

Estado del arte del efecto del blending gas-hidrógeno a diferentes composiciones en tuberías
aptas para el transporte de gas natural

Bernardo Sneyder Estevez Gómez y Juan Manuel Jerez Villamizar

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Dario Yesid Peña Ballesteros

Ph.D en Corrosión

Codirector

Aníbal Serna Gil

Ph.D en Integridad

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela De Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mis padres, Alfonso y Judith quienes con su amor y su constante apoyo han sido mi inspiración y mi fortaleza en cada paso de este camino académico. Su sacrificio y dedicación han hecho posible que hoy pueda dedicar este logro a ustedes.

A mi hermano Camilo, quien han sido mi roca, mi refugio y mi fuente de alegría durante este viaje. Su aliento y comprensión han sido mi impulso para alcanzar mis metas y perseguir mis sueños con determinación.

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarme las herramientas para crecer intelectualmente y desarrollarme como profesional.

Agradezco profundamente a mis profesores, mentores y compañeros por su apoyo y guía a lo largo de esta travesía académica.

Juan Manuel Jerez V.

A mis padres, Tulia y Bernardo, quienes con sus esfuerzos, sacrificios, amor incondicional y apoyo inquebrantable han sido el faro que ha iluminado cada paso de este viaje académico, siendo mi principal inspiración en la realización de este mismo.

A mis hermanas, Jesika y Johanna, quienes con su apoyo constante y palabras de ánimo inquebrantable han sido mi fortaleza en los momentos más difíciles. Gracias por ser mi soporte y por compartir conmigo este camino hacia la realización de mis sueños.

A mi alma mater, la Universidad Industrial de Santander, por brindarme las herramientas y el conocimiento necesario para crecer tanto de manera personal como profesional. Agradezco a mis profesores y compañeros por su inspiración, guía y enseñanzas que han enriquecido mi experiencia académica.

Bernardo Sneyder Estevez Gomez

Agradecimientos

Agradecemos al Doctor Darío Yesid Peña Ballesteros por su invaluable orientación, y dedicación como director de este trabajo de grado. Su profundo conocimiento en el campo de la metalurgia y su compromiso con nuestro crecimiento académico han sido fundamentales para el desarrollo y la culminación de este proyecto. Apreciamos enormemente su guía experta y su constante apoyo a lo largo de este camino.

Asimismo, deseamos reconocer y agradecer a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la oportunidad de llevar a cabo esta investigación en un entorno académico excepcional. Agradezco profundamente el compromiso de la institución con la excelencia académica y su apoyo continuo a nuestro desarrollo profesional como futuros ingenieros metalúrgicos.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	10
1.1. Contexto y justificación.....	10
1.2. Objetivos del estado del arte.....	10
1.2.1. Objetivo general.....	10
1.2.2. Objetivos específicos.....	10
2. Fundamentos del Blending Gas-Hidrógeno.....	11
2.1. Introducción al blending de gases.....	11
2.2. Fundamentos del gas natural y del hidrógeno.....	12
2.2.1 Composición y propiedades del hidrógeno.....	13
2.2.2 Gas natural.....	14
2.2.3 Blending gas-hidrógeno.....	14
2.2.4 Composición gas-hidrógeno.....	15
2.2.5 Efectos del hidrógeno en materiales.....	15
2.3. Marco político y normativo.....	15
2.4. Sistema Power to Gas (PtG).....	17
2.5. Proceso de extracción y producción de hidrógeno verde.....	19
3. Compatibilidad de materiales en la infraestructura.....	20
3.1. Materiales utilizados en la infraestructura de gas natural.....	21
3.1.1 Materiales metálicos.....	21
3.1.1.1 Aceros al carbono.....	22
3.1.1.2 Acero inoxidable.....	22
3.1.1.3 Aleaciones específicas.....	22
3.1.2 Tuberías poliméricas.....	23
3.1.2.1 Polietileno (PE).....	23
3.1.2.2 Otros polímeros.....	23

