a partir del gas natural.....	45
4.1.1	Reformado con vapor.....	45
4.1.2	Oxidación parcial del metano	46
4.1.3	Reformado autotérmico	48
4.1.4	Gasificación	50
4.2	Clasificación del hidrógeno	52
4.2.1	Hidrógeno Negro	53
4.2.2	Hidrógeno gris	53
4.2.3	Hidrógeno azul.....	53
4.2.4	Hidrógeno verde.....	53
4.2.5	Hidrógeno marrón.....	54
4.2.6	Hidrógeno turquesa.....	54
4.2.7	Hidrógeno amarillo	54
4.3	Pila de combustible como tecnología para el uso del hidrógeno	54
4.3.1	Componentes de una pila de combustible.....	54
4.3.2	Ventajas de la pila de combustible.....	56
4.3.3	Tecnologías existentes para pilas de combustible	57
4.4	Usos finales y aplicaciones del hidrógeno	59

4.4.1	Materia prima.....	60
4.4.2	Generación de calor	63
4.4.3	Transporte y movilidad.....	65
5.	Metodología de la investigación.....	67
5.1	Reservas de hidrocarburos	67
5.1.1	Reservas en Colombia.....	70
5.2	Relación reservas/producción	70
5.3	El índice de reposición de reservas (IRR).....	71
5.4	Planteamiento de escenarios	76
5.4.1	Escenario 1: Petróleo como materia prima para la producción de hidrógeno	77
5.4.2	Escenario 2: Gas natural como materia prima para la producción de hidrógeno .	84
5.4.3	Escenario 3: Carbón como materia prima para la producción de hidrógeno	87
6.	Análisis de los resultados.....	90
7.	Conclusiones.....	106
8.	Recomendaciones	107
	Referencias bibliográficas.....	108

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Propiedades del hidrógeno</i>	22
Tabla 2 <i>Contenido energético de diferentes combustibles</i>	24
Tabla 3 <i>Hidrocarburos acíclicos lineales</i>	28
Tabla 4 <i>Hidrocarburos acíclicos ramificados</i>	29
Tabla 5 <i>Hidrocarburos cíclicos</i>	29
Tabla 6 <i>Hidrocarburos saturados</i>	30
Tabla 7 <i>Hidrocarburos insaturados</i>	31
Tabla 8 <i>Hidrocarburos aromáticos</i>	32
Tabla 9 <i>Escala API</i>	34
Tabla 10 <i>Especificaciones según el tipo de pila</i>	57
Tabla 11 <i>Aspectos relacionados a las pilas de combustible</i>	58
Tabla 12 <i>Requerimientos de temperatura y energía por tonelada de producción de procesos industriales</i>	64
Tabla 13 <i>Histórico de reservas probadas, producción e incorporación anual de petróleo (MMbbl)</i>	75
Tabla 14 <i>Histórico de reservas probadas, producción e incorporación anual de gas (GPC)....</i>	75
Tabla 15 <i>Histórico de producción de petróleo 2011 - 2021</i>	77
Tabla 16 <i>Estimulación de la producción anual en la situación 1</i>	78
Tabla 17 <i>Extrapolación de las reservas de petróleo a cierre de año en la situación 1</i>	79
Tabla 18 <i>Base de cálculo para la situación 1</i>	80
Tabla 19 <i>Extrapolación de las reservas de petróleo a cierre de año en la situación 2</i>	81

Tabla 20	<i>Extrapolación de las reservas de petróleo a cierre de año en la situación 3</i>	82
Tabla 21	<i>Reservas de petróleo a simular</i>	83
Tabla 22	<i>Variación del IRR en la situación 4 del petróleo como materia prima</i>	84
Tabla 23	<i>Histórico de reservas de gas natural 2011 - 2021</i>	84
Tabla 24	<i>Reservas a simular en el escenario del gas natural</i>	86
Tabla 25	<i>Variación del IRR en la situación 4 del gas natural como materia prima</i>	87
Tabla 26	<i>Histórico de producción de carbón 2011 - 2021</i>	88
Tabla 27	<i>Estimación de reservas de carbón hasta el 2050</i>	88

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Fuentes de energía y procesos para la generación de hidrógeno</i>	38
Figura 2. <i>Diagrama de una celda electrolítica para producción de hidrógeno</i>	41
Figura 3. <i>Instalación comercial de producción de hidrógeno por medio de la electrolisis del agua.</i>	42
Figura 4 <i>Tipo de reformadores</i>	48
Figura 5 <i>Proceso de fabricación de hidrógeno por reformado</i>	49
Figura 6. <i>Participación de las fuentes para producción de hidrógeno en el mundo.</i>	52
Figura 7 <i>Celda electroquímica común de una pila combustible</i>	55
Figura 8 <i>Modo de operación y rango de temperatura de distintas tecnologías.</i>	58
Figura 9 <i>Funcionamiento del sistema CHP</i>	63
Figura 10 <i>Comparativo de reservas de petróleo 2021</i>	69
Figura 11 <i>Comparativo de reservas de gas natural 2021</i>	69
Figura 12 <i>Histórico reservas probadas, producción e incorporación anual de petróleo.</i>	72
Figura 13 <i>Reemplazo/Reposición histórico de reservas probadas de petróleo a 2021</i>	72
Figura 14 <i>Reemplazo/Reposición histórico de reservas probadas de gas natural a 2021</i>	73
Figura 15 <i>Producción de hidrógeno a partir del petróleo</i>	90
Figura 16 <i>Producción de hidrógeno a partir del gas natural</i>	91
Figura 17 <i>Potencial de producción de hidrógeno a partir del carbón</i>	92
Figura 18 <i>Potencial de producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles</i>	93
Figura 19 <i>Producción de hidrógeno a partir de petróleo con IRR alto</i>	94
Figura 20 <i>Producción de hidrógeno a partir del gas con IRR alto</i>	95

Figura 21 <i>Comparación de la producción de hidrógeno a partir de petróleo y gas natural con IRR alto</i>	96
Figura 22 <i>Producción de hidrógeno a partir del petróleo con IRR medio</i>	97
Figura 23 <i>Producción de hidrógeno a partir del gas natural con IRR medio</i>	98
Figura 24 <i>Comparación de la producción de hidrógeno a partir de petróleo y gas natural con IRR medio</i>	99
Figura 25 <i>Producción de hidrógeno a partir del petróleo con IRR bajo</i>	100
Figura 26 <i>Producción de hidrógeno a partir del gas natural con IRR bajo</i>	101
Figura 27 <i>Comparación de la producción de hidrógeno a partir de petróleo y gas natural con IRR bajo</i>	102
Figura 28 <i>Escenario 1: Producción de hidrógeno a partir del petróleo</i>	103
Figura 29 <i>Escenario 2: Producción de hidrógeno a partir del gas natural</i>	104
Figura 30 <i>Escenario 3: Producción de hidrógeno a partir del carbón</i>	105

Resumen

Título: El hidrógeno como alternativa principal de energía en la transición energética en Colombia*

Autores: Johan Sebastián Culma Zota** Jorge Luis Turizo Montero**

Palabras claves: Hidrocarburos, Hidrógeno, Dióxido de carbono, Energía, Transición energética, Producción, Reservas, Potencial, Huella de carbono, Vector energético.

Descripción:

La transición energética es uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo. Sin embargo, la necesidad de garantizar el acceso a la energía, que favorece la calidad de vida de los seres humanos y el desarrollo económico, es igual de importante. Por lo tanto, es esencial abordar el cambio climático como parte de la agenda de un desarrollo sostenible, donde, los continuos avances en el desarrollo de nuevas tecnologías generen esperanza respecto a nuevos efectos propicios medioambientales, que puedan producirse detrás del principio de funcionamiento y eficiencia de un nuevo sistema energético a partir de los combustibles fósiles.

Siendo así, se propone como solución a la problemática medioambiental, la generación de hidrógeno, a partir de hidrocarburos. Dando lugar, a una transición energética, con la cual se reduzca significativamente el impacto ambiental que se ha ido generando por el afán de abastecer la demanda energética en Colombia y en el mundo.

Para esto, se elabora un análisis del estado del arte relacionado al hidrógeno como fuente de energía alternativa a partir de los recursos no renovables presentes en Colombia y su respectivo porcentaje de conversión a hidrógeno. Donde, seguidamente a través del software “Evolución” se simulen y evalúen 3 escenarios que permitan estudiar la factibilidad de, ya sea, a mediano o largo plazo, una transición energética que minimice los daños ambientales a partir del hidrógeno como combustible.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Aristóbulo Bejarano

Abstract

Title: Hydrogen as the main energy alternative in the energy transition in Colombia*

Authors: Johan Sebastián Culma Zota** Jorge Luis Turizo Montero**

Key Words: Hydrocarbons, Hydrogen, Carbon dioxide, Energy, Energy transition, Production, Reserves, Potential, Carbon footprint, Energy vector.

Description:

The energy transition is one of the greatest challenges of our time. However, the need to guarantee access to energy, which favors the quality of life of human beings and economic development, is just as important. Therefore, it is essential to address climate change as part of the sustainable development agenda, where continuous advances in the development of new technologies will generate hope regarding new favorable environmental effects, which can affect the principle of operation and efficiency of a new energy system based on fossil fuels.

Thus, the generation of hydrogen from hydrocarbons is proposed as a solution to the environmental problem. Giving rise to an energy transition, with which the environmental impact that has been generated by the desire to supply the energy demand in Colombia and in the world is significantly reduced.

For this, an analysis of the state of the art related to hydrogen as an alternative energy source from the non-renewable resources present in Colombia and their respective percentage of conversion to hydrogen is elaborated. Where, then, through the "Evolution" software, 3 scenarios are simulated and evaluated that allow studying the feasibility of, either in the medium or long term, an energy transition that minimizes environmental damage from hydrogen as fuel.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Aristóbulo Bejarano W.

Introducción

Frente al escenario mundial, actualmente los combustibles fósiles dominan cerca del 75% total de producción y consumo de energía primaria, en base al petróleo, carbón y gas natural. Donde, la mayoría de las emisiones de CO_2 son provenientes del sector de electricidad y transporte, responsables de generar fuertes impactos medioambientales. Siendo así, se hace necesario un proceso de transición energética y descarbonización, en donde, el hidrógeno podrá desempeñar un papel decisivo y favorable.

En muchos sentidos el hidrógeno es el combustible perfecto. Además, de ser el elemento más abundante de la corteza terrestre, es eficiente y no produce emisiones cuando se usa en una celda de combustible. No es tóxico, puede producirse a partir de recursos renovables y no renovables, y, no es un gas de efecto invernadero. Muchos estudios han observado que el hidrógeno puede ser el único combustible alternativo que permita tanto asegurar una transición energética como reducir significativamente los gases de efecto invernadero. Además, el hidrógeno es un combustible en el que se depositan grandes esperanzas y se ha dedicado un gran esfuerzo investigador. Sin embargo, el hidrógeno es más que un combustible. Por un lado, tiene propiedades físicas y químicas muy diferentes de otros combustibles, y, al no es un recurso natural, no se encuentra libre en la naturaleza. Esto, debido a que se encuentra combinado en otros compuestos como los hidrocarburos y/o el agua.

El hecho de que el hidrógeno no se encuentre en la naturaleza de forma aislada hace que deba obtenerse por diferentes procesos. Lo que supone un cuello de botella para su futuro uso generalizado, y uno de los más importantes en el que se invierten más recursos, ya que muchos beneficios aportan su uso. puede ser negado dependiendo del proceso usado para obtenerlo. Una

vez fabricado, sus excepcionales propiedades físicas y químicas hacen muy difíciles las tareas de manipulación, especialmente las de almacenamiento, transporte y distribución.

Pero ¿cuál es la razón del porque centrarse en la “economía del hidrógeno”? Esto se puede explicar mediante motivos relevantes como:

- Razones para aumentar la eficiencia energética: La energía química producida por el hidrógeno se puede convertir directamente en energía eléctrica, sin la necesidad de transferirle calor a este ciclo. Esto, debido a una conversión directa lograda mediante métodos electroquímicos en celdas de combustible, que, redujeron el gasto energético y produjeron un aumento en la eficiencia. Lo anterior, induce a la reducción de la ineficiencia del ciclo termodinámico intermedio permitiendo superar las barreras que plantea para la eficiencia de los principios de Carnot y aumentando el rendimiento. La Energía eléctrica transformada mediante estos procesos, puede utilizarse como una energía limpia en fines estacionarios y transporte, debido a su viabilidad y alta eficiencia energética, ya que, produce tres veces más energía que un combustible tradicional. Incluso se puede usar en tecnología móvil, donde, los cartuchos de hidrógeno y celdas de combustible tomarían el lugar de las baterías convencionales.

- Razones medioambientales. Las razones ya mencionadas anteriormente, de forma indirecta, repercuten positivamente en el ecosistema. Existe una ventaja adicional para el uso con fines energéticos del hidrógeno: Su combustión solo produce como residuo vapor de agua, libre de CO₂. Reduciendo en un gran porcentaje las emisiones de CO₂, hasta ser casi nulas, favoreciendo las exigencias de las políticas de cambio climático actuales a nivel mundial.

En esta tesis se plantea un pilar fundamental en la construcción, generación y transición a una energía alterna, basada en el hidrógeno. Esto, con el fin, de implementar una transición

energética paulatina, viable y ecológica que favorezca a la industria petrolera, por medio de la mitigación de las emisiones de CO_2 y gases de efecto invernadero.

Examinando la prospectiva nacional en función a la producción del hidrógeno a partir de hidrocarburo, y, teniendo en cuenta que existe una carencia en la bibliografía relacionada con el tema en estudio, se propone examinar el uso y generación de hidrógeno, mediante un software y el estudio de la viabilidad de los resultados de este.

Planteamiento del problema

La industria petrolera busca tanto a nivel nacional como internacional, disminuir el impacto ambiental generado por ella. Su principal propósito es reducir la huella de carbono, y, a su vez las emisiones de CO_2 . Por ello, se está tomando un nuevo rumbo respecto a disminuir la dependencia de combustibles “convencionales” y su aporte significativo a este problema, ya que, en realidad puede ser una alternativa prometedora para proceso de transición energética a corto, mediano y largo plazo.

Al considerar los combustibles fósiles como el sistema energético que aporta $\frac{2}{3}$ partes de las emisiones globales de CO_2 y representar alrededor del 80% de la demanda energética primaria a nivel mundial, hace que la transición energética necesariamente se enfoque de manera particular en la industria petrolera y una transformación progresiva.

El cambio climático es uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo. Sin embargo, la necesidad de garantizar el acceso a la energía que favorece la calidad de vida de los seres humanos y el desarrollo económico es igual de importante. Por lo tanto, es esencial abordar el cambio climático como parte de la agenda de un desarrollo sostenible, donde, los continuos avances en el

desarrollo de nuevas tecnologías han generado esperanza respecto a la generación de efectos propicios medioambientales, que podrían generarse detrás del principio de funcionamiento y eficiencia de un nuevo sistema energético, como el que se propone en el actual documento.

Una de las posibles soluciones a este problema medioambiental, es por medio de la generación de hidrógeno a partir de hidrocarburos. Dando lugar, a una transición energética, con la cual se reducirá significativamente el impacto ambiental generado por el afán de abastecer la demanda mundial de los combustibles fósiles.

Alcance

Se busca elaborar un análisis del estado del arte relacionado al hidrógeno, al proponerse como una fuente de energía alternativa. Se considerará principalmente la obtención del hidrógeno a partir de recursos no renovables presentes en Colombia, mediante la recopilación de datos basados en la disponibilidad de hidrocarburos y su respectivo porcentaje de conversión a hidrógeno. Esto, con el fin de evaluar distintos escenarios que podrían permitir a medio o largo plazo una transición energética, que minimice los daños ambientales.

Este proyecto se estructurará desde la recopilación de información acerca del hidrógeno como una energía alterna, sus características básicas, métodos de obtención, aplicación, hasta su potencial y beneficios de emplearse como un nuevo sistema de generación energética. Donde, se evaluarán 3 escenarios y distintas variables dentro de una simulación de generación y producción de hidrógeno en los yacimientos colombianos de hidrocarburos. (Prospectiva a partir de la Dinámica de Sistemas, software disponible en la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la UIS).

Justificación

Colombia y sus reservas, investiga un medio para generar energía limpia y eficiente, que pueda mitigar los efectos adversos generados en la capa de ozono a través de una transición energética sólida. Para la cual, se presenta como solución la generación de hidrógeno a través de diferentes métodos de producción relacionados a los recursos no renovables. Donde, además, de mitigar el daño ambiental producido por el 0,4% de las emisiones de CO_2 generados por la nación, podría favorecer en aumentar la gran oferta que se requiere para suplir la necesidad constante de energía en el país y el mundo.

Debido al cambio climático producido por las diferentes acciones indebidas e inconscientes de la humanidad, y, a los diversos factores naturales que alertan a los gobernantes en todo el mundo. En Colombia, se desarrolló el plan energético Nacional y la ley 1715 de mayo 2014, encargada de plantear y promover la implementación de energías alternativas renovables con bajos impactos ambientales. Según, el Sistema De Información Eléctrico Colombiano, más del 60% de la energía eléctrica que consumen los colombianos, es generada por las centrales hidroeléctricas. Estas centrales utilizan el agua como insumo para la generación de energía. Así mismo, plantean que la segunda fuente principal de generación de energía eléctrica en Colombia utiliza recursos fósiles como el petróleo, gas y carbón cuyas reservas se están agotando.

Según el artículo 1, la ley 1715 de mayo 2014 tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de fuentes no convencionales, con el propósito de buscar y promover una gestión eficiente de la energía y sistemas de medición inteligente, que comprenden tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda colombiana.

Por lo anterior, concluimos que: Para un desarrollo económico dentro de la nación, por medio de las energías renovables y la adaptación de las no renovables en función de una transición energética paulatina que disminuya la emisión de gases de efecto invernadero, se hace necesario la implementación de una nueva fuente de energía limpia y eficiente a través de la producción de hidrógeno derivado de los hidrocarburos.

Por tal motivo, la implementación de esta fuente de energía podría mantener y/o aumentar el aporte que genera el sector de los hidrocarburos con relación al 3,3% del producto interno bruto (PIB) y el 40% de las exportaciones del país. Así como también, mejorar la economía por medio de la creación de nuevos puestos de trabajo.

Esta transición energética, por medio de la transformación, creación o adaptación de los diferentes métodos de producción de hidrógeno a través de hidrocarburos, podría reducir o anular los efectos negativos proporcionados por la industria petrolera, en el cumplimiento exigido por el acuerdo de París de reducir el 20% de sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para el año 2030.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la obtención de hidrógeno a partir de hidrocarburos para la transición energética en Colombia.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar revisión bibliográfica del hidrógeno como energía alterna.
- Evaluar el uso de hidrocarburos para la generación de hidrógeno.
- Dar a conocer las diferentes fuentes y tecnologías generadoras de hidrógeno.
- Simular tres escenarios de un software para la producción de hidrógeno en Colombia a partir de hidrocarburos.

2. Hidrógeno

El hidrógeno es el elemento químico representado por el símbolo H, que, en condiciones normales se presenta como un gas diatómico (H_2). El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro e insípido, no metálico y altamente inflamable. Así mismo, es el elemento más abundante (constituyendo aproximadamente el 75% de la materia del universo) y 14,4 veces más ligero que el aire, caracterizándolo como el elemento químico más ligero.

Korshennikov (2003), refiere que el isótopo del hidrógeno más común en la naturaleza, conocido como protio, tiene un solo protón y ningún neutrón; y, en los compuestos iónicos, el hidrógeno puede adquirir carga positiva (convirtiéndose en un catión compuesto únicamente por el protón) o negativa (convirtiéndose en un anión conocido como hidruro).

Además, el hidrógeno al unirse con la mayoría de los elementos puede formar compuestos químicos, como el agua y compuestos orgánicos.

2.1 Propiedades físicas y químicas

Su masa atómica y molecular son $1,007940 \frac{Kg}{Kmol}$ y $2,01588 \frac{Kg}{Kmol}$ respectivamente, para el H y el H_2 . Este, posee una temperatura de fusión de $-259,2^\circ C$ ($14,025^\circ K$) y de ebullición en el orden de $-252,77^\circ C$ ($20,268^\circ K$)

Así mismo, la constante específica del gas¹, se puede expresar como:

$$R' = \frac{R}{M(H_2)} = \frac{8314 \frac{J}{Kmol K}}{2,01588 \frac{Kg}{Kmol}} = 4124,3 \frac{J}{kg K}$$

¹ La constante específica del gas es equivalente a la constante universal de los gases entre el peso molecular del H_2 .

El hidrógeno se presenta en 3 isótopos naturales: el hidrógeno-1, el hidrógeno-2 y el hidrógeno 3, conocidos como protio, deuterio y tritio respectivamente; que, contarían con un protón, un protón y un neutrón; y, un protón y dos neutrones. En condiciones de laboratorio se ha alcanzado a sintetizar 5 isótopos adicionales: hidrógeno-4, hidrógeno-4.1, hidrógeno-5, hidrógeno-6 e hidrógeno-7.

Tabla 1*Propiedades del hidrógeno*

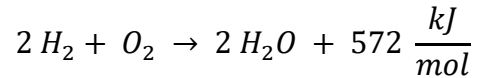
Densidad	0,0899 Kg/Nm³ (gas)
	0,0708 Kg/l (liquido)
Poder calorífico	Inferior: 210 MJ/Kg
	Superior: 141,86 MJ/Kg
Límites de infalibilidad	4,0 - 75,0 %
Límites de detonación	18,3 - 59,0 %
Coefficiente de difusión	0,61 cm²/s

Nota. Las propiedades del hidrógeno se pueden resumir mediante la presente tabla.

2.1.1 Combustión del hidrógeno

El hidrógeno en forma gaseosa es muy inflamable y arde en bajas concentraciones en aire de hasta 4% de H₂. Este, al reaccionar junto con oxígeno (O₂), se puede obtener un desprendiendo energía y formación de agua. Esta reacción es conocida como combustión, donde el hidrógeno actúa como combustible con una entalpia cercana a $-286 \frac{kJ}{mol}$.

La reacción de combustión nombrada anteriormente es la siguiente:



Cuando se mezcla altos porcentajes de oxígeno, el hidrógeno explota. En el aire, el hidrógeno arde violentamente y sus llamas son casi invisibles al ojo humano.

2.2 Ventajas de producir hidrógeno

La producción de hidrógeno presenta ciertas ventajas, relacionadas a factores como:

- Es el elemento químico más ligero, simple y abundante en el universo.
- Solo se produce en combinación con otros elementos, como el oxígeno en el agua; y, con carbono, nitrógeno y/o oxígeno, presentes en la materia orgánica y los combustibles fósiles.
- Provee una mejor calidad del aire urbano, debido a que, sus emisiones son limpias.
- Al combinarse con el oxígeno, no genera CO_2 , gases de efecto invernadero o emisiones de CO_x dentro de las celdas de combustible.
- El agua es el único subproducto generado por la producción de hidrógeno.
- Establece reducción en el costo de las importaciones de petróleo.
- Por medio del aprovechamiento de fuentes de energía renovable, se establece una viabilidad económica frente a futuros mercados energéticos.
- Provee una elevada participación de energía por unidad de masa en relación con los combustibles fósiles.

La Tabla 2 evidencia un cotejo entre los diferentes valores de aporte energético que poseen los combustibles.

Tabla 2*Contenido energético de diferentes combustibles*

Combustible	Contenido energético (MJ/Kg)
Hidrógeno	120
Gas natural licuado	54.4
Propano	49.4
Gasolina automotriz	46.4
Diesel automotriz	45.6
Etanol	26.9
Metanol	19.7
Coque	27
Madera	16.2
Bagazo	9.6

Nota. Adaptado de: *Métodos amigables de producción de hidrógeno como fuente de energía limpia* (p. 97), por Venegas et al., 2016. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/77368>

2.3 Desventajas de producir hidrógeno

- Se deben resolver los inconvenientes futuros relacionados a la seguridad energética y aspectos ambientales relacionados a varios métodos de producción de hidrógeno.
- Es dificultoso propiciar ciertas condiciones que necesariamente deben poseer las instalaciones para el almacenamiento estacionario y móvil del hidrógeno. Esto, debido

- a que, el hidrógeno presenta bajos puntos de ebullición y densidad, viscosidad y coeficiente de difusión del aire
- Debido al tamaño de su molécula, el hidrógeno tiende a escapar a través de los poros del contenedor donde se almacene. Este, actualmente se almacena como gas en vehículos que provean presión de hasta 700 bar, o, como un líquido en contenedores criogénicos.

2.4 Fuentes de energía principales para la producción de hidrógeno

El hidrógeno puede producirse a partir de diferentes y abundantes precursores, donde, a través de diferentes tecnologías y un aporte energético, se produce la ruptura de los enlaces moleculares que lo contienen, para proceder a ser almacenado, transportado y utilizado en diferentes aplicaciones.

En la actualidad existen tres fuentes principales para la producción del hidrógeno. La primera fuente es la energía nuclear, la segunda es de recursos renovables que comprende la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica, y la biomasa. La tercera fuente hace referencia a los recursos no renovables o fósiles que están constituidas por el gas natural, el petróleo, el carbón. De todas ellas la fuente más grande es el gas natural, sin embargo, para obtener el hidrógeno de cualquiera de estas fuentes, cada una de ellas exige un proceso químico muy particular.

2.4.1 Energía nuclear

2.4.1.1 Energía calorífica. La energía calórica, calorífica o térmica, es el tipo de energía que se libera en forma de calor. Al estar en constante tránsito, el calor puede pasar de un cuerpo a otro (cuando ambos tienen diferentes niveles calóricos) o ser transmitido al medio ambiente. Dicho en otras palabras, la energía térmica, se encarga de generar el movimiento interno de las partículas de un cuerpo (energía cinética), que aumenta o disminuye por medio de la transferencia de energía bajo forma de calor o de trabajo.

2.4.2 Recursos renovables

2.4.2.1 Energía solar. Esta energía proviene de una fuente natural e inagotable como lo es el sol, la cual se obtiene a través de la radiación electromagnética que llega a la tierra en forma de luz, calor y rayos ultravioleta. Esta radiación solar se puede captar a través de células fotoeléctricas que están conformadas por paneles fotovoltaicos. Dependiendo del procesamiento que se le da a esa energía solar, se puede clasificar en 3 tipos de energía solar: energía solar térmica, energía solar fotovoltaica y energía solar pasiva.

2.4.2.2 Energía eólica. La energía eólica se obtiene a partir de la fuerza del viento. Donde, a través de un aerogenerador, se transforma la energía cinética (presente en las corrientes de aire) en energía eléctrica. Este, se realiza gracias al rotor, que transforma la energía cinética en energía mecánica, y al generador, que transforma dicha energía mecánica en eléctrica. Al hablar de la energía eólica, se relaciona de una fuente de energía renovable, eficiente, madura; y, de una segura clave para la transición energética y la descarbonización de la economía.

2.4.2.3 Energía hidráulica. La energía hidráulica refiere la energía que aprovecha el movimiento del agua para generar energía. Su obtención se debe al aprovechamiento de la energía cinética y potencial de las fuentes de agua o corrientes, donde, el mismo movimiento del agua hace girar una turbina, que está conectada a un transformador encargado de producir la energía eléctrica.

Generalmente la energía hidráulica es considerada como un tipo de energía renovable, debido a que, no emite productos contaminantes. Sin embargo, otros consideran que esta es la responsable de producir un gran impacto ambiental a través de la construcción de presas, que inundan grandes superficies de terreno y modifican el caudal del río y la calidad del agua.

2.4.2.4 Energía geotérmica. La energía geotérmica o geotermia, se produce mediante el aprovechamiento del calor interno de la Tierra. Esta, refiere un recurso inmenso, una fuente de energía renovable, sostenible e inagotable.

La energía geotérmica viene del calor de la roca fundida, o magma, que se encuentra en las profundidades de la Tierra y que sube a través de las grietas de la corteza terrestre. La mayor parte de las centrales geotérmicas existentes son hidrotermales, que se alimentan del agua caliente cercana a la superficie de la Tierra a través de grietas en su corteza.

Lo mejor de la energía geotérmica es que no existe la necesidad de limitar los puntos calientes hidrotermales, debido a que, utilizando los mismos métodos de perforación de la industria petrolera, se puede crear propios puntos calientes. Siendo así, prácticamente se obtiene una cantidad ilimitada de este tipo de energía.

2.4.2.5 Biomasa. También es conocida como bioenergía, la cual se obtiene a partir de la materia orgánica de los seres vivos, como los excretos y los restos no vivos. Esta, se forma a partir de la energía solar, la cual se lleva a cabo por el proceso de la fotosíntesis.

2.4.3 Recursos no renovables

2.4.3.1 Hidrocarburos. Los hidrocarburos son compuestos orgánicos cuya estructura molecular contiene la unión de carbono e hidrógeno, presentándose en la naturaleza como gases, líquidos, grasas y, a veces, sólidos. Son compuestos muy simples y comúnmente son considerados como las sustancias principales en las cuales se derivan todos los demás compuestos orgánicos.

Los hidrocarburos se clasifican con relación a dos criterios posibles: su tipo de estructura y los tipos de enlace entre sus átomos.

Según la estructura de los hidrocarburos, se obtiene:

- Hidrocarburos acíclicos o de cadenas abiertas

Son aquellos hidrocarburos poseedoras de una cadena de moléculas particular, debido a que, no se cierra sobre sí misma. A su vez, estos pueden dividirse en hidrocarburos lineales e hidrocarburos ramificados.

Tabla 3

Hidrocarburos acíclicos lineales

Nombre	Estructura molecular
Propano	$\text{CH}_3\text{—CH}_2\text{—CH}_3$
Propeno	$\text{CH}_2=\text{CH—CH}_3$

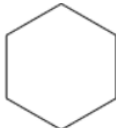

Tabla 4*Hidrocarburos acíclicos ramificados*

Nombre	Estructura molecular
2-metilbutano	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$
4-etil-3-metilheptano	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$

- Hidrocarburos cíclicos o de cadenas cerradas

Son aquellos hidrocarburos cuya cadena de moléculas se cierra sobre sí misma. A su vez, estos pueden subdividirse en hidrocarburos monocíclicos e hidrocarburos policíclicos.

Tabla 5*Hidrocarburos cíclicos*

Nombre	Estructura molecular
Hexano	
Propeno	

Según el tipo de enlace entre los hidrocarburos, se obtiene:

- Hidrocarburos alifáticos

Su nombre procede del griego aleiphar, que significa “grasa”, debido a que anteriormente se obtenían a partir de la descomposición de aceites y grasas.

Estos hidrocarburos carecen de anillo aromático y se clasifican en saturados (poseen enlaces atómicos simples) e insaturados (poseen al menos un enlace múltiple, doble o triple). En otras palabras los alifáticos se clasifican a su vez en alcanos, alquenos y alquinos según el tipo de enlace que se unen entre los átomos de carbono.

Las fórmulas generales de los alcanos, alquenos y alquinos son C_nH_{2n+2} , C_nH_{2n} y C_nH_{2n-2} , respectivamente.

Tabla 6

Hidrocarburos saturados

Alcanos (C_nH_{2n+2})			
Nombre	Formula	Nombre	Formula
Metano	CH_4	Hexano	C_6H_{14}
Etano	C_2H_6	Heptano	C_7H_{16}
Propano	C_3H_8	Octano	C_8H_{18}
Butano	C_4H_{10}	Nonano	C_9H_{20}
Pentano	C_5H_{12}	Decano	$C_{10}H_{22}$

Tabla 7*Hidrocarburos insaturados*

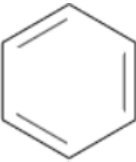
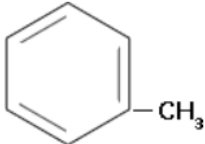
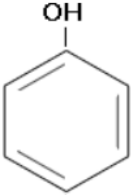
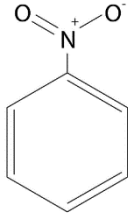
Alquenos (C_nH_{2n})		Alquinos (C_nH_{2n-2})	
Nombre	Fórmula	Nombre	Fórmula
Eteno	C_2H_4	Etino	C_2H_2
Propeno	C_3H_6	Propino	C_3H_4
Buteno	C_4H_8	Butino	C_4H_6
Penteno	C_5H_{10}	Pentino	C_5H_8
Hexeno	C_6H_{12}	Hexino	C_6H_{10}
Hepteno	C_7H_{14}	Heptino	C_7H_{12}
Octeno	C_8H_{16}	Octino	C_8H_{14}
Noneno	C_9H_{18}	Nonino	C_9H_{16}
Deceno	$C_{10}H_{20}$	Decino	$C_{10}H_{18}$

- Hidrocarburos aromáticos

Presentan al menos una estructura que cumple la regla de Hückel².

² La regla de Hückel define que la estructura cíclica de todos sus carbonos sean de hibridación sp^2 y que el número de electrones en resonancia sea par no divisible entre 4.

Tabla 8*Hidrocarburos aromáticos*

Nombre	Estructura molecular
Benceno	
Tolueno	
Fenol	
Nitrobenceno	

Los hidrocarburos extraídos directamente de formaciones geológicas en estado líquido se conocen comúnmente con el nombre de petróleo, mientras que los que se encuentran en estado gaseoso se les conoce como gas natural.

2.4.3.1.1 *Petróleo.* El petróleo es un combustible fósil natural constituido por una mezcla de compuestos orgánicos (llamados hidrocarburos) acompañado de ciertas cantidades de azufre, oxígeno y nitrógeno. El petróleo es un aceite mineral de color muy oscuro, menos denso

que el agua y de un olor acre característico, donde, su poder calorífico oscila entre las 37600 y 46000 kJ/kg .

En condiciones normales es un líquido bituminoso que puede presentar gran variación en diversos parámetros como color y viscosidad (desde amarillentos y poco viscosos como la gasolina hasta líquidos negros tan viscosos que apenas fluyen), densidad (entre 0,75 g/ml y 0,95 g/ml), capacidad calorífica, etc. Estas variaciones se deben a la diversidad de concentraciones de los hidrocarburos que componen la mezcla.

El Petróleo se puede clasificar según los llamados crudos de referencia (Brent Blend, West Texas Intermediate, etc) o según su gravedad API.

El valor de temperatura estándar de la medición es de 60 °F y la fórmula utilizada para su cálculo es:

$$\text{Gravedad API} = \frac{141,5}{\text{gravedad específica}} - 131,5$$

Donde,

$$GE = \frac{\rho \text{ líquido}}{\rho \text{ agua}}$$

En relación con su gravedad API, los crudos pueden ser ligeros, medianos, pesados y extrapesados.

Tabla 9*Escala API*

Tipos de crudo	Escala °API
Condensado	Mayor a 42
Liviano	30 – 41,9
Mediano	22 – 29,9
Pesado	10 – 21,9
Extrapesado	Menor a 10

La gravedad API, de sus siglas en inglés American Petroleum Institute, es una medida de densidad que describe el peso relativo del petróleo en relación con el agua. Es usado para comparar densidades de fracciones extraídas de petróleo. Se mide con un instrumento llamado densímetro y no tiene unidades, aunque siempre se le coloca al número la denominación °API.

2.4.3.1.2 Gas natural. El gas natural o gas fósil, es una mezcla de hidrocarburos ligeros. Principalmente, este tipo de gas contiene metano (alrededor de 80%), etano (6%), propano (4%) y butano (2%); también están presentes algunas impurezas tales como vapor de agua, compuestos sulfurados, dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno (N_2) y trazas de hidrocarburos más pesados. Su composición varía de acuerdo con el yacimiento de donde fue extraído (Martínez, 2000).

El gas natural es un hidrocarburo que puede encontrarse en subsuelos marinos y continentales. Sin embargo, este recurso, tal y como se encuentra en la naturaleza, posee impurezas que lo cohiben de cumplir con ciertas especificaciones de la legislación vigente en cada país para

ser utilizado. Para resolver esto, el gas natural debe ser sometido previamente a diferentes tratamientos, donde, uno de los procesos más importantes es el denominado endulzamiento.

El proceso de endulzamiento se emplea con el fin de retirar el H_2S y el CO_2 presente en el gas natural, debido a que, estos compuestos que pueden ocasionar problemas en el manejo y procesamiento del gas natural; así como también problemas de corrosión, olores desagradables, emisiones de compuestos causantes de lluvia ácida, entre otros.

2.4.3.2 Carbón. Es una roca sedimentaria en forma de pizarra con altos contenidos de carbón, utilizada como combustible fósil y extraído de minas a cielo abierto o subterráneas. Este, representa el primer combustible fósil usado por el hombre, y, cuenta con abundantes reservas tanto en el mundo como en Colombia.

El carbón es el resultado final de un conjunto de transformaciones expuestas sobre la acumulación de restos vegetales, depositados en lugares pantanosos y deltas fluviales; que, por diversas acciones químicas, variaciones de presión y temperatura (dentro del período carbonífero de la era primaria), se transformaron en carbón por acción de un proceso llamado carbonización.

Los cambios que dan lugar a la transformación de los restos vegetales en carbón se clasifican en cambios químicos y estructurales.

- Cambios químicos: en estos se presenta el desprendimiento de hidrógeno y oxígeno a medida que la proporción de carbono aumenta.
- Cambios estructurales: son los cambios donde la estructura fibrosa de la madera se transforma en una estructura microcristalina distinta para cada tipo de carbón; su color cambia de pardo a negro.

2.4.3.2.1 Clasificación del carbón. A causa de la clase de vegetal del que procede el carbón, de la duración y condiciones de presión y temperatura del proceso de carbonización, existe cierta clasificación para el carbón.

- Antracita: es un carbón duro, totalmente carbonizado, compacto y brillante. Posee cierto brillo nacarado y color negro.
- Hulla: es un carbón duro, totalmente carbonizado, de color negro lustroso y brillo nacarado, con bandas brillantes y mates.
- Lignito: es un carbón blando que no ha sufrido el proceso de carbonización completo. Por consiguiente, este posee un aspecto a madera quemada y brillo a trozos.
- Turba: es un carbón blando, de color marrón y ligero de peso. En él se observan todavía restos de plantas, debido a ser el más reciente de los carbones.

El potencial calorífico de estos carbones oscila entre 2.000 a 7.000 kcal/kg, desde la antracita y hulla hasta lignito y turba. Así mismo, su humedad posee valores del 3% al 40% y presenta contenido de sustancias volátiles que pueden ir desde el 8% hasta el 50%. Como principal impureza se presentan trazas de azufre (S) y nitrógeno (N), donde, al quemarse el carbón, se liberan en forma de SO_2 y NO_x . Estos, se pueden unir posteriormente al vapor de agua de la atmósfera y producir lluvias ácidas.

Adicionalmente, debido a las emisiones de CO_2 y su penalidad expuesta por los acuerdos ambientales, en la actualidad se emprenden importantes investigaciones relacionadas al secuestro del CO_2 emitido, ya sea, mediante su bombeo a formaciones geológicas o a la aplicación de sistemas de filtrado de las impurezas antes mencionadas.

2.4.3.2.2 Aplicaciones del carbón

Las aplicaciones más importantes del carbón son:

- La antracita y la turba son usadas fundamentalmente como combustible doméstico e industrial.
- La destilación seca de la hulla da paso a cuatro fracciones: amoníaco, alquitrán, gas natural y coque. Donde, este último se emplea en procesos metalúrgicos del hierro y del acero (siderurgia).
- El lignito se emplea principalmente en centrales térmicas, a fin de obtener energía eléctrica.

En el ámbito colombiano, la producción anual de carbón rodea un total 85 millones de toneladas, que lo posiciona como el producto minero que genera un mayor aporte de PIB, conformando entre 15 al 20% del PIB minero del país y entre 1,5 a 2% del PIB nacional. En la actualidad, el país cuenta con unas reservas de carbón medidas del orden de los 6.500 millones de toneladas y unos recursos potenciales estimados en 15.000 millones de toneladas.

2.5 Producción de hidrógeno

Pero ¿de dónde viene todo el hidrógeno? Como hemos comentado anteriormente, aunque el hidrógeno es una forma esencial para la vida al formar parte de casi toda la materia orgánica y es abundante en el universo, no se encuentra fácilmente libre en la Tierra o de forma natural como H_2 . El hidrógeno se presenta unido con otras moléculas formando compuestos, tales como el agua (proporción del 11,19 % en peso) al unirse con oxígeno, o unido al carbono (formando compuestos orgánicos) como la biomasa y presente en hidrocarburos, especialmente el metano (CH_4).

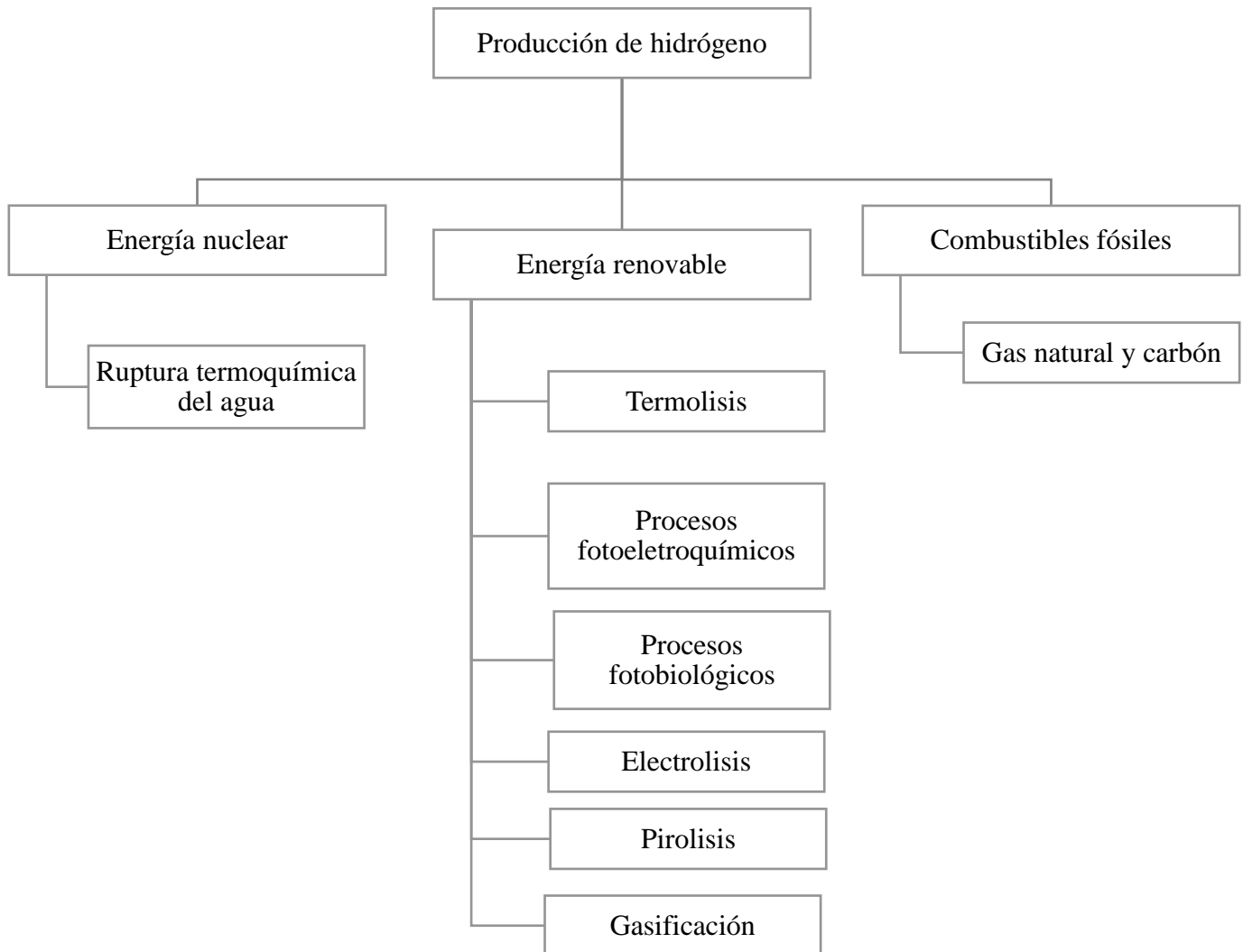
Como se indica en el inciso anterior, estos procesos pueden darse a través de un aporte energético otorgado por fuente como la energía nuclear y la energía obtenida a partir de los recursos renovables y no renovables; que, seguidamente, mediante diferentes procesos y

tecnologías, otorgan transformaciones térmicas, químicas o electroquímicas de diferentes compuestos que abundan en la naturaleza a fin de obtener hidrógeno.

La figura 1, ilustra las principales fuentes energía para los diferentes procesos que relacionan la obtención de hidrógeno.

Figura 1

Fuentes de energía y procesos para la generación de hidrógeno



3. Métodos de producción de hidrógeno a partir de recursos renovables

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, los métodos de producción de hidrógeno a partir de recursos renovables se pueden categorizar según el aporte energético utilizado en cada uno de estos procesos.

3.1 Por energía nuclear

Con relación a la energía nuclear, la producción de hidrógeno es posible mediante diversos esquemas. Estos incluyen la conversión térmica nuclear del agua, a través de procesos químicos, tales como el ciclo de sodio-yodo y electrólisis del agua utilizando energía nuclear.

Aparte de ello, la literatura expone diferentes ciclos termoquímicos relacionados con la eficiencia de los procesos presentes en la termólisis del agua. Estos ciclos, son implementados por medio de grandes concentraciones de energía solar o energía nuclear.

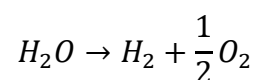
3.1.1 Ruptura termoquímica del agua

Es un ciclo termoquímico que divide el agua y no requiere catálisis para conducir el producto químico. A excepción del agua (que es la fuente ante la producción de hidrógeno), todos los productos químicos empleados en la termoquímica pueden ser reutilizados. Así mismo, en este tipo de procesos, no existe la necesidad de membranas de separación entre el H_2 y O_2 y posee bajo requerimiento en energía eléctrica.

3.2 Por energía renovable

3.2.1 Termólisis

La termólisis del agua al ser una reacción de disociación ocurre en un solo paso:



Esta reacción aparentemente sencilla, presenta dos graves inconvenientes. En primera instancia se utilizan elevadas temperaturas que oscilan alrededor de los 2500°K para conseguir un grado de disociación razonable, que, disminuyen la eficiencia de absorción e incitan un aumento de las pérdidas por re-radiación solar. Así mismo, este procedimiento requiere una técnica efectiva de separación entre el hidrógeno y el oxígeno, a fin de evitar una mezcla explosiva.

En consecuencia, lo anterior es la causa de que no exista hoy día una planta piloto dispuesta para la descomposición directa del agua.

3.2.2 *Procesos fotoelectroquímicos*

El proceso fotoelectroquímico es una línea que está despertando especial interés en EE. UU. Este, posee la capacidad de dividir la molécula de agua en oxígeno e hidrógeno, usando como fuente única de energía, la luz solar; a causa de que, el sistema de recolección de radiación genera suficiente voltaje para descomponer el agua.

El atractivo de este tipo de tecnología radica en que ofrece un gran potencial de reducción de costos, no necesita cableado o convertidores externos y ofrece una eficiencia un 30% mayor que la electrólisis realizada mediante células fotovoltaicas.

3.2.3 *Procesos fotobiológicos*

La producción fotobiológica de hidrógeno es un proceso realizado mediante un sinnúmero de organismos, que van, desde procariotas a eucariotas y desde fotolitotrofos a quimioorganotrofos.