3.2 Comparación entre los distintos materiales usados en la infraestructura de gas natural.....	24
3.3 Efectos del blending en los materiales.....	25
3.3.1 Aceros.....	25
3.3.2 Materiales poliméricos.....	27
3.3.2.1 Permeación del gas en materiales poliméricos.....	27
3.3.2.1 Efectos en propiedades mecánicas de los polímeros.....	28
3.4 Impacto sobre quemadores.....	28
3.4.1 Índice de Wobbe.....	28
3.4.1 Condiciones de la combustión.....	29
3.4.2 Velocidad de la llama.....	29
4. Casos de estudio y proyectos piloto.....	30
4.1 Estudios de caso exitoso.....	30
4.1.1 HyDeploy (Reino Unido).....	31
4.1.1.1 Fase 1. Prueba en la Universidad de Keele.....	31
4.1.1.2 Fase 2. Prueba en Winlaton.....	32
4.1.1.3 Fase 3 Habilitar la política del gobierno.....	33
4.1.2 Proyecto H2GN (Chile).....	33
4.1.2 Proyectos en Colombia.....	34
4.1.1.1 Proyecto piloto Promigas y Ecopetrol.....	35
4.1.1.2 PtX centro de operaciones en Colombia.....	36
4.2 Lecciones aprendidas de casos de estudio y proyectos piloto.....	38
4.3 Orientación para futuras implementaciones.....	38
5. Síntesis de los hallazgos.....	38
6. Limitaciones y áreas de investigación futura.....	39
7. Conclusiones.....	40
Referencias bibliográficas.....	43

Índice de figuras

	Pág.
Figura 1. Vista esquemática del sistema PtG con blending gas-hidrógeno en la red de gas natural.....	18
Figura 2. Propagación de grietas en una superficie de fractura frágil debido al hidrógeno.....	26
Figura 3. Las propiedades domésticas y comerciales incluidas en el ensayo Keele HyDeploy (marcadas en verde).....	31
Figura 4. Proyectos de hidrógeno en Colombia.....	34
Figura 5. Así es el primer proyecto piloto de producción de hidrógeno en el país.....	35
Figura 6. Regiones seleccionadas para la creación de Hubs.....	37

Índice de Tablas

	Pág.
Tabla 1. : Limites para la mezcla de hidrógeno en la red de gas, basado en las normativas nacionales vigentes.....	16
Tabla 2: Comparación entre los distintos materiales usados en la infraestructura de gas natural.....	24

Resumen

Título: estado del arte del efecto del blending gas-hidrógeno a diferentes composiciones en tuberías aptas para el transporte de gas natural

Autor: Bernardo Sneyder Estevez Gómez y Juan Manuel Jerez Villamizar

Palabras Clave: Blending, hidrógeno, gas natural, transporte

Descripción:

El mundo busca una transición hacia fuentes de energía limpias y sostenibles, donde el blending de hidrógeno con gas natural aplicada en las redes de gasoductos existentes plantea una transición efectiva hacia una generación energética sostenible y libre de carbono. Así surge la necesidad de realizar este estado del arte que permita conocer los procesos, desafíos y oportunidades que presenta esta tecnología, para que distintas empresas transportadoras de gas natural puedan implementar estas técnicas, que respondan a la demanda generada en el mundo, hacia una transición de energía limpia y sostenible.

Para la realización de la investigación sobre el efecto del blending a diferentes porcentajes de hidrógeno en tuberías adecuadas para el transporte de gas natural, resulta esencial estudiar cómo las mezclas de estos gases pueden influir en el funcionamiento, la seguridad y la eficiencia de estas infraestructuras esenciales de distribución de gas.

La variabilidad en la composición del gas natural, derivada de distintas fuentes de suministro, hace necesario indagar en cómo las distintas mezclas pueden impactar los parámetros operativos clave, ya que diferentes porcentajes de hidrógeno disuelto, hace variar la composición del gas mezclado afectando el flujo y la presión en el interior de las tuberías, influyendo directamente en la eficiencia del transporte y en la operatividad técnica. Además, la gestión de riesgos asociados con la corrosión, fragilización, difusión y otros fenómenos que podrían amenazar la integridad de las tuberías.

Trabajo de Grado

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director Dario Yesid Peña Ballesteros. Codirector Anibal Serna Gil

Abstract

Title: State of the Art of the Blending Gas-Hydrogen Effect on Different Compositions in Pipelines Suitable for Natural Gas Transportation

Author: Bernardo Sneyder Estevez Gómez y Juan Manuel Jerez Villamizar

Key Words: Blending, hydrogen, natural gas, transportation

Description:

The world seeks a transition towards clean and sustainable energy sources, where blending hydrogen with natural gas applied in existing gas pipeline networks poses an effective transition towards sustainable and carbon-free energy generation. Thus arises the need to carry out this state of the art that allows to know the different processes, challenges and opportunities that this technology presents, in such a way that different natural gas transporting companies can implement these technologies that allow responding to the demand generated in the world, towards a transition from clean and sustainable energy.

For the research on the effect of blending at different percentages in pipelines suitable for the transport of natural gas, it is essential to study how the mixtures of these gases can influence the operation, safety and efficiency of these essential gas distribution infrastructures.