En los microorganismos fotosintéticos, la hidrogenasa y la nitrogenasa son las únicas dos enzimas implicadas en la producción de hidrógeno; mientras que, en los microorganismos no fotosintéticos varían las rutas fermentativas empleadas para la producción de hidrógeno.

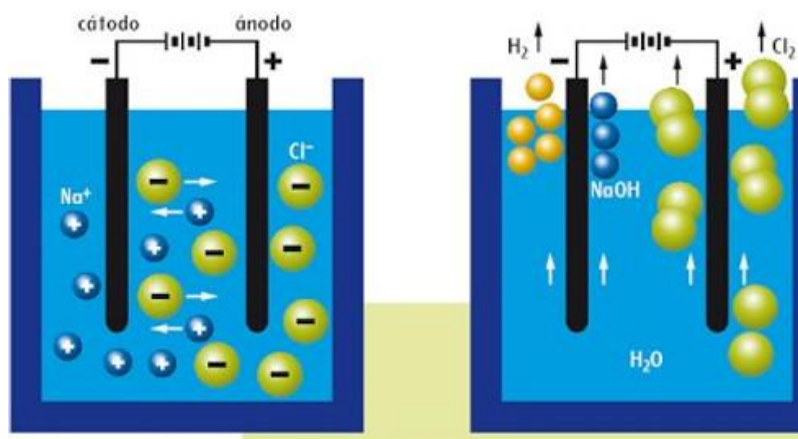
3.2.4 *Electrolisis*

La electrólisis separa los elementos de un compuesto a través de la electricidad. En este procedimiento ocurre la liberación de electrones mediante los aniones en el ánodo y la captura de electrones por los cationes presentes en el cátodo. Esto quiere decir, que, la energía eléctrica tiene la capacidad de intervenir en reacciones químicas, produciendo la descomposición de determinadas sustancias.

La electrolisis se puede conceptualizar sencillamente como la ruptura de los enlaces químicos presentes en el agua. Al aplicar cierta cantidad de energía eléctrica en corriente continua (superior a la energía de los enlaces que unen sus átomos), estos se rompen, dividiéndose así la molécula en oxígeno e hidrógeno. Para facilitar esta reacción, se utilizan sustancias denotadas catalizadores, que promueven la reacción de descomposición de cada molécula.

Figura 2.

Diagrama de una celda electrolítica para producción de hidrógeno



Nota. Adaptado de *Centro de Ingeniería y Tecnología*, por Angeles. P., 2019.

<https://hidrógeno18.wixsite.com/hidrógeno/blank-cjg9>

La electrólisis comprende un conjunto de membranas placas de diversos materiales y catalizadores, que tienen por objeto que la reacción se lleve a cabo de un modo más eficiente y que los electrolizadores alcancen una vida útil más larga. Pero, básicamente, el principio fundamental sigue siendo el mismo.

Figura 3.

Instalación comercial de producción de hidrógeno por medio de la electrólisis del agua.



Nota. Adaptado de LYCHONS, por J. P., 2011.

https://fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/hidrógeno_metodologias_de_produccion

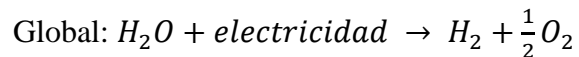
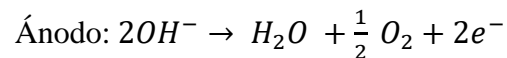
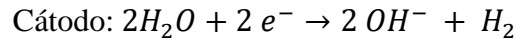
Los equipos utilizados más habituales son los electrolizadores alcalinos, que emplean como electrolito una disolución alcalina, típicamente disoluciones de hidróxido de potasio.

3.2.5 Electrólisis a alta temperatura

Este método puede usar una fuente de calor limpia (solar, geotérmica, y/o nucleares), con el objetivo de generar vapor de agua. Los componentes del sistema son calentados de manera directa, a través, del suministro de vapor o indirectamente por el calor que se pretende transferir.

Por lo tanto, los requerimientos de energía eléctrica, en este tipo de electrólisis disminuyen en relación con la electrólisis convencional.

La electrólisis del agua se produce al hacer pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos sumergidos en un electrolito:



La temperatura como variable en el proceso de electrólisis, no coñbe el resultado. Por lo tanto, en lugar de agua líquida, se suministra vapor de agua. Este método se destaca por requerir una entrada de energía eléctrica menor.

La demanda de energía eléctrica en el proceso disminuye, a medida que aumenta la temperatura. Por lo tanto, en la electrólisis del vapor de agua se puede producir hidrógeno, con una menor potencia eléctrica que la que se requiere para el caso del agua a temperaturas bajas.

Pero ¿por qué se habla tanto, actualmente, de la electrólisis? Esto debido a que, aunque la electrolisis es conocida desde hace siglos, ahora, presenta una nueva relevancia al emplearse la energía eléctrica (de origen renovable) y el hidrógeno empleado como vector energético. Esto, permite la posibilidad de gestionar el agua y encaminar el hidrógeno como combustible, sin la generación de emisiones de efecto invernadero a la atmosfera o como complemento sostenible al gas natural.

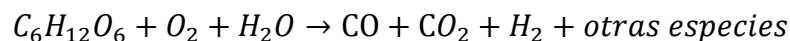
3.2.6 *Pirólisis*

Además de ser un proceso que inicia en torno a los 250°C y completándose alrededor de los 500°C y es irreversible y consiste en la separación térmica de la biomasa mediante la gasificación de esta, en ausencia de oxígeno. Esta separación se emplea mediante reacciones químicas complejas, transferencias de materia y calor.

3.2.7 *Gasificación*

La gasificación consiste en un proceso controlado con calor, vapor y oxígeno en el objeto de convertir la biomasa como materia prima en hidrógeno y otros productos, a temperaturas que oscilan los 700 ° C, sin combustión; con una cantidad controlada de oxígeno, monóxido de carbono, hidrógeno y dióxido de carbono. El uso de membranas especiales separa el hidrógeno a partir de la corriente de gas.

La reacción de ejemplo simplificado es:



En la reacción anterior se emplea la glucosa como sustituto de la celulosa, por consecuencia de que, la biomasa real posee una composición altamente variable y compleja con la celulosa como componente principal.

4. Hidrocarburos para la generación de hidrógeno

El hidrógeno se puede obtener a través de ciertos métodos especializados en fuentes fósiles. Estos datan principalmente del gas natural, con una eficiencia aproximada del 80%, mientras que, con otros hidrocarburos se obtiene una eficiencia variable. Naturalmente, estos procesos utilizan el método de conversión basado en hidrocarburos, en los cuales se libera dióxido de carbono (CO_2).

Debido a que, la producción total se concentra en una sola planta, es posible captar y almacenar el CO_2 , a fin de encargarse del mismo y evitar su emisión a la atmosfera. Esto puede ser posible, a través de la inyección en una formación de petróleo o gas.

4.1 Producción de hidrógeno a partir del gas natural

El hidrógeno se puede producir a partir de gas natural, mediante tres procesos químicos diferentes:

- Reformado de vapor
- Oxidación parcial
- Reformado autotérmico

4.1.1 *Reformado con vapor*

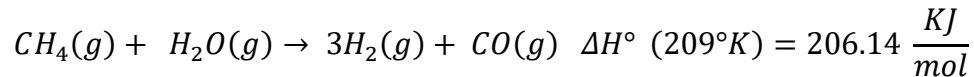
El proceso conocido también como Reformado de Metano con Vapor (SMR “steam methane reforming”), funciona sobre hidrocarburos ligeros, es decir, a aquellos con puntos de ebullición inferiores a 200°C.

En este se produce una reacción endotérmica desde el metano y vapor de agua, hacia la producción de hidrógeno y CO. El proceso ocurre a temperaturas dentro del rango de los 700-850 °C (aportado en parte por la alimentación del gas metano) y presiones en el orden de 3 – 25 bares, con el objetivo de eliminar ciertos contaminantes (azufre, arsénico, halógenos, entre otros) presentes en el gas metano, antes de transmitirlo al catalizador, el cual es a base de níquel.

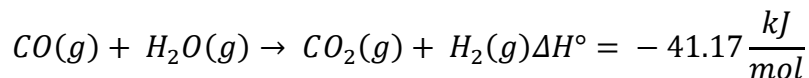
El producto gaseoso contiene un 12% de CO, que se puede convertir más tarde en CO_2 y H_2 a través de la reacción con vapor de agua.

El reformado del gas natural con vapor de agua, como proceso termoquímico, es el más utilizado actualmente en la producción de hidrógeno para fines industriales.

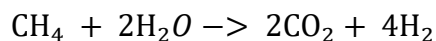
La reacción principal de reformado es



Sin embargo, por medio de un nuevo desplazamiento de agua, se puede obtener hidrógeno adicional, de manera que, mediante la reacción del vapor de agua con el monóxido de carbono a una menor temperatura, se puede obtener:



En esta, el átomo de oxígeno (O), es separado del vapor de agua adicional a fin de oxidar el CO en CO_2 , proveyendo la energía para continuar con la reacción. La reacción global del proceso se resume en:

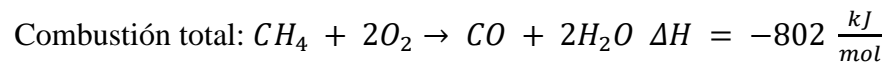
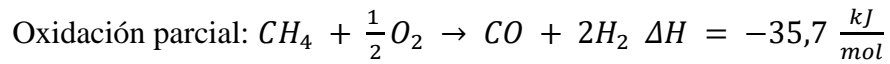


4.1.2 *Oxidación parcial del metano*

Es un proceso exotérmico por el cual se produce hidrógeno mediante la combustión parcial de metano a partir de oxígeno para producir CO, carbón e hidrógeno. Este, no requiere un aporte externo de calor, lo que permite poseer un diseño más compacto.

La oxidación parcial es similar a la combustión total del metano, pero esta se diferencia en la cantidad insuficiente de oxígeno para que se requiere para obtener combustión completa, produciendo así, solo hidrógeno y monóxido de carbono como subproductos, contrario a que, si

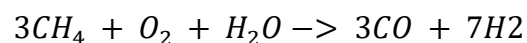
fuera completa, se produciría únicamente dióxido de carbono, agua y energía. La oxidación con aire se utiliza principalmente para producir gas de síntesis.



La presencia de O_2 reduce la deposición de carbono a altas temperaturas, lo que aumenta la vida útil del catalizador; sin embargo, la necesidad de O_2 puro eleva los costos de la planta, ya que requiere una unidad de separación de aire criogénica. A escala industrial, el proceso de oxidación parcial del metano no está completamente establecido, principalmente porque puede haber un suministro de energía y un medio de reacción con CH_4 y O_2 , lo que genera una combustión completa y conlleva riesgos de explosiones (Vasconcelos, 2006).

El metano residual desprendido, puede ser mezclado con suficiente oxígeno o aire para obtener un gas de síntesis. Éste puede ser procesado de nuevo, por la reacción de cambio de gas a agua para producir más hidrógeno.

Los compuestos de hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO) se denomina gas de síntesis, y, puede utilizarse para gestionar otros productos. Además, se puede producir más hidrógeno sometiendo el gas sintetizado a la reacción de cambio de gas para agua, que se muestra a continuación, a temperaturas más bajas.



La oxidación parcial del metano cuenta con aceptación ante la producción de gas de síntesis, debido a que, requiere equipamientos menos costosos y permite una reducción del 10-15% en el requerimiento de energía.

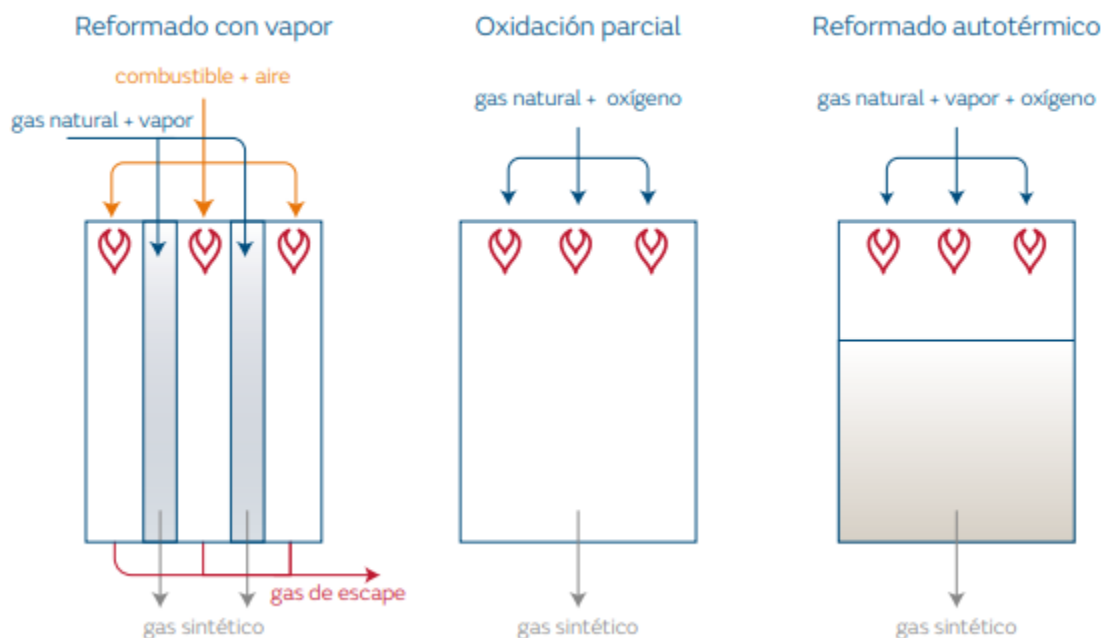
4.1.3 Reformado autotérmico

El proceso de reformado autotérmico (ATR) es una combinación exotérmica del proceso de Reformado con vapor de Agua (SMR) y de la Oxidación Parcial (POX), que requieren temperaturas hacia el reactor en el orden de los 950-1100 °C, a presiones por encima de los 100 bares. El calor de reacción desprendido en el proceso de la oxidación parcial es suficiente para alimentar la reacción de reformado por vapor, haciendo que, el hidrocarburo reaccione con el vapor de agua y con el aire para producir un gas rico en hidrógeno.

Después de la etapa de reformado, se establece la necesidad de purificar el gas resultante, con el propósito de eliminar el dióxido de carbono, el monóxido de carbono y otros subproductos no deseados en la mezcla; resultando en costes adicionales para la planta y reduciendo la eficiencia. La complejidad del proceso de purificación depende de la técnica de reformado utilizada y de la aplicación final del hidrógeno producido.

Figura 4

Tipo de reformadores

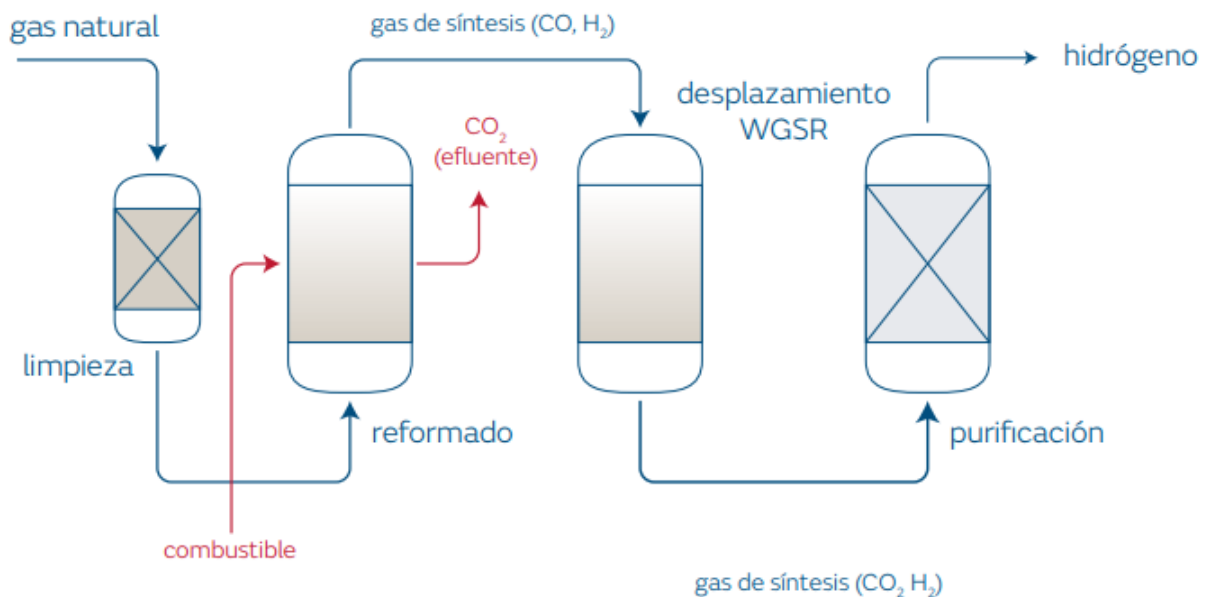


Nota. La presente figura, ejemplifica los diferentes métodos de producción en función del agente oxidante. Adaptado de *Hidrógeno. Vector energético de una economía descarbonizada* (p. 97), por Ramón, J et al., 2016.

Independientemente del agente oxidante utilizado, el proceso global de producción de hidrógeno en cualquiera de los métodos se basa en 4 etapas en serie, como se puede ilustrar a continuación:

Figura 5

Proceso de fabricación de hidrógeno por reformado



Nota. La presente figura, ilustra las 4 etapas a las que se somete el gas natural. Adaptado de *Hidrógeno. Vector energético de una economía descarbonizada* (p. 97), por Ramón, J et al., 2016.

Estos procesos constan inicialmente de la desulfuración del gas natural, reformado, desplazamiento del gas y finalmente la purificación del hidrógeno. De todas, la unidad central del proceso se presenta en el reformado.

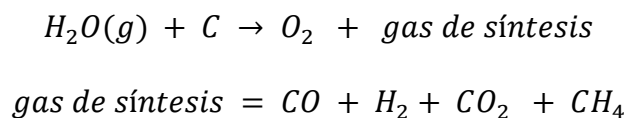
Sin embargo, antes de entrar en el reformador, el gas natural atraviesa por un proceso de desulfuración, en el que se elimina más de un 99 % del azufre presente en este. Después de la etapa de desulfuración, se obtiene un gas limpio por debajo de las 0,1 ppm en contenido de H_2S .

El procedimiento consta de dos unidades: inicialmente se convierte todo el azufre contenido en su forma reducida mediante hidrogenación, y, por un catalizador (en base cobalto y molibdeno). Seguidamente, se elimina el azufre a través de un catalizador de óxido de zinc. La desulfuración es una etapa clave para reducir al límite el envenenamiento del catalizador en el reformado.

4.1.4 Gasificación

Esta tecnología consiste simplemente en hacer pasar aire a través de una capa de coque, que seguidamente se somete a presión y temperaturas de hasta 800-900°C.

En la reacción ilustrada, se sustituye el paso del aire por vapor de agua, obteniéndose una reacción endotérmica:



De esta manera, se produce gas de síntesis y la temperatura de coque es menor. Cuando la temperatura fue demasiado baja, se utilizó aire en lugar de vapor

Los parámetros de operación del proceso son:

- Temperaturas de gasificación 1370-1540°C.
- Temperatura de gas de combustión, 1000°C.
- Temperatura del gas de combustión que sale de la turbina, 600°C.

- Potencia de la turbina de gas, 155MW.
- Potencia de la turbina de vapor, 128MW.
- Presión de operación, 2.8 MPa.

A mediano plazo, la producción combinada del hidrógeno en asociación con la electricidad que provenga a base del carbón proveniente de plantas regasificadoras integradas en un ciclo combinado (GICC), presenta buena viabilidad debido a que, aunque los costes de inversión para plantas de gran magnitud son elevados, sin embargo, la cogeneración hidrógeno-electricidad puede ser muy eficiente a largo plazo mediante termoeléctricas que produzcan la suficiente energía.

Además, la separación y captura de CO₂ puede realizarse con un agregado no significativo con relación a la producción con valores máximos cercanos al 5%).

Para todo proceso de gasificación, en sus parámetros iniciales la gasificación necesita el aumento de la temperatura de la materia prima, luego iniciar los procesos de volatilización y la ruptura de los enlaces químicos más débiles para lograr producir alquitranes volátiles, aceites volátiles, derivados de fenol e hidrocarburos. Estos productos en su mayoría reaccionan más en la fase gaseosa para formar hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono. En este se presenta la descomposición térmica de la materia seleccionada en bruto a través de diversos procesos químicos y que pueden aplicar presiones que van desde la atmosférica hasta 1000 psi. Aire u oxígeno pueden ser admitidos para soportar la descomposición térmica y proporcionar el calor necesario.

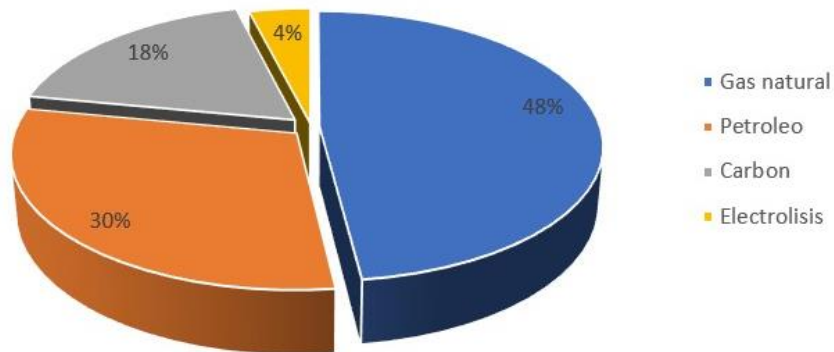
Según "(Speight, 2014)". Este autor también afirma que el producto de la gasificación primaria es por lo general un gas de bajo contenido calorífico. Posiblemente Dicho gas sea en mayor porcentaje una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno llegando a tener hasta cantidades variables de monóxido de carbono que dependa de la magnitud del proceso, Sus

principales composiciones son dióxido de carbono, hidrógeno, agua, metano, sulfuro de hidrógeno, y nitrógeno.

En cambio, La descomposición térmica de material que contiene carbono o mezclas complejas del mismo y otros compuestos, como por ejemplo aceites que contiene hidrocarburos y productos fenólicos, pueden generar mezclas viscosas, bituminosas, con un olor característicos obtenidas como residuos en el proceso, por ejemplo: alquitrán.

Figura 6.

Participación de las fuentes para producción de hidrógeno en el mundo.



Nota. La figura representa las fuentes energéticas más empleadas para la obtención del hidrógeno en la actualidad, produciéndose casi la mitad a partir del gas natural. En concreto, el 96% del hidrógeno requiere como energía primaria combustibles fósiles

4.2 Clasificación del hidrógeno

Esta denominación sobre los colores del hidrógeno viene definida según la forma de producirlo y es una forma de identificar el indicativo que produce el hidrógeno mediante su

obtención y la cantidad de emisiones de CO₂ que este desprende durante el proceso o de lo “limpio” que fue este proceso.

4.2.1 *Hidrógeno Negro*

Este tipo de hidrógeno recibe su denominación debido a ser un producto de la gasificación del carbón y durante su producción se libera CO₂. Además, este término se utiliza para todo aquel hidrógeno que se obtiene a partir de hidrocarburos (En su mayoría suele ser gas natural) ya que su producción es altamente contaminante porque durante el proceso de obtención no se captura las emisiones nocivas.

4.2.2 *Hidrógeno gris*

Este tipo de hidrógeno se produce debido a la reformación de CH₄ (Metano) mediante vapor a partir de gas natural en la actualidad es el sistema más implementado y de mayor producción, aunque también genere emisiones de CO₂.

4.2.3 *Hidrógeno azul*

Este Hidrógeno al igual que el gris se produce mediante el reformado del gas natural con la notable diferencia que en su proceso se captura el CO₂ y se almacena, denominado con las siglas CCUS (Carbon Capture, Utilisation and Storage) dando como resultado una producción considerada de bajas emisiones, pero aún no completamente libre.

4.2.4 *Hidrógeno verde*

Este hidrógeno producido mediante el proceso de electrolisis del agua usando electricidad las cuales su origen son de fuentes renovables (Eólica, solar, hidroeléctrica, etc.,) siendo el más destacado en los parámetros de reducción de emisiones ya que no desprende emisiones nocivas eliminando principalmente las emisiones de dióxido de carbono en la atmosfera.

4.2.5 *Hidrógeno marrón*

Este tipo de hidrógeno pertenece o se adjunta al hidrógeno negro ya que proceden del reformado con vapor del gas natural y de la gasificación del carbón, los cuales en su respectivo orden se consideran con alto porcentaje de emisiones contaminantes.

4.2.6 *Hidrógeno turquesa*

Este tipo de hidrógeno es relativamente reciente e innovador ya que se produce a partir de fuentes de origen fósil (Hidrocarburos) sin producir emisiones contaminantes en su proceso, como sería la producción de hidrógeno mediante pirolisis del gas natural y carbón.

4.2.7 *Hidrógeno amarillo*

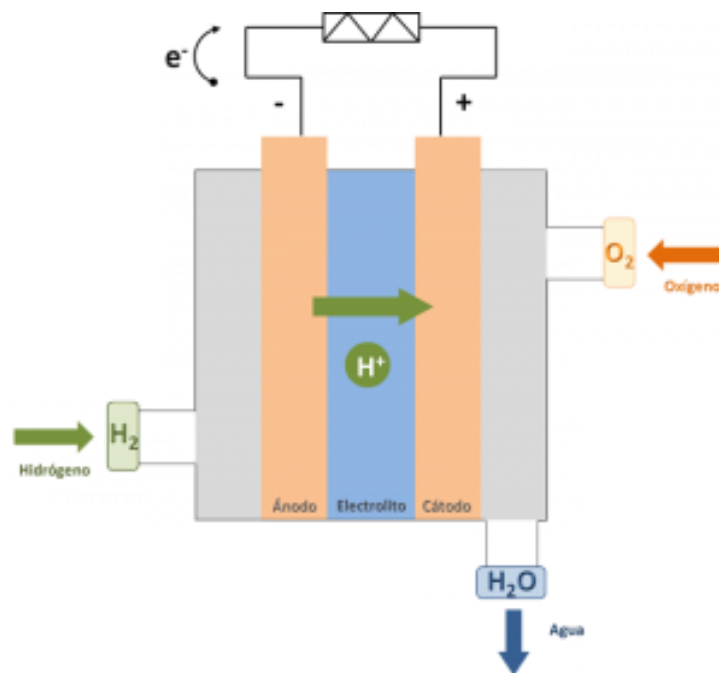
Este tipo de hidrógeno se considera mixto por sus diferentes y conjuntas fuentes de energía para su proceso de electrolisis utilizando desde energías renovables hasta combustibles fósiles, suele relacionarse con el hidrógeno verde si su fuente es solar.

4.3 Pila de combustible como tecnología para el uso del hidrógeno

La pila de combustible es un dispositivo electroquímico, que tiene como función principal, transformar directamente la energía química de un combustible en energía eléctrica. El proceso parte del uso de hidrógeno como combustible principal y del oxígeno como agente oxidante; donde, a través de una reacción electroquímica de oxidación por parte del hidrógeno, se obtienen como subproducto agua, calor y electricidad en forma de corriente continua.

4.3.1 *Componentes de una pila de combustible*

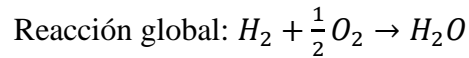
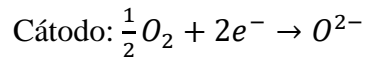
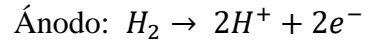
Actualmente, existen en el mercado diferentes sistemas de pilas de combustible, que, a través de la misma tecnología y principio de la celda electroquímica, se obtienen desde unos pocos watts hasta mega watts.

Figura 7*Celda electroquímica común de una pila combustible*

Nota. La figura representa una celda electroquímica básica, que establece una entrada de hidrógeno y oxígeno, con una salida de producción de agua. Adaptado de *Pilas de combustible*, por Centro nacional de hidrógeno. <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>

La celda de combustible está conformada por dos electrodos (ánodo y cátodo), separado a través de un electrolito sea líquido o sólido. El hidrógeno se suministra al ánodo, donde, ocurre una reacción de oxidación; mientras que, el oxígeno se suministra al cátodo para la reacción de reducción. El flujo de electrones se obtiene mediante la reacción liberada en el ánodo y son conducidos al cátodo para producir corriente eléctrica. En medio de los dos electrodos se encuentra el electrolito, que permite el transporte de iones entre los electrodos.

Este proceso electroquímico se ve representado por las siguientes reacciones:



En este caso, la pila de combustible genera como único residuo vapor de agua o agua líquida.

4.3.2 *Ventajas de la pila de combustible*

Algunas de las principales ventajas del uso de pilas de combustible son:

- Contribuyen en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes atmosféricos, ya que, al usar el hidrógeno como combustible a baja temperatura, sólo se tiene como residuo agua líquida o vapor de agua.
- La eficiencia de los procesos electroquímicos en comparación a los procesos de combustión es muy más elevada. Ya que, en la combustión, se transforma inicialmente la energía química en energía térmica, que finalmente, se convierte en energía mecánica o en energía eléctrica, lo que, produce una pérdida de eficiencia en cada una de las transformaciones.
- Son procesos silenciosos y seguros, ya que, los dispositivos no poseen partes móviles.
- Son versátiles, dado que las celdas pueden adaptarse para producir energía, ya sea, en forma de electricidad o calor en diferentes cantidades. Así mismo, pueden emplearse en aplicaciones muy diversas, que abarca desde los vehículos hasta en plantas de generación o cogeneración, tanto a nivel doméstico como industrial.

4.3.3 Tecnologías existentes para pilas de combustible

Existen diferentes tipos de pilas combustible, al igual que, diferentes formas de clasificarlas. Esto, puede ser según su temperatura de operación, según la naturaleza del ion transportado por el electrolito, etc.

Actualmente los principales grupos de pilas de combustible son cinco: Pilas de combustible alcalinas (AFC), pilas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC), pila de combustible de oxido solido (SOFC), pila de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) y la pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC).

Tabla 10

Especificaciones según el tipo de pila

Pila	Combustible utilizado	Eficiencia (%) H₂/CH₄	Temperaturas de operación (°C)	Electrolito
PEFC	Hidrógeno o metano	60/40	40-80	Polímero solido
AFC	Hidrógeno	60/-	65-220	Solución de hidróxido de potasio en agua
PAFC	Hidrógeno	40/-	150-210	Ácido fosfórico liquido
MCFC	Metano	-/50	600-700	Carbonatos alcalinos sobre una matriz cerámica
SOFC	Hidrógeno o Metano	70/60	600-900	Solido cerámico

Nota. La tabla establece ciertas especificaciones en relación con el tipo de pila de combustible.

Adaptado de *Hidrógeno. Vector energético de una economía descarbonizada* (p. 140), por Ramón, J et al., 2016.

Tabla 11

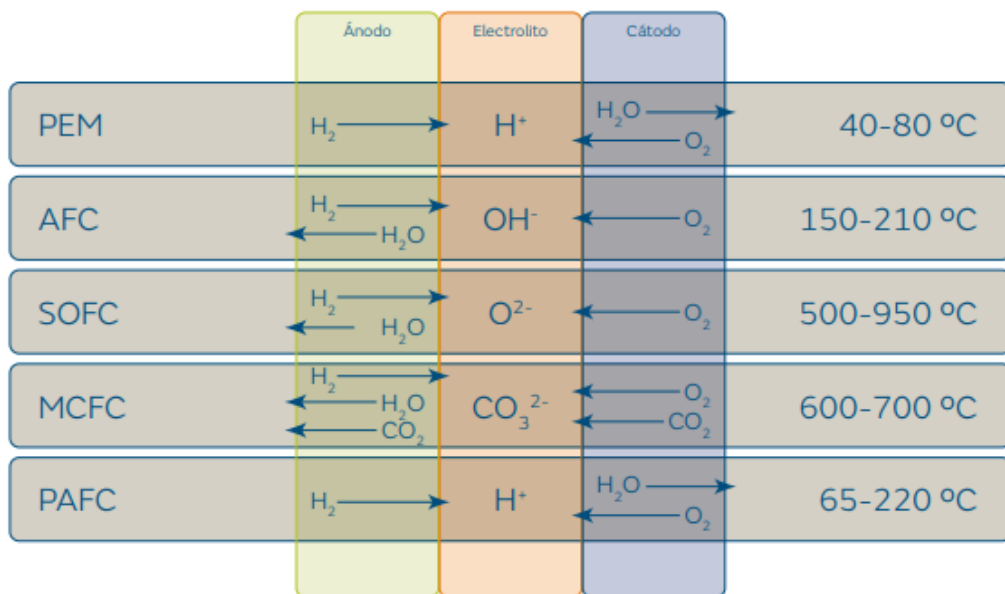
Aspectos relacionados a las pilas de combustible

Pila	Ventajas	Desventajas	Aplicación
PEMFC	Temperatura de operación baja	Coste del catalizador	Transporte, electricidad, cogeneración, generación distribuida.
AFC	Rendimiento alto	Sensible al CO ₂ del aire	Electricidad, aplicaciones espaciales.
PAFC	Alta tolerancia a las impurezas	Coste del catalizador	Electricidad, cogeneración.
MCFC	Alta eficiencia	Corrosión debido a las altas temperaturas	Generación estacionaria a gran escala.
SOFC	Alta eficiencia	Corrosión debido a las altas temperaturas	Electricidad, cogeneración, generación distribuida.

Nota. La tabla establece algunas ventajas, desventajas y aplicaciones para cada tipo de pila.

Figura 8

Modo de operación y rango de temperatura de distintas tecnologías.



Nota. La figura expone de manera resumida el modo de operación que existe para la clasificación de las pilas de combustibles. Adaptado de *Hidrógeno. Vector energético de una economía descarbonizada* (p. 139), por Ramón, J et al., 2016.

4.4 Usos finales y aplicaciones del hidrógeno

El hidrógeno está llamado a desempeñar un papel cada vez más importante en los planes de descarbonización de la producción y distribución energética mundial del futuro. Debido a que, no es considerado como una fuente de energía primaria como lo son los combustibles fósiles, la energía solar, eólica e hidráulica. Sino que, posee como principal propósito actuar como vector energético, es decir, como transportador de energía desde una fuente de energía primaria hasta el lugar donde se necesita.

En la actualidad, el hidrógeno se consume globalmente como materia prima en diversas actividades industriales relacionadas a la refinación y la industria química. De hecho, en Colombia, se presenta una demanda anual de hidrógeno cercana a 150 kt, producida mediante reformado de gas natural (hidrógeno gris) y consumida principalmente en las refinerías. El resto de la demanda se distribuye tanto para la producción de amoníaco y fertilizantes, como para otros usos industriales menores asociados a la producción de vidrio flotado y acero, el procesado de aceites orgánicos comestibles, la síntesis de alcoholes y fibras sintéticas. Así mismo, el hidrógeno presenta una gran aplicabilidad en el transporte terrestre, aéreo y marítimo.

Las aplicaciones del hidrógeno pueden categorizarse en tres diferente incisos: como materia prima en la sintetización de compuestos químicos, como combustible para la movilidad, y, en la generación de calor.

4.4.1 *Materia prima*

Actualmente en el sector industrial, gran parte de la demanda del hidrógeno como materia prima, se emplea en la producción de amoníaco para sintetizar fertilizantes nitrogenados, metanol y demás productos químicos; así como, para la producción de acero en metalurgia o en el área de refinación en la producción de combustibles.

4.4.1.1 Refinerías. Las refinerías emprenden diferentes procesos dentro de los cuales se requiere el hidrógeno. Uno de los más importantes, es el proceso de hidrotreamiento, que consiste en la adición de hidrógeno para incitar las reacciones de hidrogenación e hidrogenólisis, con el fin de ocasionar una saturación de los compuestos aromáticos y remover impurezas como el azufre, nitrógeno, oxígeno o metales pesados que afecten directamente el valor de distintas fracciones hidrocarbúricas e impacten nocivamente al medio ambiente.

Así mismo, la demanda de hidrógeno en las últimas décadas ha ido aumentando, debido a que, cada vez serán más exigentes y minuciosas las restricciones en la incorporación de compuestos aromáticos, olefinas y oxigenados en la gasolina debido a sus repercusiones ambientales.

Existen otros procesos reactivos en los que se ve implicado el uso de hidrógeno como materia prima son:

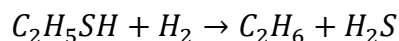
- Hidrodesulfuración (HDS)

Es un proceso químico destinado que elimina compuestos constituidos por azufre, que se encuentran contenidos en el gas natural, el petróleo y/o sus derivados, a través de la hidrogenación catalítica de estos.

Lo anterior, varía en relación con la naturaleza de la fracción de hidrocarburo que se pretenda tratar (composición y tipos de compuestos de azufre presentes), de la selectividad y del tipo de catalizador utilizado, del diseño del proceso y sus condiciones de reacción.

En caso encontrar compuesto por azufre en los combustibles, al momento de la combustión, este se corroería y sus gases contaminarían el ambiente.

Una reacción que puede presentarse en este tipo de proceso es:

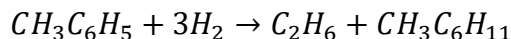


- Hidroisomerización

Es aquel donde las parafinas se convierten en isoparafinas en el propósito de mejorar las propiedades del producto final, tal como lo es, la ruta que permita mantener el octanaje de los compuestos presentes en la gasolina. Sosa (2008) afirma que “La transformación de la fracción liviana del crudo, ha generado mucho interés debido a que proporciona un incremento importante en la unidad de RON (Research Octane Number)”. En esta reacción el hidrógeno, primero es consume y luego liberado, una vez el isómero se forma.

- Desaromatización:

Proceso en el cual, los compuestos aromáticos son hidrogenados a fin de obtener cicloparafinas o alcanos.



- Hidrocraqueo

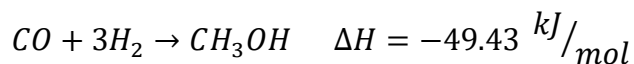
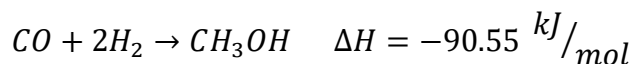
Es el proceso de refinación, que emplea hidrógeno y catalizadores a condiciones de temperaturas relativamente bajas y alta presión, con la intención de romper cadena larga se para formar cadenas más cortas en el rango de la gasolina. El proceso utiliza ciertas cantidades de

catalizadores, dependiendo del producto que se desee obtener y puede manejar materias primas con alto contenido de azufre sin previo proceso de desulfuración.

4.4.1.2 Metanol. El Metanol es el alcohol más simple, fabricado a gran escala con el objeto de satisfacer mercados globales. Este, a temperatura ambiente se encuentra en fase líquida y posee gran variedad de aplicaciones en el área industrial. Su uso más frecuente, se presenta como materia prima en la producción de ácido acético, formaldehído, cloro metanos, biodiesel, metilaminas, metil t-butil éter (MTBE), o, para actuar como combustible, solvente o anticongelante en pinturas, etc.

En cuanto a la producción del metanol, este se puede obtener a partir de la destilación destructiva de madera, del gas de síntesis y de residuos orgánicos; siendo De las tres formas mencionadas anteriormente la de mayor uso es a partir de gas de síntesis, pues determina un mayor rendimiento.

El proceso de síntesis del metanol se basa en la reacción de gas de síntesis, con una estequiometría de dos moles de hidrógeno (H_2) por cada mol de monóxido de carbono (CO). Esta reacción, se da en presencia de un catalizador, el cual, habitualmente es en base cobre y óxidos de cinc; y, en condiciones de temperaturas cercanas $250^\circ C$ y muy altas presiones en el rango de 50-100 atm. Adicionalmente, el dióxido de carbono presente en el gas de síntesis puede reaccionar con tres moléculas de hidrógeno para dar lugar a metanol, de la siguiente manera:



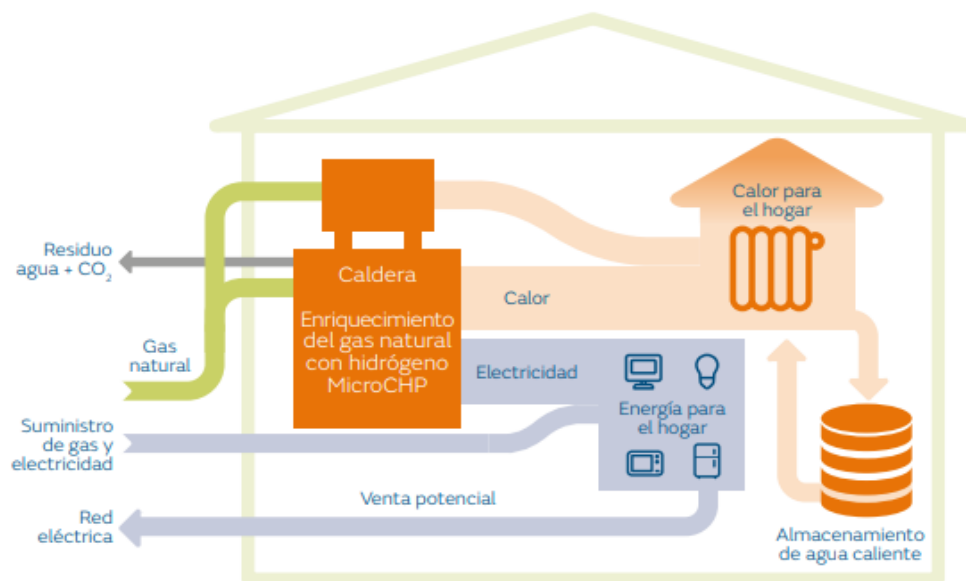
4.4.2 Generación de calor

4.4.2.1 Domestica. El uso residencial de pilas de combustible domésticos refiere principalmente aquellos sistemas de cogeneración de electricidad y calor conocidos como sistemas CHP (Combined Heat and Power) o sistemas micro-CHP, cuando se habla de menos de 20 kW generados. Así mismo, estos sistemas representan elevadas eficiencias en comparación con los sistemas de combustión; además, poseen cierta flexibilidad de combustible y destacan al ser completamente silenciosos.

Principalmente, la generación de calor domestica es alimentada por gas natural reformado, pero, podría ser sustituido completamente por hidrógeno cuando su suministro sea más fácil y asequible tanto técnica como económicamente dentro del escenario de la transición energética.

Figura 9

Funcionamiento del sistema CHP



Nota. La figura representa el uso residencial de pilas de hidrógeno combustible en sistemas de cogeneración de electricidad y calor, conocidos como sistemas CHP. Adaptado de *Hidrógeno. Vector energético de una economía descarbonizada* (p. 97), por Ramón, J et al., 2016.

4.4.2.2 Industrial. Aproximadamente, el 10 % de las emisiones de gases de efecto invernadero son generadas por la producción de calor en los diferentes procesos industriales, donde, la IEA (2019) pronuncia que “La demanda global de calor de alta calidad fue de 1.280 Mtep en 2018 (millones de toneladas equivalentes de petróleo), de las cuales la mayoría (910 Mtep) correspondían al sector químico y del acero, y la mitad del remanente al cemento”. De manera que, la mayor parte de los procesos industriales relacionan intrínsecamente requerimientos calóricos, que varían, tanto en rangos de temperatura como de flujos de calor necesarios.

Tabla 12

Requerimientos de temperatura y energía por tonelada de producción de procesos industriales

Aplicación y Proceso	Temperatura (°C)	Requerimientos energéticos (GJ/t producto)
Vidrio: fusión de la sílice	1600	3
Cemento: producción de Clinker	1450	4
Acero: operación alto horno	1100	11-14
Producción H_2 : reformado SMR	820	16
Fertilizante: producción NH_3	450	36
Petroquímica: síntesis de metanol	300	33

Nota. La tabla ilustra que la aplicación dentro del área industrial que requiere un mayor aporte térmico refiere la producción de vidrio por medio de la fusión del sílice; mientras que, la producción de amoníaco para la síntesis de fertilizante es la aplicación que más estima requerimiento energético. Adaptado de: *Hidrógeno. Vector energético de una economía descarbonizada* (p. 97), por Ramón, J et al., 2016.

A pesar de los intentos de introducir biomasa, residuos, electricidad empleada en resistencias eléctricas y/o tecnologías electromagnéticas como fuente de calor, los combustibles fósiles siguen siendo la fuente principal de energía dentro las aplicaciones de alta temperatura. Debido a la gran dificultad que se presenta en electrificar algunos procesos a gran escala, como los reformadores o hornos de cemento.

Es aquí, donde la acción de la pila de hidrógeno combustible, como una fuente alternativa de calor y libre de emisiones, es una opción viable y capaz de alcanzar temperaturas, flujos y fiabilidad necesarias para una operación robusta y continua, en el propósito de descarbonización del sector industrial. Sin embargo, en la actualidad existen pocas aplicaciones que empleen hidrógeno puro como fuente alternativa de calor industrial, pero vale decir que, se han presentado aplicaciones donde el hidrógeno se quema juntamente con gas natural en calderas, estufas y motores.

El hidrógeno se puede producir calor de alta calidad sin la generación de emisiones de CO_2 . En presencia de aire, refiere altas eficiencias de combustión al obtener temperaturas de llama de 2.100 °C, que ascienden a 2.800 °C con oxígeno puro. No obstante, para que la reacción de combustión sea rápida, se deben ajustar parámetros en el sistema de combustión de hidrógeno, a causa de que requieren quemadores especiales y cambio de materiales para evitar la corrosión y fragilidad de los metales.

4.4.3 Transporte y movilidad

Staffell, D. et al, (2019) menciona que el hidrógeno es uno de los tres vectores energéticos para descarbonizar el transporte, compitiendo y complementándose con el gas natural vehicular (GNC y GNL), los biocombustibles (como el biometano), el gas natural vehicular u otros, generados a partir de hidrógeno verde y captura de CO_2 , y la electrificación.

Donde, al comparado con la energía eléctrica, el hidrógeno, supera las limitaciones de autosuficiencia y los altos tiempos de recarga que presentan los vehículos eléctricos a batería. En comparación con biocombustibles, no requiere el uso de grandes extensiones de terreno y disminuye el impacto en la calidad del aire, especialmente en las zonas urbanas de elevada concentración de población.

El uso de hidrógeno para el transporte puede garantizar el futuro suministro de energía minimizando el impacto ambiental.

En las aplicaciones como la movilidad, el uso de hidrógeno a través de pilas de combustible es bajo en emisiones y genera agua como único residuo. Lo que contribuye a disminuir calentamiento global y mejorar calidad y salubridad del aire.

5. Metodología de la investigación

En función a encaminar el hidrógeno como fuente alternativa de energía dentro de la transición energética en Colombia, y, dar cumplimiento a cada uno de los parámetros y objetivos propuestos ante la investigación de la temática, se da seguimiento a una metodología específica.

En primera instancia, se desarrolló el estado del arte relacionado al hidrógeno, sus propiedades, ventajas y desventajas, así como la información detallada de las fuentes de energía requeridas para la obtención de este gas.

Seguidamente, se plantearon los diferentes métodos y tecnologías existentes para la producción de hidrógeno, de acuerdo con la materia prima utilizada. Estas pueden ser recursos renovables y no renovables.

Sin embargo, para el desarrollo de esta temática, se profundizan los métodos de producción a partir de recursos no renovables, ya que, se pretende simular ciertos escenarios mediante el software “Evolución”, a fin de establecer cuál de estos favorece el estudio de la transición energética en Colombia y cuál de estos presentan un menor índice de emisión de gases por efecto invernadero.