The variability in the composition of natural gas, derived from different supply sources, makes it necessary to investigate how different mixtures can impact key operating parameters, since different gas compositions can affect flow and pressure inside the pipes, directly influencing transport efficiency and technical operability. In addition, the management of risks associated with corrosion, embrittlement, diffusion and other phenomena could threaten the integrity of the pipelines.

Bachelor Thesis

Facultad de Ingenierías físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director Dario Yesid Peña Ballesteros. Codirector Anibal Serna Gil

Introducción

1. Contexto y justificación

A nivel mundial, ha aumentado notablemente la popularidad del uso de mezclas de gas natural e hidrógeno como una fuente alternativa y sostenible, este interés responde a la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contrarrestar los efectos inevitables del cambio climático. Aun así, es crucial tener en cuenta que el transporte de hidrógeno para su utilización como energía, plantea distintos obstáculos debido a sus propiedades físicas y químicas únicas como lo es la difusión del hidrógeno a través de los materiales que lo contienen además de la degradación de las características físicas y propiedades mecánicas, la volatilidad e inflamabilidad y la falta de información y regulación legislativa a nivel mundial sobre este gas.

Esta complejidad ha impulsado la investigación y desarrollo de tecnologías que permitan transportar de manera segura el hidrógeno a través de las redes existentes de gas natural. El objetivo principal de este trabajo es comprender la compatibilidad de los materiales, la adaptabilidad al proceso del transporte, la resistencia a la corrosión, los requisitos de seguridad, los desafíos técnicos y oportunidades regulatorias que surgen al implementar el transporte de este valioso gas.

1.1. Objetivos del estado del arte

1.1.1. *Objetivo general:*

- Desarrollar una revisión del estado del arte del efecto del blending gas natural-hidrógeno a diferentes composiciones aplicado en tuberías aptas para el transporte de gas natural.

1.1.2. *Objetivos específicos:*

Revisar la literatura más reciente relacionada con el blending, recopilando información sobre los avances tecnológicos, metodologías de mezclas y sistemas de distribución como de transporte

Mencionar algunos proyectos piloto que hayan implementado con éxito el blending

Determinar los efectos del blending en los materiales utilizados para el transporte de gas natural

2. Fundamentos del Blending Gas-Hidrógeno

2.1. Introducción al blending de gases

Se le conoce como blending a la combinación de dos o más gases en ciertas proporciones con el fin de obtener una mezcla con determinadas propiedades. Una de las aplicaciones más recientes que se le ha dado a este concepto blending, es la de generar una mezcla de hidrógeno con gas natural.

El estudio de esta mezcla esta dado al gran potencial que tiene el hidrógeno para descarbonizar varios sectores tales como la generación eléctrica, la industria del gas natural y el transporte. Sin embargo, su implementación masiva requiere el estudio de la capacidad que tiene la infraestructura existente de gas natural y la actualización de esta para transportar y distribuir el blending gas-hidrógeno.

El blending presenta varios desafíos, tales como la optimización de la combustión, la seguridad, compatibilidad de materiales, producción, transporte y almacenamiento de hidrógeno; además de la necesidad de actualizar la infraestructura existente.

Actualmente se están realizando distintas investigaciones y pruebas para determinar los niveles óptimos de inyección de hidrógeno en las redes de gas existentes. Estos estudios usan una mezcla entre el 5 % y un 20 % de hidrógeno sin necesidad de dar modificaciones al sistema.

(Devinder Mahajan, 2022)

2.2. Fundamentos del gas natural y del hidrógeno

El actual panorama energético mundial está marcado por grandes desafíos y cambios que se han llevado a cabo en el mundo, ya que la demanda de recursos energéticos es insaciable y, como consecuencia, el cambio climático y la degradación ambiental ejercen grandes presiones sobre nuestro planeta. Esta degradación que se hace cada vez más evidente conforme pasa los años, han impulsado la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero tales como: gas metano (CH_4) y Dióxido de carbono (CO_2) originados por la producción y transporte de gas natural. (Oscar Leonardo Acevedo Castro, 2013) (Fraguío, 2020)

Uno de los desafíos ante la necesidad energética, ha sido el transportar los recursos indispensables para llevar un estilo de vida digno, y, por otra parte, el desarrollo de la industria, siendo el gas natural una opción más cerca a lo sostenible. A partir de esta premisa surge el concepto de blending gas-hidrógeno, una práctica que consiste en la incorporación de hidrógeno, un vector energético útil para la conservación y utilidad de la energía, y el gas natural. (José R. Ares, 2019).