Para el planteamiento de los escenarios, se hace necesario generar claridad sobre ciertos aspectos como:

5.1 Reservas de hidrocarburos

Las reservas son volúmenes de crudo y gas (hidrocarburos) acumulados en el subsuelo que se prevén obtener en algún momento, a fin de ser comercializadas en el mercado nacional e internacional. El valor de una empresa petrolera se establece según su libro de reservas.

Este valor de las reservas está influenciado por las condiciones económicas de su extracción desde el subsuelo (costo de extracción y producción), y de la tecnología que se requiera para extraerlas.

Las reservas de la industria energética representan, de manera simple, los recursos que posee una entidad (gubernamental o privada) en el presente y en un futuro a medio plazo.

Estas reservas se clasifican en probadas (1P), probables (2P) y posibles (3P).

- Reservas probadas (1P): Son reservas que cuentan con un alto potencial de recuperación en determinado periodo de tiempo, debido a que, se dispone de la suficiente información geológica de cada uno de los yacimientos y su respectivo volumen a extraer. Así mismo, este tipo de reservas cuenta con la tecnología necesaria para la producción y extracción de los recursos.
- Reservas probables (2P): En relación con las reservas 1P, las reservas probables poseen un mayor índice de incertidumbre en el aprovechamiento rentable de las mismas. Esta incertidumbre relaciona algunas variables tiempo, mojabilidad de la roca, sistemas de recuperación e inyección, entre otros. Así mismo, su probabilidad de extracción del subsuelo oscila alrededor del 50%.
- Reservas posibles (3P): Estos hidrocarburos cuentan con un bajo porcentaje de posible recuperación y una alta incertidumbre (con valores alrededor del 10%) de ser recuperadas.

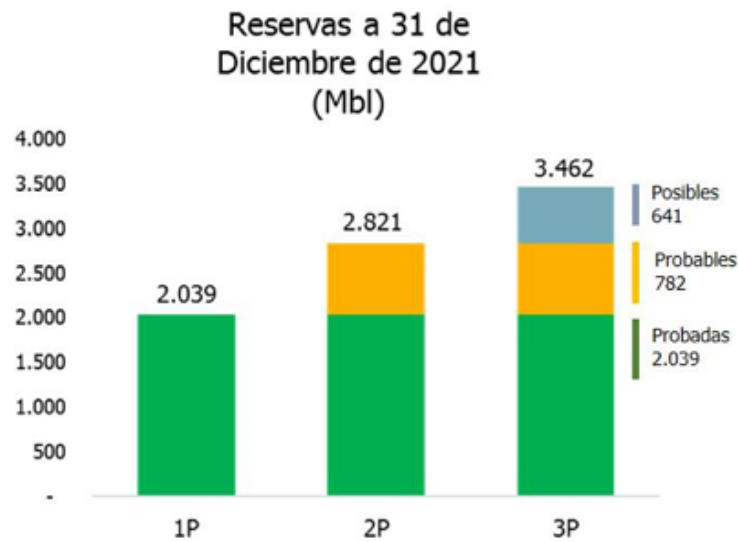
Reservas 1P: Reservas probadas

Reservas 2P: Reservas probadas + Reservas probables

Reservas 3P: Reservas probadas + Reservas probables + Reservas posibles

Figura 10

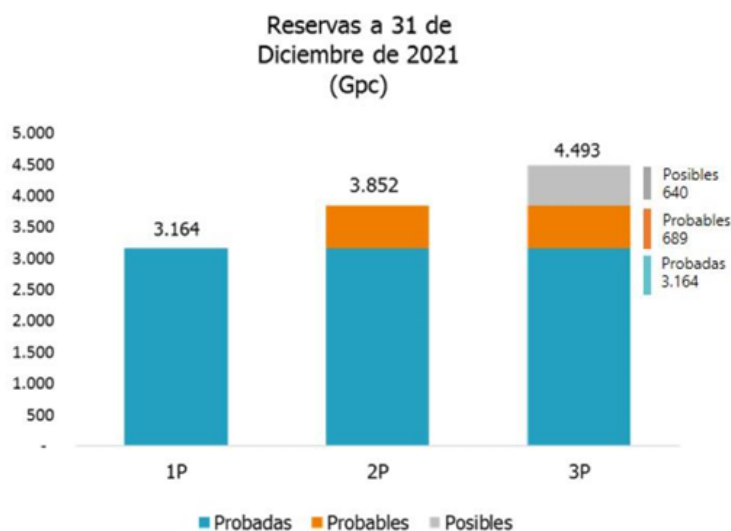
Comparativo de reservas de petróleo 2021



Nota. El grafico ilustrado representa la totalidad de cada una de las reservas en Colombia a finalizar el año 2021. Adaptado de *Reservas de hidrocarburos del país – Corte a 31 de Diciembre*. Por ANH., 2022.

Figura 11

Comparativo de reservas de gas natural 2021



Nota. El gráfico ilustrado representa la totalidad de cada una de las reservas en Colombia a finalizar el año 2021. Adaptado de *Reservas de hidrocarburos del país – Corte a 31 de Diciembre. Por ANH., 2022.*

5.1.1 Reservas en Colombia

Según la EITI (2017), Colombia posee 23 zonas geológicas, donde, se depositan sedimentos con potencial hidrocarburífero, conocidas como cuencas, de las cuales solo nueve de estas son productoras: siete producen petróleo, y dos, gas.

De las siete cuencas productoras de crudo, solo tres concentran más del 90 % de la producción de petróleo, las cuales, ordenadas por importancia, son: 1. Llanos Orientales, cuenta con una porosidad de roca media, una saturación del agua del 37,3 al 76,9 % y una densidad API que oscila entre 12,1 a 18,6°; Valle Medio del Magdalena, cuenta con una porosidad de roca media, una densidad API entre 17,2 y 24,5°, y un tipo de petróleo que es 65 % pesado y 25 % mediano; Valle Superior del Magdalena, con un tipo de crudo que es 57,8 % mediano, 29,5 % pesado y 10,8 % liviano. (EITI, 2017)

De los 20 departamentos que extraen petróleo actualmente, solo en Norte de Santander se extrae petróleo liviano, 5 extraen petróleo mediano (Arauca, Cauca, Huila, Nariño, Putumayo) y los demás 10 extraen petróleo pesado. (EITI, 2017)

5.2 Relación reservas/producción

Este hace referencia al número de años promedio en que se agotarían las reservas, a través, de la asunción de una tasa de producción constante o igual a lo observada en el año estudio. Así mismo. Esta relación indica la vida útil de las reservas, sin que haya nuevas adiciones en ellas, o por lo menos la reposición de las cantidades producidas.

5.3 El índice de reposición de reservas (IRR)

El índice de reemplazo o reposición de reservas mide en términos nacionales o globales, la cantidad de reservas probadas que se adicionan a la base de reservas de una entidad, en relación con la cantidad de petróleo y gas producidos durante el año. Este cálculo es una medida empleada por los inversores para estimar el desempeño operativo de una empresa petrolera.

$$IRR = \frac{I}{P}$$

Donde,

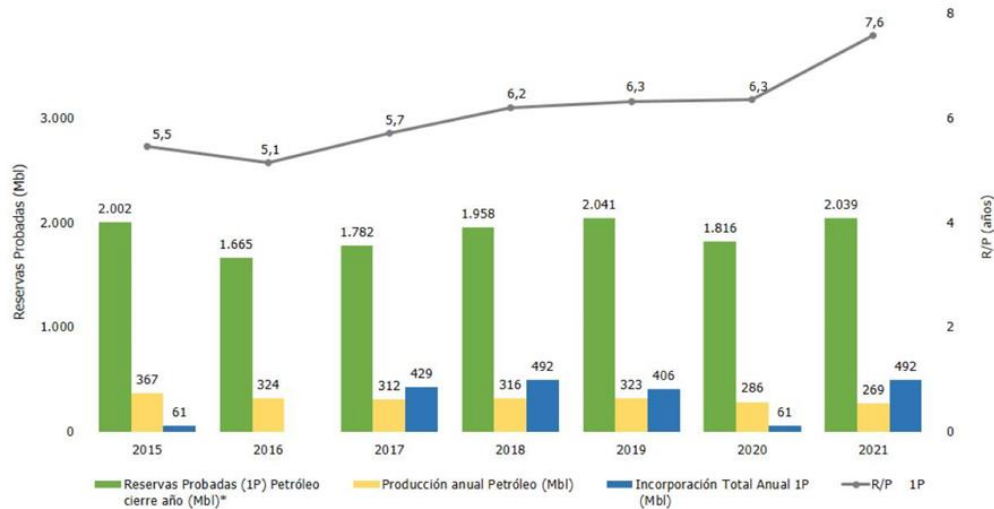
- *I*: Incorporación total por año
- *P*: Producción anual

Según la experticia del mercado, cuando la demanda es estable, el índice de reemplazo de reservas debe ser de al menos un 100%, a fin de mantener los niveles de producción actuales. Cualquier cifra superior al 100%, posiblemente indica que la empresa tiene un incremento de reservas. Por el contrario, cualquier número inferior al 100% genera la preocupación de que la empresa pronto se quede sin reservas.

El índice de reposición de reservas está definido por ciertas variables como: revisiones de años anteriores, nuevas incorporaciones (descubrimientos), métodos de recobro mejorado (EOR), proyectos de producción incremental (PPI), reclasificaciones y ciertas revisiones técnicas, entre otras.

Figura 12

Histórico reservas probadas, producción e incorporación anual de petróleo.

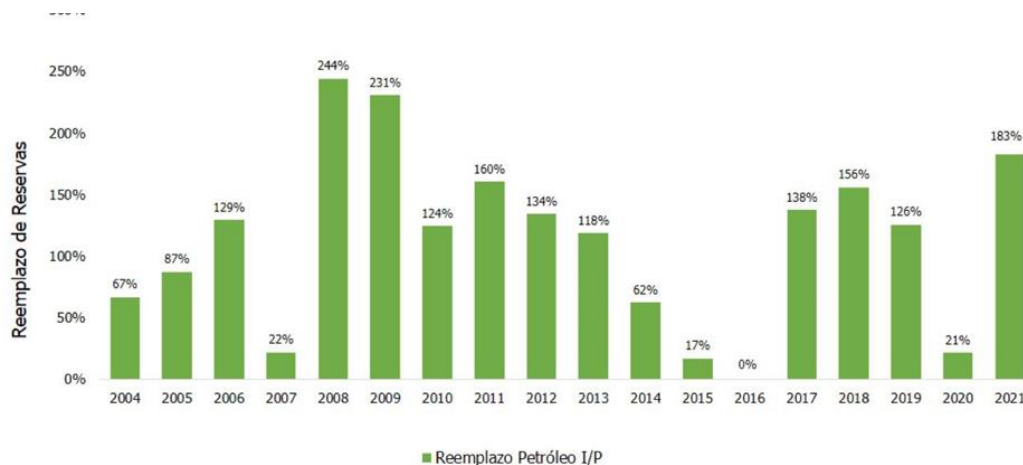


Nota. El gráfico ilustrado representa el histórico de reservas probadas, producción e incorporación anual de petróleo hasta el año 2021. Adaptado de *Reservas de hidrocarburos del país – Corte a 31 de Diciembre. Por ANH., 2022.*

Teniendo en cuenta el índice de incorporación de petróleo y la producción obtenida durante cada año, se puede determinar el índice de reposición de reservas (IRR) para Colombia.

Figura 13

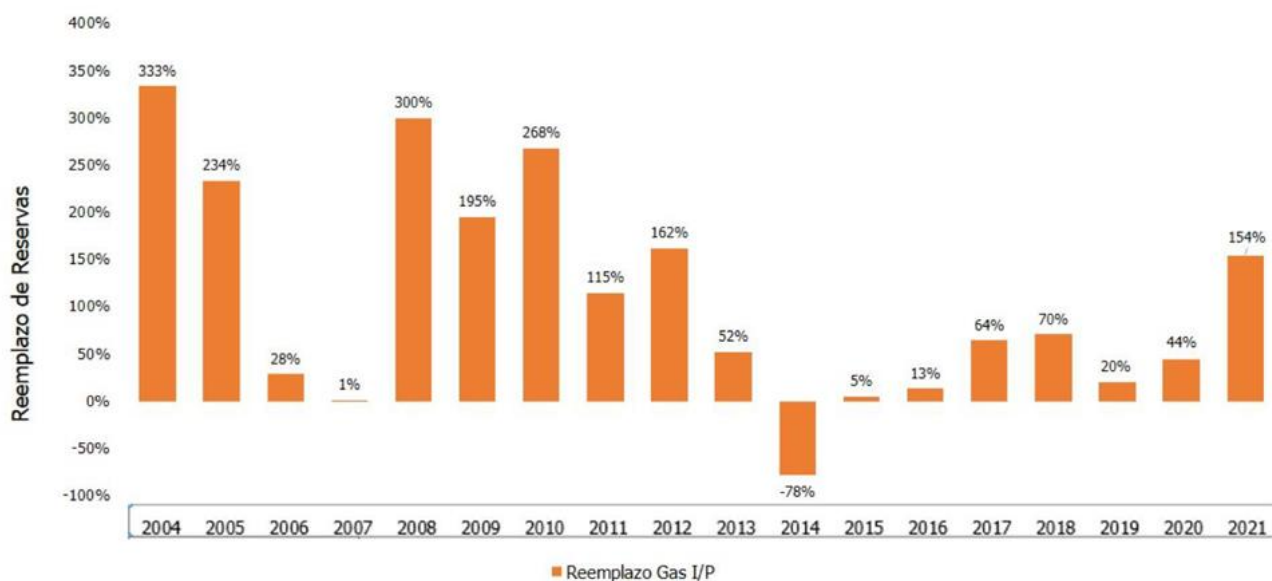
Reemplazo/Reposición histórico de reservas probadas de petróleo a 2021



Nota. El reemplazo de reservas probadas (1P) de petróleo a 31 de Diciembre del 2021, fue de 183%, con respecto al volumen producido. Adaptado de *Reservas de hidrocarburos del país – Corte a 31 de Diciembre.* Por ANH., 2022.

Figura 14

Reemplazo/Reposición histórico de reservas probadas de gas natural a 2021



Nota. El reemplazo de reservas probadas (1P) a 31 de diciembre del 2021, fue de 154%, con respecto de gas comercial. Adaptado de *Reservas de hidrocarburos del país – Corte a 31 de Diciembre.* Por ANH., 2022.

En la actualidad, es común debatir sobre el tema relacionado al cambio climático en unión a la necesidad existente de una transición energética, que, vaya de la mano o deje definitivamente a un parte de los combustibles fósiles extraídos del subsuelo, a fin de disminuir el calentamiento global de tan dramáticas dimensiones. Sin embargo, se habla mucho menos del pronto agotamiento de los combustibles fósiles.

Aunque ambos problemas parezcan contradictorios dentro del problema energético, estos hablan de la misma realidad: los límites de la energía.

Aun cuando el cambio climático no es más que un gran desequilibrio entre el ritmo al que el ser humano está quemando los combustibles fósiles y el ritmo al cual la naturaleza recicla los gases emitidos, así mismo, existe un desequilibrio enorme en el ámbito de la extracción: estamos extrayendo carbón, petróleo y gas a un ritmo inmensamente mayor que sus velocidades de generación.

El desequilibrio es también debido a la carencia en alternativas tecnológicas, al estar lejos de implementar energía renovable en el ritmo necesario para sustituir el agotamiento que los expertos prevén para los combustibles fósiles.

Esta problemática o desequilibrio, se presenta en vista de un fenómeno muy conocido en el área de yacimientos llamado pico del petróleo y del gas (peak oil³), donde, los ritmos de extracción de combustibles fósiles tienden a hacerse más lentos en el tiempo. Esto, debido a variables geológicas que cohiben el flujo de los hidrocarburos a la velocidad deseada.

Trasladando los datos expuestos en la figura anteriores, hacia las siguientes tablas, se puede observar que la vida útil de las reservas de petróleo y gas presentes en Colombia tienen cierto límite, puesto que, la extracción de estos recursos resulta cada vez más compleja. Esto, indica que el país se verá muy pronto en la necesidad de incrementar estas mismas para garantizar la suficiencia a mediano y largo plazo.

³ El peak oil refiere un escenario donde se ha sacado aproximadamente la mitad los recursos presentes en un yacimiento, haciendo que, su extracción sea lenta y costosa

Tabla 13*Histórico de reservas probadas, producción e incorporación anual de petróleo (MMbbl)*

Año	Reservas probadas (1P)	Producción Anual (MMbbl)	R/P Según 1P (Años)
	Cierre año actual		
2011	2259	334	6,8
2012	2377	346	6,9
2013	2445	368	6,6
2014	2311	361	6,4
2015	2002	367	5,5
2016	1665	324	5,1
2017	1782	312	5,7
2018	1958	316	6,2
2019	2041	323	6,3
2020	1816	286	6,3
2021	2039	269	7,6

Nota. La tabla ilustrada representa el reporte de las reservas por año para el petróleo, que, en relación con la producción obtenida, se puede establecer el número de años promedio en que se agotarían los recursos. Siendo así, en Colombia se estima el agotamiento de las reservas por petróleo para dentro de 7,6 años aproximadamente.

Tabla 14*Histórico de reservas probadas, producción e incorporación anual de gas (GPC)*

Año	Reservas probadas (1P)	Producción Anual (GPC)	R/P Según 1P (Años)
	Cierre año		
2011	5463	392	13,9
2012	5727	427	13,4
2013	5508	456	12,1
2014	4759	421	11,3

2015	4361	417	10,5
2016	4024	389	10,3
2017	3896	359	10,9
2018	3782	386	9,8
2019	3471	391	8,9
2020	2949	381	7,7
2021	3164	395	8,0

Nota. La tabla ilustrada establece que para dentro de 8 años, el gas natural agotaría totalmente sus reservas.

El aumento de las reservas de hidrocarburos puede incrementarse mediante contratos de importación, explotación de arenas asfálticas, estimulación directa a la formación por fracturamiento hidráulico y/o de la implementación de métodos de recobro. Sin embargo, ante estos hechos, ¿la tecnología podría ser capaz de proporcionar alternativas que permitan continuar con el consumo de energía (siempre creciente) que requiere la economía?

5.4 Planteamiento de escenarios

En consecuencia, de lo antedicho, se propone el planteamiento de diferentes escenarios basados, tanto en la disminución de reservas de petróleo, como en el aumento de las reservas de gas natural. Teniendo en cuenta que, las reservas de petróleo disminuyen desafortadamente, contrario a sus velocidades de generación; y, la posibilidad de aumentar los recursos de energía fósil (gas natural), a través de, diferentes métodos y tecnologías, que ofrezcan un aprovechamiento de los hidrocarburos contenidos en la roca generadora o de aquellos recursos que, por sus condiciones geológicas, son un reto para su extracción.

Así mismo, se plantea un escenario donde el carbón actúa como materia prima.

Estos escenarios hacen parte del principal planteamiento nombrado por la investigación, donde, a través de la simulación de los escenarios, se expone al hidrógeno como alternativa principal en la transición energética de Colombia y serán evaluados desde el año 2022 hasta el año 2025.

5.4.1 Escenario 1: Petróleo como materia prima para la producción de hidrógeno

El escenario 1, de manera fundamental, tiene en cuenta la producción de petróleo alcanzada en Colombia en los últimos años, a fin de asumir que el promedio de estos valores será la producción esperada para el año 2022. Lo anterior define de cierta manera una base de cálculo que facilite el planteamiento de cada posible situación a presentarse dentro del escenario.

Tabla 15

Histórico de producción de petróleo 2011 - 2021

Año	Producción anual de petróleo (MMbbl)
2011	334
2012	346
2013	368
2014	361
2015	367
2016	324
2017	312
2018	316
2019	323
2020	286
2021	269
2022	328

Nota. El promedio de la producción obtenida en los últimos años estima una producción para el año 2022 en el orden de los 328 millones de barriles de petróleo.

En consideración con el dato anterior, se asumen ciertos porcentajes que influyen el aumento o la disminución de la producción anual en la evaluación de la investigación, con relación a las variables que influyen cada situación posible dentro de los planteamientos.

5.4.1.1 Situación 1. Esta plantea el aumento de la demanda energética enfocada al petróleo, dentro de un periodo de tiempo que comprende a partir del año 2022 hasta el año 2031. Por consecuente, la producción de petróleo crece progresivamente con respecto al dato de la producción promedio obtenido en el año 2022.

Tabla 16

Estimulación de la producción anual en la situación 1.

Año	Variación de producción (%)	Producción (MMbbl)
2022	0	328
2023	0,08	354
2024	0,06	375
2025	0,07	402
2026	0,09	438
2027	0,11	486
2028	0,12	544
2029	0,14	620
2030	0,16	720
2031	0,19	856

Nota. La tabla ilustra la extrapolación de la producción estimada que puede alcanzar cada intervalo de tiempo dentro de la situación 1, en función a la producción promedio del año inicial y de su porcentaje de variación en la producción del país. La producción para el año siguiente con respecto al anterior puede hallarse por medio de la expresión:

*Producción año siguiente = Variación de producción (%) * Producción año anterior*

Seguidamente, se emplea un índice de reposición de reservas en cada intervalo de tiempo dentro la situación inicial, que asuma, un incremento en el registro de reservas, al emplear índices superiores al 100%.

$$IRR = \frac{I}{P}$$

Siendo así, es posible establecer la incorporación total habida por año, que, a su vez, genera el conocimiento del cambio neto obtenido y reflejado en las reservas totales al cierre del año (ganancias). Estas variables se pueden expresar matemáticamente como:

$$I = P * IRR$$

$$\text{Cambio neto de reservas 1P (Mbbl)} = I - P$$

Donde,

- *I*: Incorporación total por año
- *P*: Producción anual

Tabla 17

Extrapolación de las reservas de petróleo a cierre de año en la situación 1

Año	Variación de producción (%)	Producción (MMbbl)	IRR (%)	Incorporación total (MMbbl)	Cambio neto de reservas	Reservas (MMbbl) cierre año
2022	0	328	1,7	557,29	229,47	2268,47
2023	0,08	354	1,72	608,96	254,91	2523,38
2024	0,06	375	1,75	656,75	281,46	2804,85
2025	0,07	402	1,68	674,61	273,06	3077,91
2026	0,09	438	1,8	787,85	350,16	3428,06

2027	0,11	486	2,	971,69	485,84	3913,91
2028	0,12	544	1,9	1033,87	489,73	4403,64
2029	0,14	620	1,83	1135,19	514,87	4918,51
2030	0,16	720	1,8	1295,24	575,66	5494,17
2031	0,19	856	1,75	1498,52	642,22	6136,39

Nota. La tabla ilustra la extrapolación de los recursos estimados para el petróleo, bajo las asunciones establecidas de la situación 1 y su intervalo de tiempo analizado.

Tabla 18

Base de cálculo para la situación 1

Reservas a cierre de año anterior	2039 MMbbl
Producción promedio	328 MMbbl

Nota. Tenga en cuenta que, a fin de obtener la extrapolación de las reservas de petróleo dentro del primer rango de tiempo, esta, tabla establece las condiciones iniciales o la base de cálculo para establecerlas.

5.4.1.2 Situación 2. En segundo lugar, se establece una situación donde la demanda energética en Colombia oscila dentro de cierto rango (buscando una tendencia constante) al asumir que a partir del año 2032 hasta el año 2041, el país presenta una mediana inclinación hacia la transición energética. Esto, en consecuencia, del agotamiento de las reservas convencionales de petróleo, a pesar de la posible aplicación de métodos y tecnologías que provean abasto ante la elevada demanda de energía.

Con relación a la situación 1, esta próxima hace seguimiento del mismo procedimiento expuesto anteriormente, a fin de, obtener la extrapolación dada para los años nombrados.

Tabla 19

Extrapolación de las reservas de petróleo a cierre de año en la situación 2

Año	Variación de producción (%)	Producción (MMbbl)	IRR (%)	Incorporación total (MMbbl)	Cambio neto de reservas	Reservas (MMbbl) cierre año
2032	0,182	1012	1,6	1619,43	607,28	6743,67
2033	0,191	1205	1,5	1808,19	602,73	7346,40
2034	0,187	1431	1,45	2074,78	643,90	7990,30
2035	0,189	1701	1,53	2603,02	901,70	8892,00
2036	0,185	2016	1,42	2862,81	846,75	9738,75
2037	0,183	2385	1,32	3148,20	763,20	10501,95
2038	0,188	2833	1,2	3400,06	566,68	11068,62
2039	0,186	3360	1,1	3696,43	336,04	11404,66
2040	0,19	3999	1,05	4198,81	199,94	11604,60
2041	0,189	4755	1	4754,65	0,00	11604,60

5.4.1.3 Situación 3. En consecuencia, se presenta una asunción, a partir del año 2041 hasta el año 2050, donde la demanda de energía en Colombia a partir del petróleo es totalmente reemplazada por la transición energética, a raíz del inminente agotamiento de las reservas convencionales de petróleo y los vanos esfuerzos en aumentarlas.

Las reservas obtenidas para esta situación y sus condiciones se expresan como:

Tabla 20

Extrapolación de las reservas de petróleo a cierre de año en la situación 3

Año	Variación de producción (%)	Producción (MMbbl)	IRR (%)	Incorporación total (MMbbl)	Cambio neto de reservas	Reservas (MMbbl) cierre año
2042	0,17	5563	1	5562,94	0,00	11604,60
2043	0,16	6453	0,99	6388,48	-64,53	11540,07
2044	0,14	7356	0,98	7209,30	-147,13	11392,95
2045	0,1	8092	0,95	7687,47	-404,60	10988,34
2046	0,095	8861	0,91	8063,35	-797,47	10190,87
2047	0,09	9658	0,89	8595,89	-1062,41	9128,45
2048	0,07	10334	0,87	8990,91	-1343,47	7784,99
2049	0,05	10851	0,869	9429,60	-1421,49	6363,49
2050	0,01	10960	0,857	9392,38	-1567,22	4796,27

A fin de establecer el potencial que posee Colombia de obtener hidrógeno, mediante el petróleo como materia prima. Se realiza el conjunto de las situación 1, 2 y 3 y se procede a simular.

Tabla 21*Reservas de petróleo a simular*

Año	Reservas (MMbbl) Cierre año	Año	Reservas (MMbbl) Cierre año	Año	Reservas (MMbbl) Cierre año
2022	2268,47	2032	6743,67	2042	11604,60
2023	2523,38	2033	7346,40	2043	11540,07
2024	2804,85	2034	7990,30	2044	11392,95
2025	3077,91	2035	8892,00	2045	10988,34
2026	3428,06	2036	9738,75	2046	10190,87
2027	3913,91	2037	10501,95	2047	9128,45
2028	4403,64	2038	11068,62	2048	7784,99
2029	4918,51	2039	11404,66	2049	6363,49
2030	5494,17	2040	11604,60	2050	4796,27
2031	6136,39	2041	11604,60		

5.4.1.4 Situación 4. La situación 4 establece de igual manera, la unión o conjunto de las situaciones desarrolladas anteriormente. Donde, aun cuando las condiciones de entrada siguen el mismo procedimiento, esta situación varia de tener un índice de reposición de reservas variable para cada rango de tiempo, a poseer un IRR constante durante toda la simulación.

Sin embargo, en vista de estudiar las probabilidades que se podrían presentar con la variación del índice nombrado, se procede a emplear un IRR bajo, medio y alto que vaya de la mano con su definición y objetivo.

Tabla 22*Variación del IRR en la situación 4 del petróleo como materia prima*

IRR	Porcentaje
Alto	200 %
Medio	160 %
Bajo	70 %

5.4.2 Escenario 2: Gas natural como materia prima para la producción de hidrógeno

En similitud con el escenario 1, este, considera la producción promedio de gas natural obtenida en Colombia durante los últimos años.

Tabla 23*Histórico de reservas de gas natural 2011 - 2021*

Año	Producción anual de gas natural (GPC)
2011	392
2012	427
2013	456
2014	421
2015	417
2016	389
2017	359
2018	386
2019	391
2020	381
2021	395
2022	401

Nota. El promedio de la producción obtenida en los últimos años estima una producción para el año 2022 en el orden de los 401 giga pies cúbicos.

5.4.2.1 Situación 1. Esta situación plantea la demanda energética a partir del gas natural en Colombia dentro de un rango bajo y relativamente constante, que, transcurre en paralelo con el aumento de la demanda energética enfocada al petróleo, dentro de los años 2022 – 2031. Por consecuente, la producción de gas natural se establece de acuerdo con las necesidades industriales, mientras que, la producción de petróleo crece progresivamente.

5.4.2.2 Situación 2. Se asume que las exigencias nacionales a partir del gas natural están en aumento, debido a, pequeñas medidas que implementan progresivamente tecnologías y métodos relacionados a la transición energética en Colombia que requieren de este tipo de materia prima, a fin de obtener hidrógeno. Lo anterior indica que, la producción de gas metano está siendo va en aumento, pero, el petróleo sigue siendo la fuente principal de energía, a pesar, del posible agotamiento de este recurso convencionales de petróleo.

5.4.2.3 Situación 3. En consecuencia, se presenta una asunción, a partir del año 2041 hasta el año 2050, donde la demanda de energía en Colombia está influenciada totalmente por la producción de gas metano ante los requerimientos de hidrógeno como combustible y materia prima para la síntesis de varias aplicaciones en el área industrial. Esto indica que los aportes energéticos a partir del petróleo están siendo reemplazado, a causa del agotamiento de las reservas convencionales y sus fuertes emisiones.

En consideración con lo establecido, se asumen los porcentajes que influyen el aumento o la disminución de la producción anual de gas metano, y, su respectivo IRR que genere el alargamiento de la autosuficiencia de estos recursos.

Las reservas obtenidas para esta situación y sus condiciones se expresan como:

Tabla 24

Reservas a simular en el escenario del gas natural

	Año	Variación de producción (%)	Producción (GPC)	IRR (%)	Incorporación total (GPC)	Cambio neto de reservas	Reservas (GPC) Cierre año
Situación 1	2022	0	401,27	1,1	441,40	40,13	3204,13
	2023	0,08	433,37	1,15	498,38	65,01	3269,13
	2024	0,06	459,38	1,25	574,22	114,84	3383,98
	2025	0,12	514,50	1,18	607,11	92,61	3476,59
	2026	0,09	560,81	1,2	672,97	112,16	3588,75
	2027	0,11	622,50	1,1	684,75	62,25	3651,00
	2028	0,1	684,75	1,12	766,92	82,17	3733,17
	2029	0,07	732,68	1,15	842,58	109,90	3843,07
	2030	0,14	835,25	1,18	985,60	150,35	3993,42
	2031	0,13	943,84	1,2	1132,60	188,77	4182,18
Situación 2	2032	0,136	1072,20	1,21	1297,36	225,16	4407,34
	2033	0,14	1222,31	1,26	1540,10	317,80	4725,14
	2034	0,143	1397,09	1,3	1816,22	419,13	5144,27
	2035	0,157	1616,44	1,36	2198,36	581,92	5726,19
	2036	0,16	1875,07	1,44	2700,10	825,03	6551,22
	2037	0,162	2178,83	1,48	3224,67	1045,84	7597,06
	2038	0,165	2538,34	1,5	3807,51	1269,17	8866,23
	2039	0,169	2967,32	1,53	4539,99	1572,68	10438,91
	2040	0,17	3471,76	1,56	5415,95	1944,19	12383,09
	2041	0,175	4079,32	1,6	6526,91	2447,59	14830,68
Situación 3	2042	0,183	4825,83	1,62	7817,85	2992,02	17822,70
	2043	0,191	5747,57	1,68	9655,91	3908,35	21731,05
	2044	0,198	6885,59	1,7	11705,50	4819,91	26550,96
	2045	0,23	8469,27	1,72	14567,15	6097,87	32648,83
	2046	0,33	11264,13	1,78	20050,15	8786,02	41434,85
	2047	0,36	15319,22	1,8	27574,59	12255,37	53690,22
	2048	0,4	21446,90	1,82	39033,36	17586,46	71276,69
	2049	0,42	30454,60	1,83	55731,92	25277,32	96554,01
	2050	0,46	44463,72	1,85	82257,88	37794,16	134348,17

5.4.2.1 Situación 4. El conjunto de las situaciones desarrolladas anteriormente, son estudiadas a partir de las asunciones planteadas al indicar que las condiciones de entrada mantienen los parámetros de entrada, variando el índice de reposición de reservas en cada intervalo de tiempo.

Sin embargo, en vista de estudiar las probabilidades que se podrían presentar con la variación del índice nombrado, se procede a emplear un IRR bajo, medio y alto que vaya de la mano con su definición y objetivo.

Tabla 25

Variación del IRR en la situación 4 del gas natural como materia prima

IRR	Porcentaje
Alto	240 %
Medio	160 %
Bajo	80 %

5.4.3 Escenario 3: Carbón como materia prima para la producción de hidrógeno

La Federación Nacional de Productores de Carbón (Fenalcarbón) (2019), informó que “Colombia tiene recursos y reservas de 16.569 millones de toneladas de carbón, un potencial que, con los niveles actuales de producción, permitirá al país seguir siendo uno de los principales exportadores del mundo durante los próximos 180 años”.

Por esta razón el escenario del carbón como materia prima para la producción de hidrógeno, no requiere de índices encargados de recuperar las reservas producidas para garantizar la autosuficiencia de este.

Siendo, así se procede a estimar la producción promedio esperada al final del año 2022, en función de la producción obtenida durante los últimos años

Tabla 26*Histórico de producción de carbón 2011 - 2021*

Año	Producción (M ton)
2011	85,8
2012	89,8
2013	86
2014	89,4
2015	86,5
2016	91,2
2017	91,3
2018	86,4
2019	85,4
2020	53,5
2021	53,5
2022	82

Nota. El promedio de la producción obtenida en los últimos años estima una producción para el año 2022 en el orden de los 82 millones de toneladas de carbón.

Tabla 27*Estimación de reservas de carbón hasta el 2050*

Año	Producción (M ton)
2022	16918
2023	16837
2024	16755
2025	16673
2026	16591
2027	16510
2028	16428
2029	16346
2030	16265

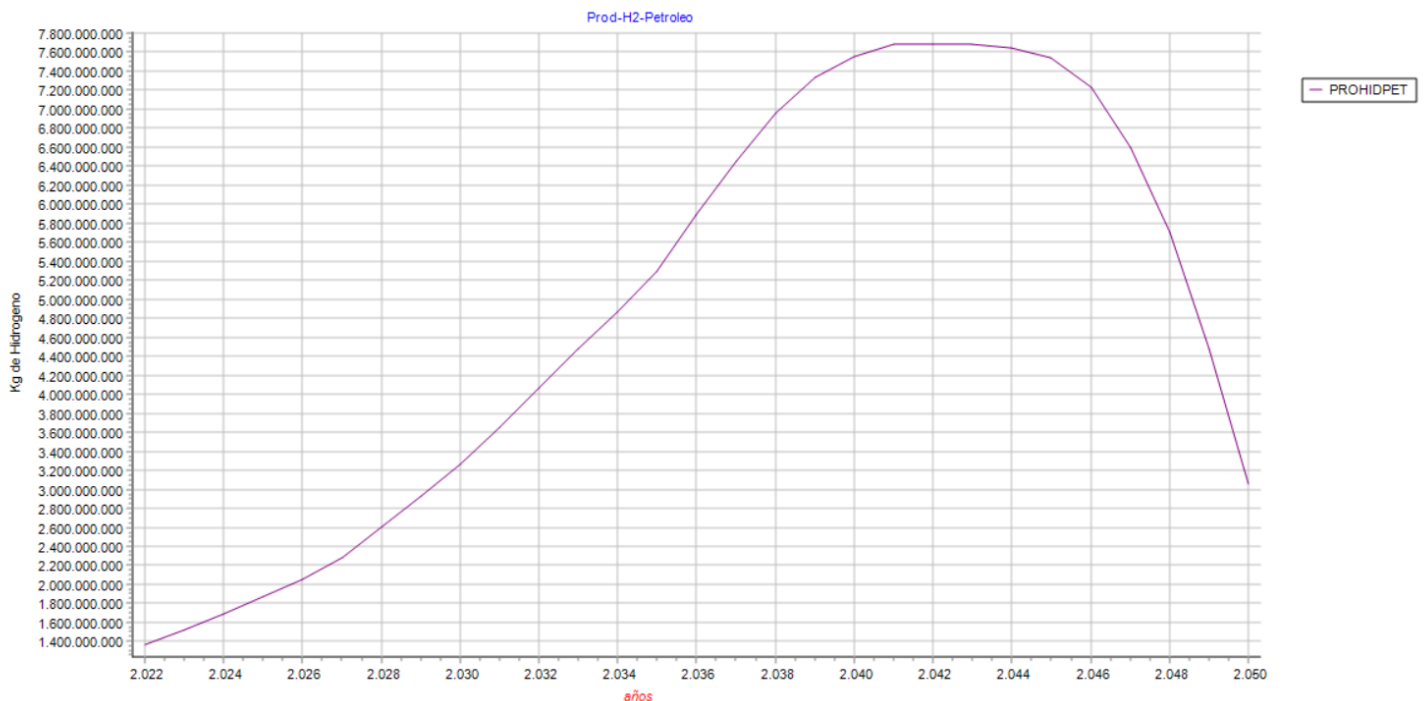
2031	16183
2032	16101
2033	16019
2034	15938
2035	15856
2036	15774
2037	15693
2038	15611
2039	15529
2040	15448
2041	15366
2042	15284
2043	15202
2044	15121
2045	15039
2046	14957
2047	14876
2048	14794
2049	14712
2050	14630

6. Análisis de los resultados

A fin de establecer el potencial que posee Colombia de obtener hidrógeno, mediante el petróleo como materia prima. Se realiza la simulación del conjunto de situación 1, 2 y 3 en el escenario de petróleo como materia prima.

Figura 15

Producción de hidrógeno a partir del petróleo



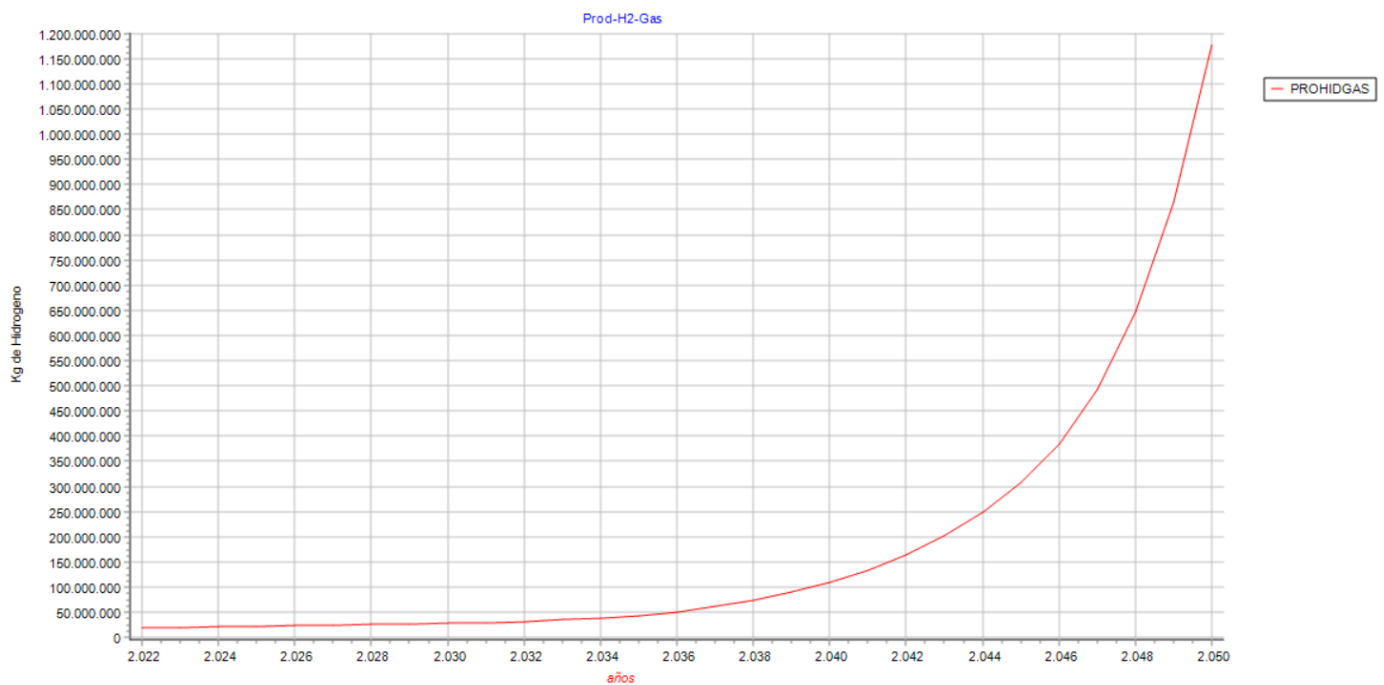
En la producción de hidrógeno a partir del petróleo, se presenta una similitud en la tendencia con respecto a las reservas de petróleo, debido a que, se asume que todas las reservas obtenidas desde el año 2022 hasta el 2050 se transforman potencialmente en hidrógeno.

Según la gráfica, durante el intervalo de tiempo de la situación 1, se puede observar una tendencia de crecimiento exponencial, dentro de las reservas obtenidas de hidrógeno. Lo que indica, un aumento considerable en el índice de reposición de reservas (IRR), relacionado a la

capacidad que posee Colombia en suplir la demanda energética y sobre abastecerse de este recurso, gracias a que tiene bastantes tecnologías y métodos para esta reposición de reservas. Donde en la situación 2, a pesar de tener las suficientes herramientas para el descubrimiento y aumento de estas, se agota el recurso, viendo como solución la implementación de una transición energética. Lo que conlleva a la situación 3, al no tener la capacidad de reponer las reservas producidas para abastecer y suplir esa demanda energética que constantemente va en aumento, se implanta definitivamente la transición energética.

Figura 16

Producción de hidrógeno a partir del gas natural



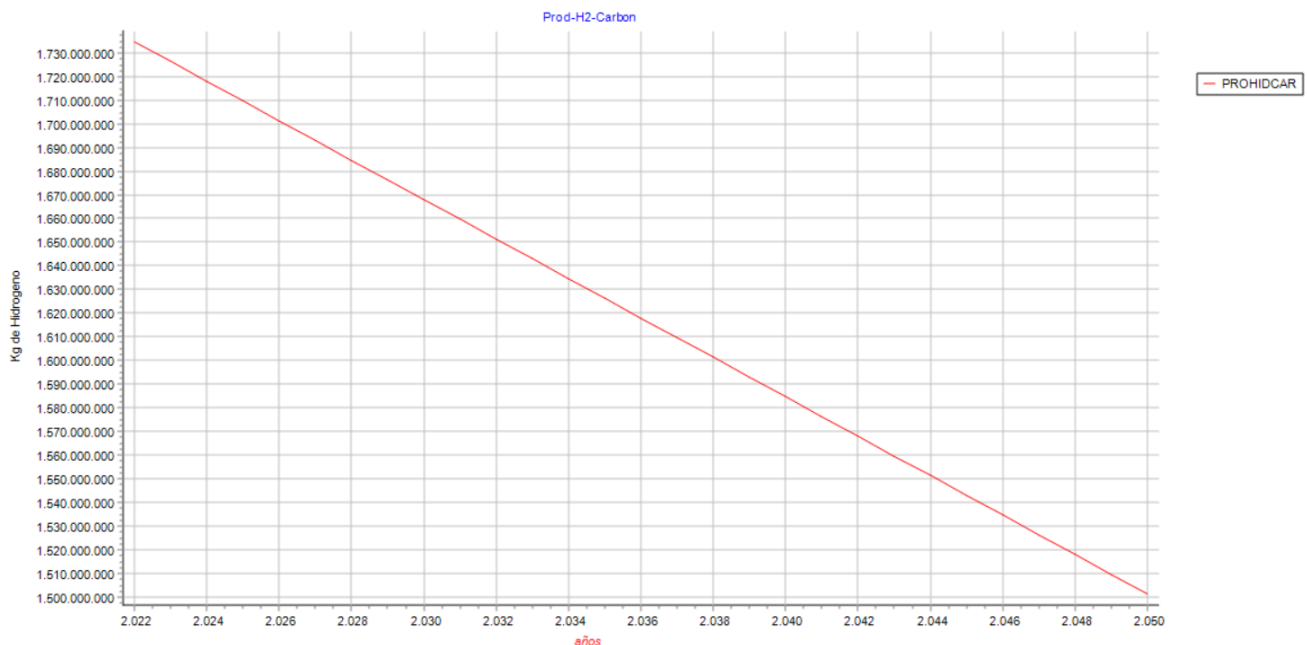
En la producción de hidrógeno a partir del gas natural, se presenta una similitud en la tendencia con respecto a las reservas del gas natural, debido a que, se asume que todas las reservas obtenidas desde el año 2022 hasta el 2050 se transforman potencialmente en hidrógeno.

Según la gráfica, se puede concluir que Colombia en el lapso de la situación 1 por falta de tecnología y herramientas, para recuperar y reponer las reservas producidas de gas, no tiene un IRR muy alto, pero al menos si mayor al 100%, siendo así autosuficiente en el abastecimiento de la demanda energética, necesitando aumentar considerablemente esa reposición de reservas. Llegando a la situación 2, en la que se empiezan a mejorar las tecnologías de reposición, obteniendo consigo un aumento significativo de las reservas, con índices de reposición cercanos a 160%. En la situación 3, Colombia ya atraviesa una transición energética, que, gracias a sus investigaciones y métodos, ha podido aumentar considerablemente sus reservas de hidrógeno, para suplir la demanda energética, y reducir el impacto ambiental que se tenía antes de la transición energética.

Cabe resaltar que esa producción de hidrógeno a partir de todas las reservas es visto como un potencial con el que cuenta el país, al momento de profundizar en la transición energética.

Figura 17

Potencial de producción de hidrógeno a partir del carbón

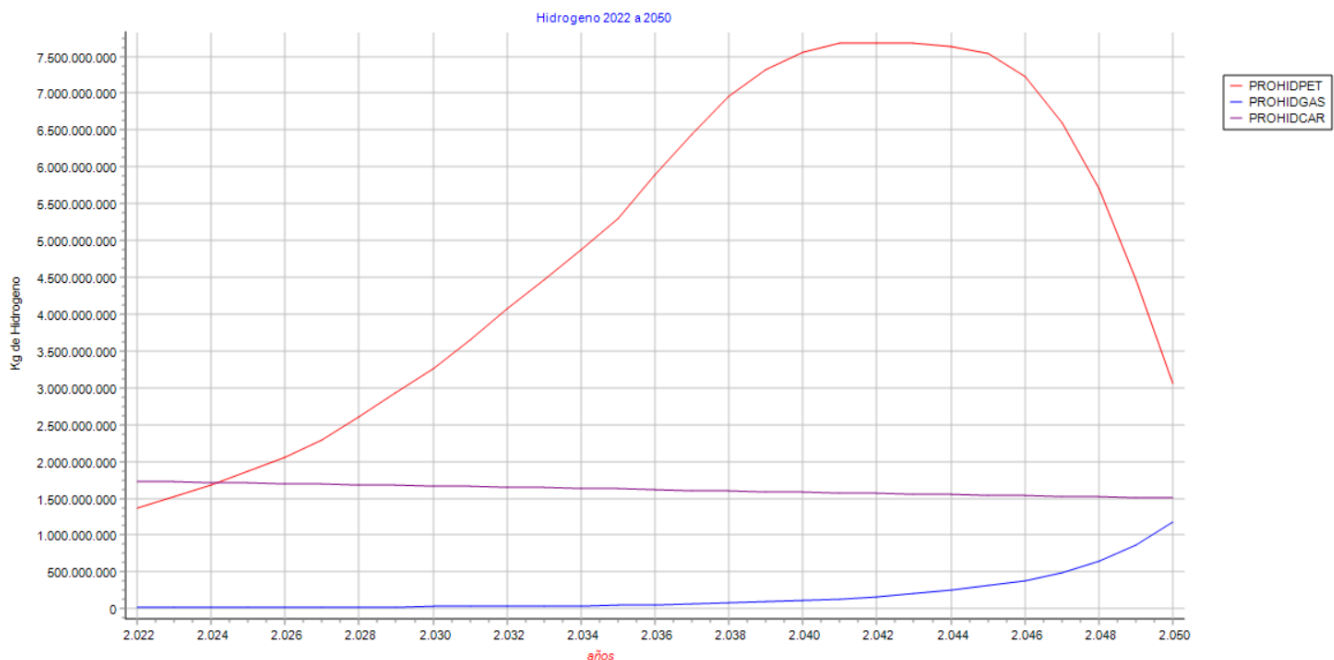


En la producción de hidrógeno a partir del carbón, se presenta una similitud en la tendencia con respecto a las reservas del carbón, debido a que, se asume que todas las reservas obtenidas desde el año 2022 hasta el 2050 se transforman potencialmente en hidrógeno.

En este escenario, no se tiene en cuenta la implementación del IRR debido a que las reservas presentes para el año 2022 son suficientes para abastecer la producción de hidrógeno a lo largo del tiempo sin que estas se agoten, teniendo en cuenta que la producción de carbón sea constante al paso de año tras año.

Figura 18

Potencial de producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles

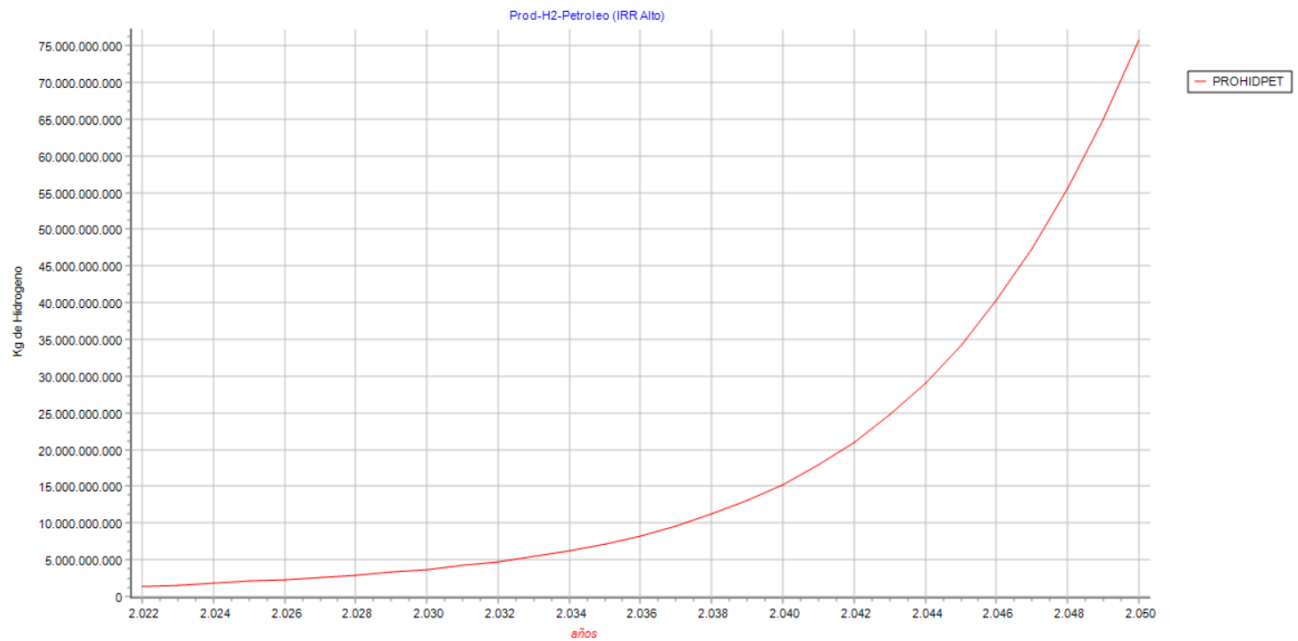


En la siguiente grafica se puede apreciar el diferente comportamiento y producción de hidrógeno a partir de los recursos no renovables, teniendo el gas natural como escenario prometedor, ya que al pasar de los años se implementan nuevas tecnologías para ir aumentando las reservas de

hidrógeno, a diferencia del carbón y petróleo que al pasar el tiempo disminuyen las reservas llegando el punto en que se puedan agotar.

Figura 19

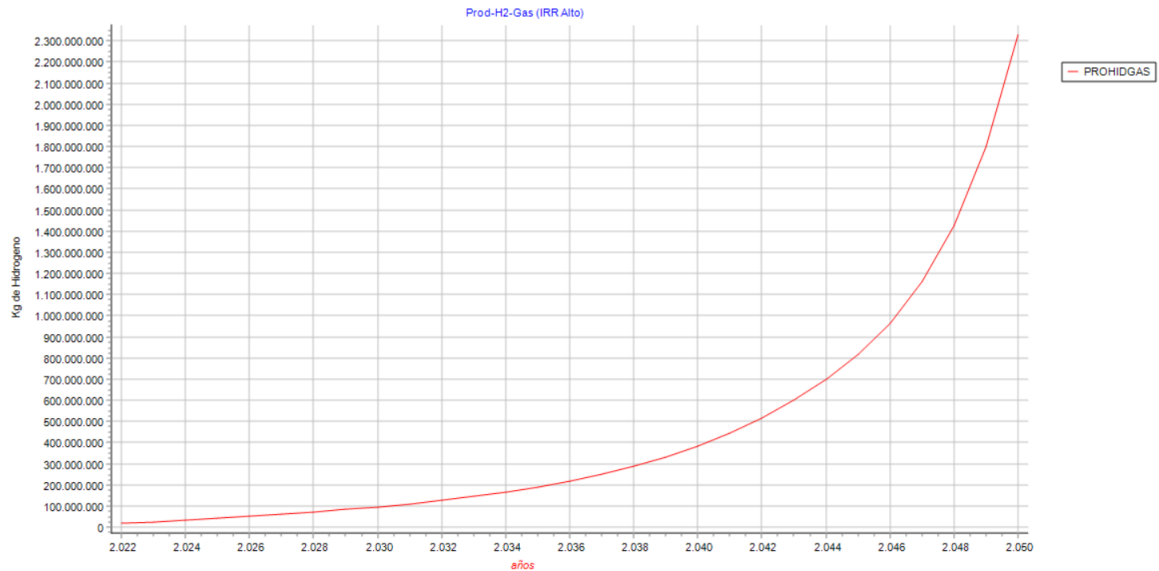
Producción de hidrógeno a partir de petróleo con IRR alto



Para este escenario se planteó tomar un IRR constante a lo largo de la simulación, este se estimó teniendo en cuenta los índices de reposición que tuvieron las reservas de años anteriores y se estipuló que al tener índices altos podremos siempre abastecer las reservas producidas y consumidas para atender la demanda energética, que al paso de los años siempre irá aumentando. Llegando al punto de producir en el año 2050 aproximadamente 75 mil millones de kg de hidrógeno mediante esta materia prima.

Figura 20

Producción de hidrógeno a partir del gas con IRR alto

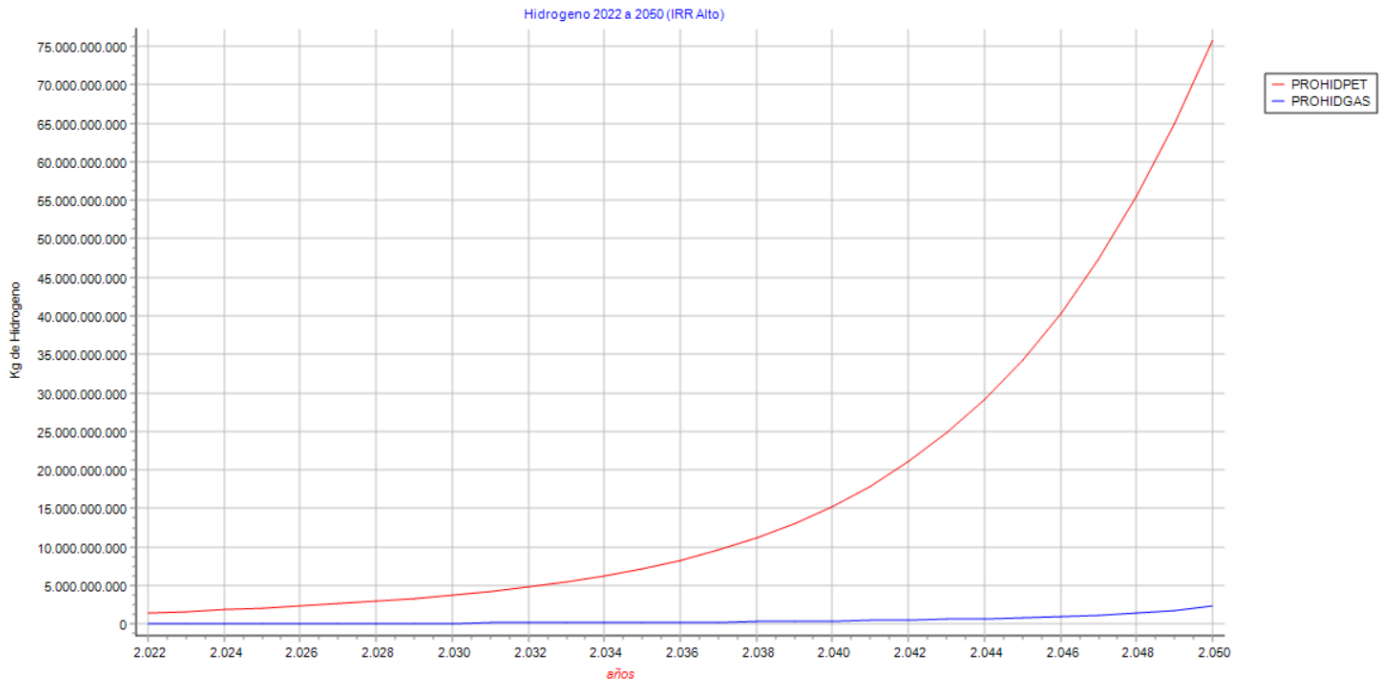


En este caso se aplicó un IRR constante a lo largo de la simulación, este se estimó teniendo en cuenta el historial de los índices de reposición obtenidos para los últimos años, estimándose un IRR de 240%, como resultado de la producción y reposición de reservas, se tiene un potencial de hidrógeno cercano de 2 mil millones kg en el año 2050, siendo la opción más favorable debido al aumento de reservas gasíferas.

Además, complementa el alto gasto energético que viene en aumento debido al crecimiento poblacional y la reestructuración del sistema energético colombiano.

Figura 21

Comparación de la producción de hidrógeno a partir de petróleo y gas natural con IRR alto

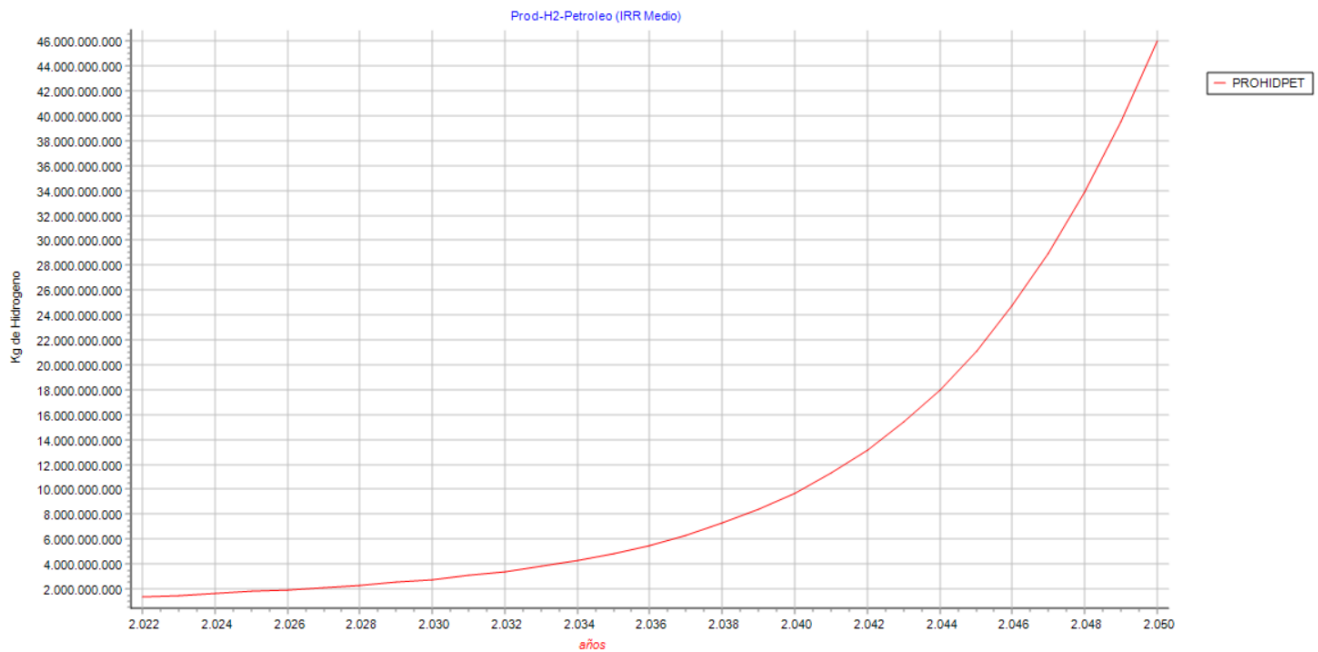


Reuniendo la información obtenida en las situaciones con índices de reposición altos, tanto del petróleo como del gas, ambas situaciones aumentan de manera significativa sus reservas, y a su vez aumenta el potencial de hidrógeno producido, supliendo efectivamente el gasto energético correspondiente para cada uno.

Sin embargo, el petróleo se comporta de manera exponencial a diferencia del gas que muestra un crecimiento gradual a lo largo de los años. Teniendo un potencial de hidrógeno con valores cercanos a 76 mil millones de kg y 2.3 mil millones de kg respectivamente.

Figura 22

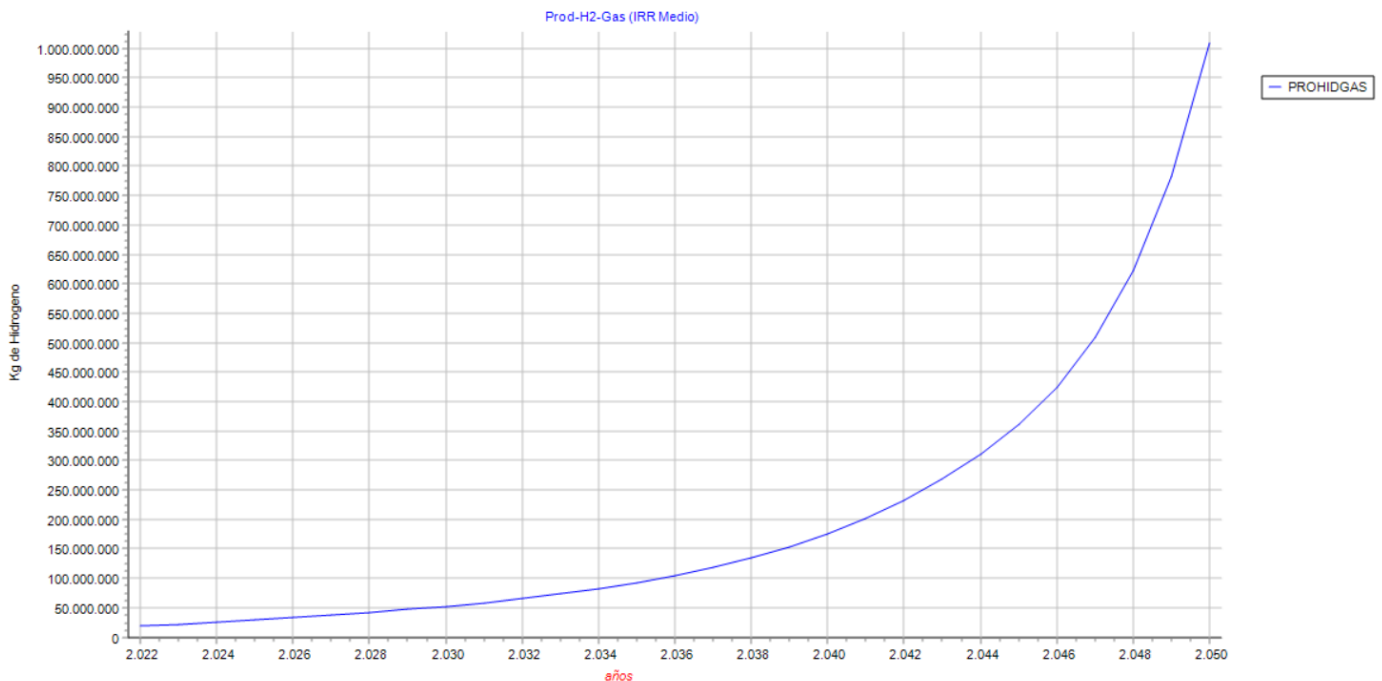
Producción de hidrógeno a partir del petróleo con IRR medio



En este caso se manejó un IRR constante, con valor medio, siendo este 160%. Como en el escenario anterior (IRR alto) se tiene una producción de hidrógeno con crecimiento exponencial, capaz de abastecer la alta demanda energética que presenta el país a lo largo de los años, teniendo un potencial de hidrógeno producido a partir de esta reserva, siendo aproximadamente 46 mil millones de kg de hidrógeno para el año 2050.

Figura 23

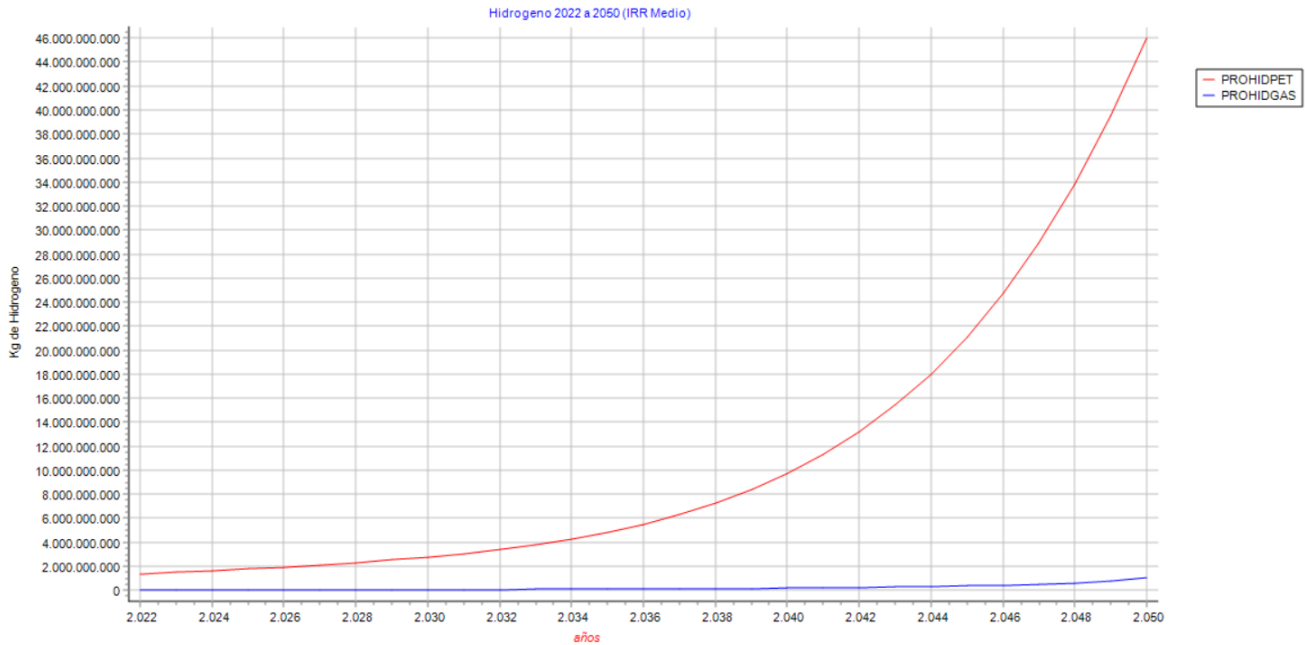
Producción de hidrógeno a partir del gas natural con IRR medio



El escenario del gas con la implementación de un IRR medio constante, presenta una producción exponencial, un poco menos pronunciada que la del petróleo, debido a que las reservas existentes para los primeros años son bajas, siendo esto, una consecuencia del no poseer las tecnologías y herramientas avanzadas para la recuperación de estas reservas. El valor del IRR actual, se planteó con respecto a los índices ilustrados durante los últimos años, estimando un valor medio de 160%. Obteniendo con este un potencial aproximado de mil millones de kg de hidrógeno para el año 2050.

Figura 24

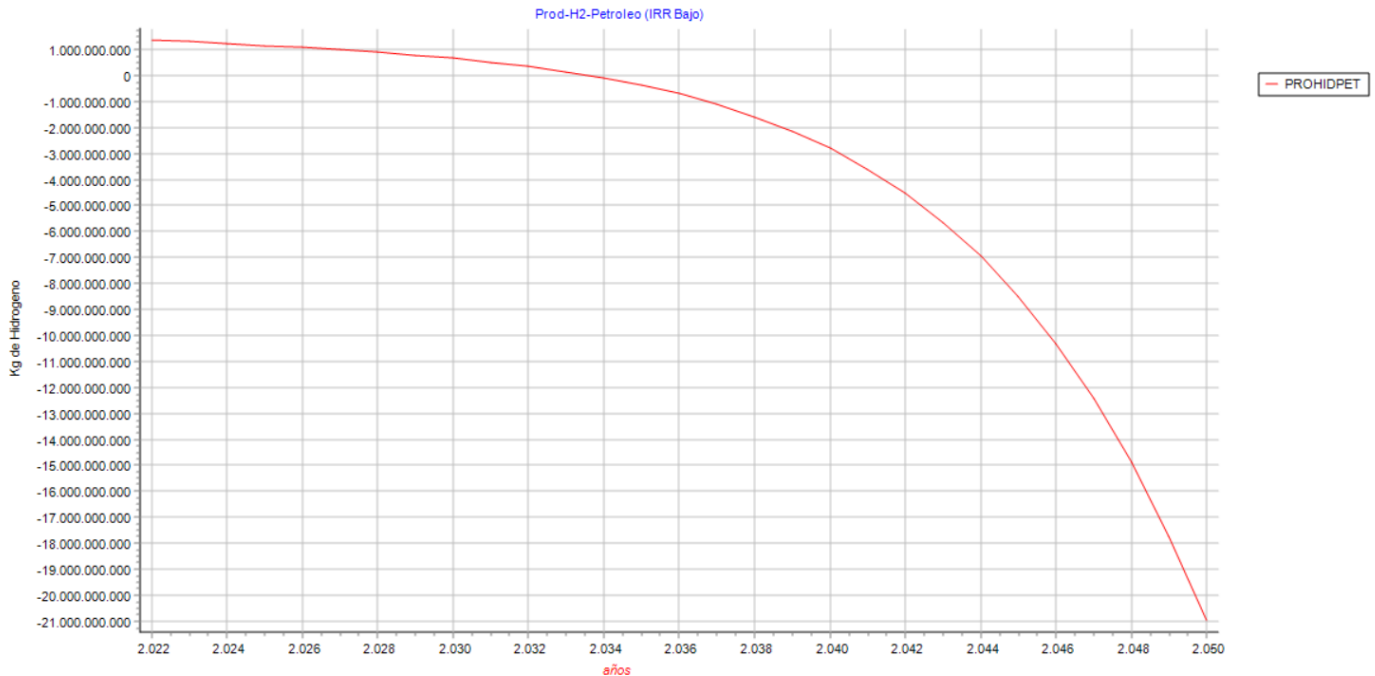
Comparación de la producción de hidrógeno a partir de petróleo y gas natural con IRR medio



Mediante esta grafica se evidencia la gran diferencia del potencial de hidrógeno que existe entre producir el hidrógeno a partir de las reservas de petróleo o gas natural, teniendo un IRR medio. Donde se arranca el año 2022 con un potencial aproximado de 1.400 millones kg de hidrógeno a partir de las reservas de petróleo, y, un potencial aproximado de 20 millones kg de hidrógeno a partir de las reservas de gas natural.

Figura 25

Producción de hidrógeno a partir del petróleo con IRR bajo

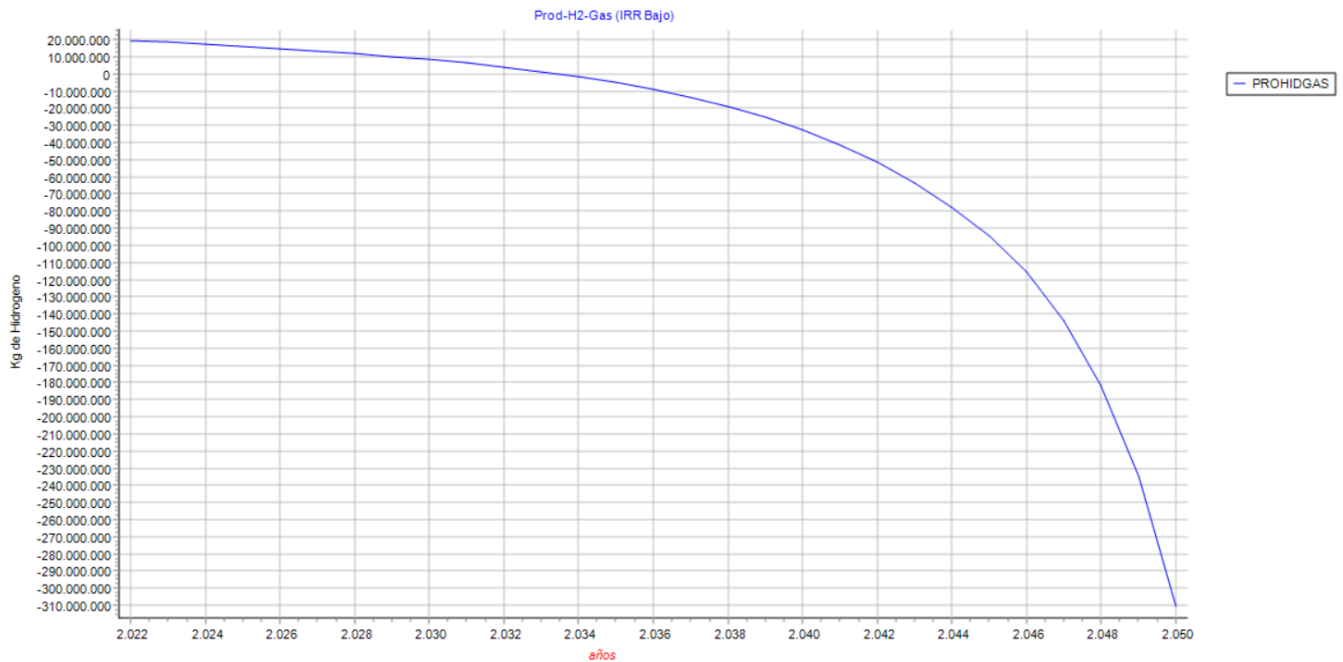


Para este escenario se planteó tomar un IRR bajo, en base al historial de los diferentes índices de reposición de reservas a lo largo de los años en Colombia con respecto al petróleo, estipulando un valor cercano al 70 % basado en las reservas actuales, perdería su auto sostenimiento energético aproximadamente en 12 años, afectando fuertemente la economía, perdiendo la capacidad de autoabastecimiento, viéndose en la obligación de importar recursos de otros países, aumentando consigo los costos de producción de hidrógeno. Teniendo como consecuencia un retraso en su proceso de transición energética.

Además, debe importar aproximadamente 21 mil millones kg de hidrógeno para suplir su gasto energético en el año 2050.

Figura 26

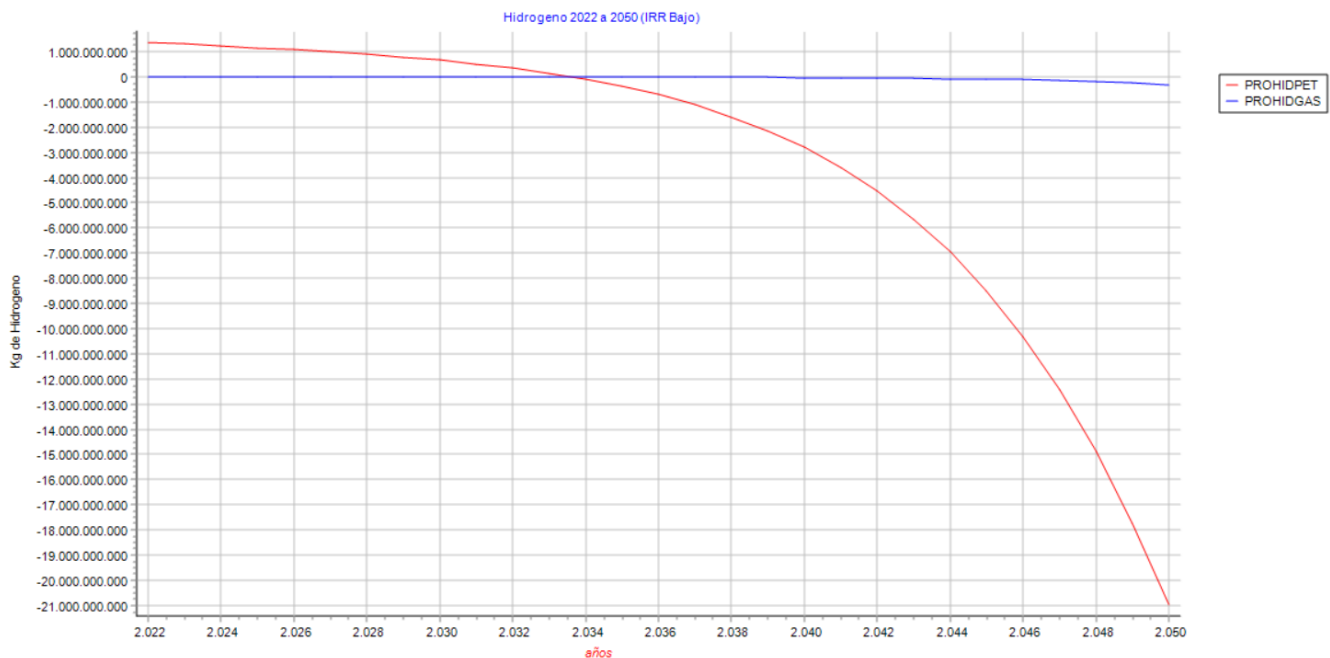
Producción de hidrógeno a partir del gas natural con IRR bajo



Para este escenario se planteó tomar un IRR constante a lo largo de la simulación, este se estimó teniendo en cuenta los índices de reposición obtenidos para las reservas de años anteriores, siendo para este caso un IRR bajo de 80%, dando como resultado la importación de 310 millones kg de hidrógeno para el año 2050. Teniendo una autosuficiencia hasta el año 2034.

Figura 27

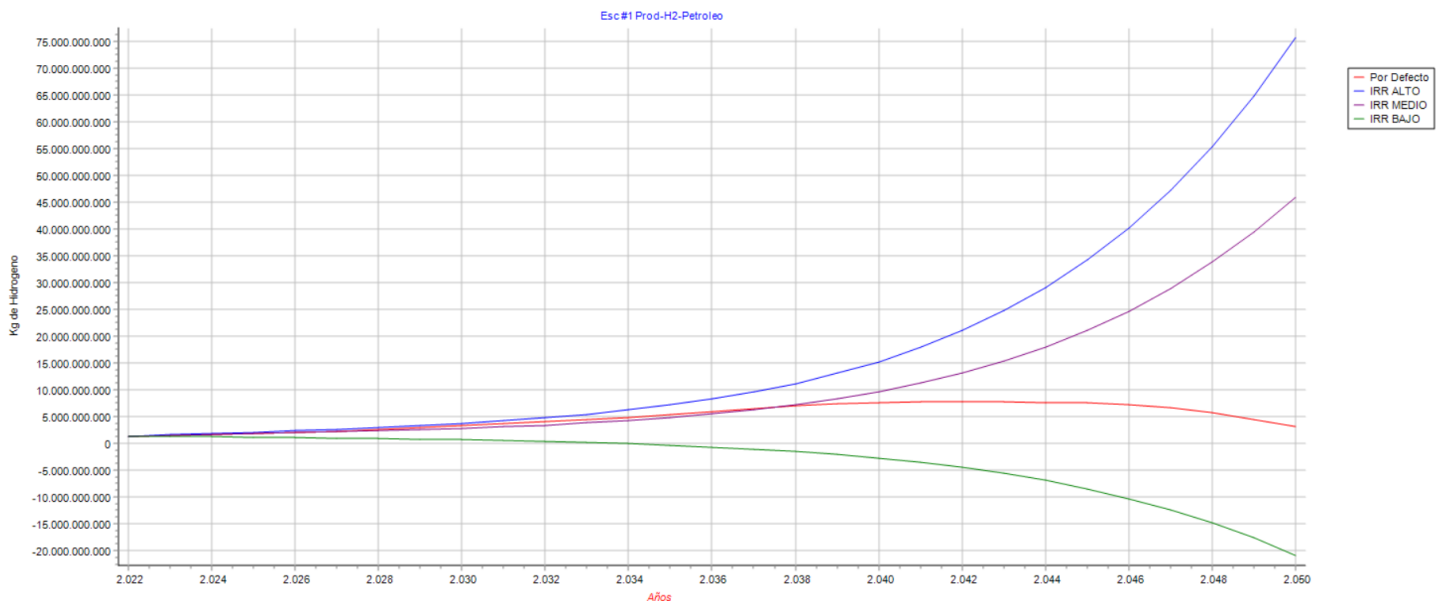
Comparación de la producción de hidrógeno a partir de petróleo y gas natural con IRR bajo



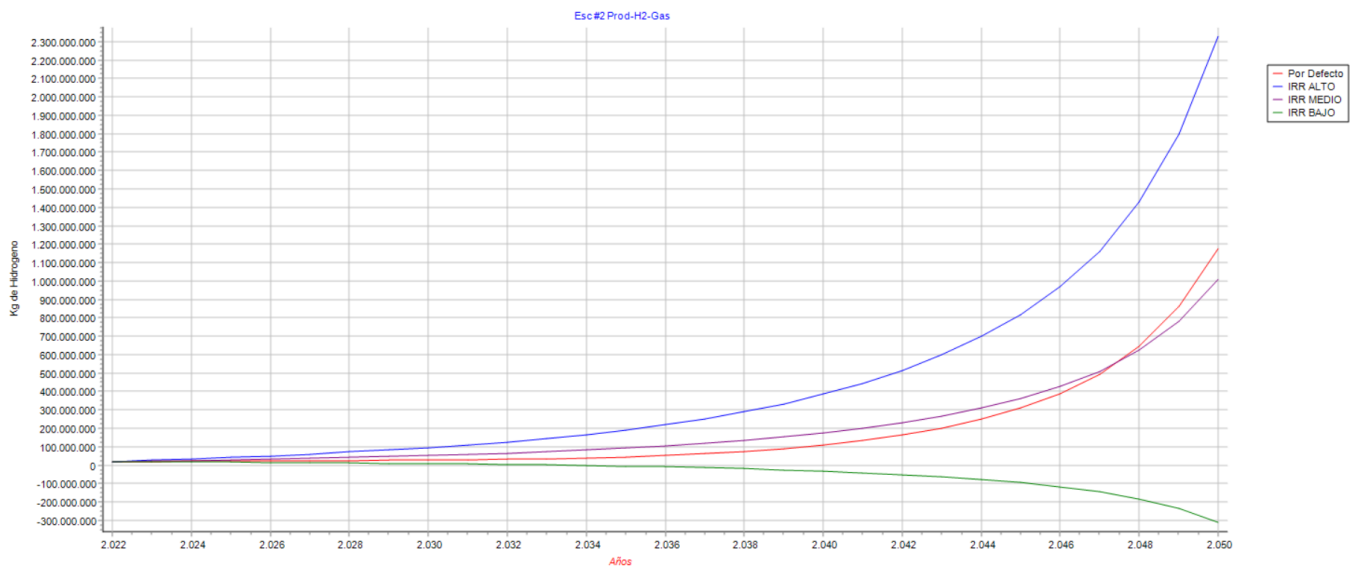
Comparando la información obtenida en las situaciones con índices de reposición bajos, tanto del petróleo como del gas, ambas situaciones son desfavorables para el sector energético, teniendo en similitud la vida útil de las reservas, la cual finalizaría aproximadamente en 12 años debido al bajo IRR.

Además, afectaría de manera directa su potencial de hidrógeno producido, debiendo importar más de 230 millones kg de hidrógeno producido en base al gas y 21 mil millones kg de hidrógeno producido a partir del petróleo.

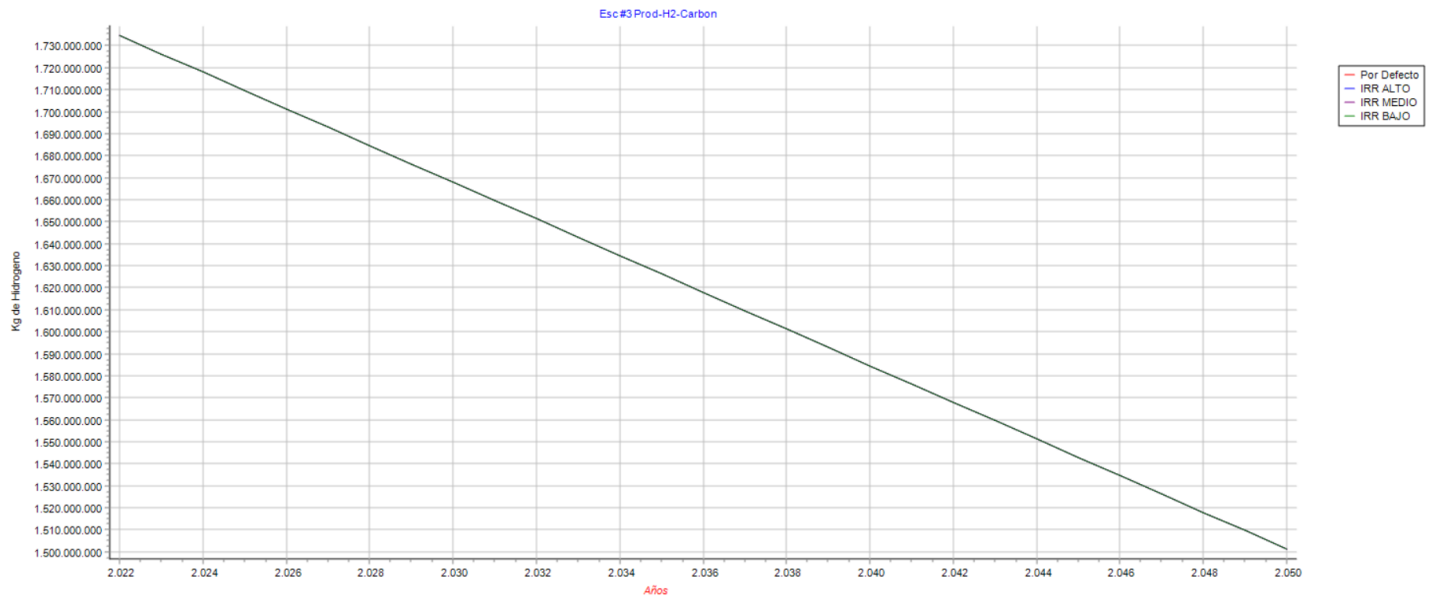
Teniendo como comportamiento un decrecimiento exponencial a partir del 2034 en ambos casos, pero de manera más pronunciada en el petróleo.

Figura 28*Escenario 1: Producción de hidrógeno a partir del petróleo*

Para el escenario 1, se evidencia las diferentes situaciones planteadas para la producción de hidrógeno a partir del petróleo, donde notoriamente el caso en el que se mantiene el IRR alto constante, es el principal precursor de una alta producción de hidrógeno. Pero a su vez las emisiones de CO_2 son directamente proporcionales a la producción de hidrógeno, por lo cual, se ven en la obligación de implementar un sistema de captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CCS), que trae consigo una reducción considerable de las emisiones generadas al medio ambiente. Y la situación más desfavorable es la que tiene el IRR bajo, ya que se agotan las reservas en un tiempo determinado, ocasionando la importación de recursos para abastecer la transición y demanda energética del país.

Figura 29*Escenario 2: Producción de hidrógeno a partir del gas natural*

En este caso se reúnen los posibles escenarios planteados para la producción de hidrógeno a partir del gas, notando que el IRR alto, es la tendencia que más se pronuncia exponencialmente generando unos resultados muy favorables con estimación de 2400 millones kg de hidrógeno potencialmente, a comparación de los escenarios de IRR alto, medio y bajo, de los cuales el alto y medio (240%-160%) tendrán un crecimiento exponencial en la producción de hidrógeno a base gas. La implementación del sistema de captura y almacenamiento de CO_2 (CCS) disminuirá notoriamente las emisiones generadas por la producción de este hidrógeno.

Figura 30*Escenario 3: Producción de hidrógeno a partir del carbón*

El escenario #3, es un caso sencillo de analizar, debido a que como no tiene implementación de IRR, a causa de su gran cantidad de reservas con las que inicia el año 2022, y de acuerdo con su producción anual, no presenta un agotamiento significativo durante el lapso planteado para el análisis del uso de hidrógeno como energía alternativa mediante la gasificación del carbón. Las emisiones de CO_2 al ser directamente proporcionales, irán disminuyendo al pasar el tiempo, a su vez para disminuirlas aún más, se implementa el sistema de captura y almacenamiento (CCS).

7. Conclusiones

- Al realizarse la investigación pertinente relacionada al hidrógeno, se concluyó que este, posee gran capacidad para ser implementado como una fuente de energía alterna en el marco de la transición energética. Debido a su gran número de aplicaciones, baja emisión de contaminantes nocivos y gases de efecto invernadero hacia la atmosfera.
- Evaluando los diferentes métodos para la generación del hidrógeno mediante hidrocarburos, se determinó que el país cuenta con una alta viabilidad para su uso, si se implementan mecanismos a fin del aprovechamiento de las reservas probables.
- Se estima una alta viabilidad mediante los métodos de producción de hidrógeno proveniente de hidrocarburos (reformado de vapor, oxidación parcial, reformado autotérmico y gasificación).
- Por medio de la captación y almacenamiento de al menos el 56% de CO_2 generado a partir del método de reformado con vapor, se pueden disminuir las emisiones desde el orden de $9 \text{ kg } CO_2/H_2$ hasta $4 \text{ kg } CO_2/H_2$. Lo anterior favorece la implementación del gas natural como fuente primaria para la generación de hidrógeno, que a su vez genera menos emisiones de efecto invernadero.
- Se logra mediante la simulación de diferentes escenarios, identificar como escenario característico la producción de hidrógeno a partir del gas natural manteniendo índices de reposición de reservas altos y a su vez aplicando CCS para una contaminación con tendencia nula.

8. Recomendaciones

Se recomienda seguir investigando para lograr un desarrollo significativo enfocando esfuerzos en la producción de energías mediante el hidrógeno verde, debido a que el hidrógeno un elemento con alto aporte energético y abundante, tiene el potencial para ser a corto, mediano y largo plazo, un pilar para energía limpia y sostenible, sin embargo, está presente el reto de convertirlo en una fuente de energía más viable económicamente. Debido que cuenta con múltiples formas de producción mediante energías renovables, las cuales dependerá de factores externos (Disponibilidad de equipos, laboratorios, mayores estudios, clima entre otros) para lograr un incremento en la eficiencia de estos procesos. A su vez implementar una cadena productiva, eficaz y segura para su producción y distribución.

Referencias bibliográficas

- Asensio, P. (n.d). Hidrógeno y pila de combustible. Energía renovables para todos.
<https://www.fenercom.com/publicacion/hidrogeno-y-pila-de-combustible-2007/>
- Cabrea, J. A., y Azkarate, G. (2006). Hidrógeno y Pilas de Combustible – Estudio de Prospectiva.
https://www.researchgate.net/publication/295919534_Hidrogeno_y_Pilas_de_Combustible_Estudio_de_Prospectiva
- Familia, C. (2011). Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores actuales (Tesis de pregrado). Facultad de Náutica de Barcelona, Barcelona, España.
- Funez, C., y Reyes, L. (2019). El hidrógeno como vector energético – pieza clave en la descontaminación de la economía chilena.
<https://repositorio.uautonoma.cl/bitstream/handle/20.500.12728/3191/Hidrogeno.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=El%20hidr%C3%B3geno%20es%20una%20fuente,y%20la%20red%20de%20gas.>
- Gómez, G. (2014). Producción de hidrógeno por descomposición catalítica hidrocarburos ligeros empleando catalizadores carbonosos (Tesis doctoral). Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España.
- González, A. (n.d). Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. http://www2.udg.edu/Portals/88/proc_industrials/5%20%20Otros%20Combustibles-Hidrogeno.pdf
- Laguna, M. A. (2014). Hidrógeno y pilas de combustible: una alternativa energética limpia y eficiente. Revista de Química PUCP, 28(1-2).
<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/download/10412/10862/>

Nuevo, D. (2022). La pila de combustible TECPA. <https://www.tecpa.es/pila-combustible/>

Manual de planificación energética. (2017). Organización latinoamericana de energía (olade), Canadá.

Melaina, M., Penev, M., y Heimiller, D. (2013, septiembre). Potencial de producción de hidrógeno a partir de energía fósil y recursos renovables. Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL). <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/55626.pdf>

Plan energético nacional 2020- 2050. (2019, diciembre). UMPE, PEN 2050. https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Resumen_Ejecutivo_PEN_2020_2050.pdf

Plan energético nacional Colombia: ideario energético 2050. (2015). UMPE, PEN 2050.

Preciado, C. M., y Ramirez, J. A. (julio – diciembre, 2016). El petróleo: una alternativa económica, un gasto en seguridad. *Prospectivas en Inteligencia*, 8(17).

Ramon, J., Andreu, T., Garcia, G., Guilera, J., Tarancón, A., y Torrell, M. (2018). Hidrógeno – Vector energético de una economía descarbonizada. https://www.naturgy.com/files/LIBRO_HIDROGENO_Fundaci%C3%B3n_Naturgy.pdf

Reservas de crudo y gas del país, Corte a 31 de Diciembre de 2020. (2021, mayo). ANH. <https://www.anh.gov.co/estadisticas-del-sector/modulo-de-gestion-de-reservas>

Solorza, O. (2015). Hidrogeno - Aplicaciones Relaq. <http://www.relaq.mx/RLQ/tutoriales/hidrogeno/hidroaplicaciones.html>

Vanegas, D., Meléndrez, M., Celi, S., y Ayabaca, C. (2016). Métodos amigables de producción de hidrógeno como fuente de energía limpia. MTL, La Plata, Argentina. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/77368>