Funcionando de manera similar a la del gas, las propiedades de combustión de hidrógeno potencializan el rendimiento y eficacia del uso calorífico de este gas mezclado. (Monge, 2015)

Esta innovación plantea investigaciones cruciales como la compatibilidad, la seguridad y eficiencia de la infraestructura ya existente en el transporte del gas natural y la compatibilidad del sistema de transporte con el contacto con esta nueva mezcla gas-hidrógeno. Esto se ha convertido en un área de interés fundamental en el marco de la transición energética hacia un futuro más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. (Arun SK Raju, 2022)

Uno de los objetivos fundamentales de este estado del arte es explorar la literatura más reciente relacionada al blending, recopilar información y estudiar los desafíos actuales relacionados con esta práctica, con el fin de comprender su viabilidad y sus implicaciones en el panorama energético actual y futuro.

Por lo tanto, es crucial entender la teoría que rodea al blending gas-hidrógeno, ya que comprender estos fundamentos es esencial para evaluar dicho efecto en la infraestructura del transporte de gas natural, como evaluar sus posibles aplicaciones. Dicho lo anterior se dará comienzo con la exploración de las características del hidrógeno y su relevancia en el contexto del blending gas-hidrógeno. En primer lugar, se debe conocer sobre:

2.2.1 Composición y propiedades del hidrógeno.

El hidrógeno es el elemento químico más ligero y abundante que existe, conformado por 1 protón y 1 electrón donde su estado estable está conformado por dos átomos de hidrógeno unidos por un enlace covalente formando una molécula diatómica (H_2), este se encuentra ubicado en el grupo 1 y periodo 1 de la tabla periódica y se considera el hidrógeno como un vector energético por su capacidad de almacenamiento y su potencial como fuente de energía limpia. Actualmente el World Bank y muchas más instituciones llevan a cabo proyectos e investigaciones

relacionadas con el uso del hidrógeno como vector energético debido a su reacción de combustión altamente exotérmica. (José R. Ares, 2019)

2.2.2 Gas natural

El gas natural es una mezcla de gases que se encuentra en yacimientos subterráneos, donde se encuentra en mayor proporción el metano (CH_4), pequeñas cantidades de diversos hidrocarburos, entre ellos, etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}), pentano (C_5H_{12}) y diversos gases inertes como anhídrido carbónico (CO_2), nitrógeno (N) y rara vez ácido sulfhídrico (H_2S); todas menores a un 15% en su proporción. Este gas fue adoptado como una importante fuente de energía y es considerado como una de las alternativas limpias en comparación a otros combustibles de origen fósil, ya que emite un menor porcentaje de CO_2 en función a la energía producida por proceso de combustión. A este se le agrega un odorante llamado mercaptano, como factor de seguridad que le permite ser detectado ante una fuga. Finalmente se distribuye mediante redes de tuberías aptas para transportar gas de acero y/o polietileno. (Brucart, 1987)

2.2.3 Blending gas-hidrógeno

En el contexto energético, el blending hace referencia a la mezcla de hidrógeno con otros combustibles, en este caso el gas natural, que en su mayor proporción es gas metano (CH_4), creando una combinación de gases que son usados como fuente de energía. Para que esto se lleve a cabo de forma segura y controlada, es necesario incorporar una proporción específica de hidrógeno en la corriente de gas natural existente, esto en función a las composiciones presentes

en las redes de tuberías aptas para el transporte de gases dando como resultado una mezcla estable de ambos gases. (Devinder Mahajan, 2022)

2.2.4 Composición gas-hidrógeno

La composición usada en el blending de hidrógeno varía dependiendo del objetivo y regulaciones específicas de cada país o región donde este sea implementado. Donde las proporciones más usadas varían entre un 5 al 20% en volumen mezclado con gas natural. (Devinder Mahajan, 2022)

2.2.5 Efectos del hidrógeno en materiales

La fragilización, permeabilidad, fractura retardada y corrosión bajo tensión son algunos de los efectos dados por la difusión del hidrógeno en un material metálico lo cual causa una disminución significativa en su ductilidad y resistencia, lo que puede llevar a la fractura del material incluso en cargas relativamente bajas, esto se da ya que el hidrógeno puede infiltrarse en el material durante su fabricación, procesamiento o servicio. Este debilita la estructura del material ya que puede acumularse en las zonas de altas tensión o de concentración de esfuerzos y a consecuencia fallar. (Arun SK Raju, 2022).

2.3. Marco político y normativo

En los últimos años, en el continente europeo el desarrollo de una economía del hidrógeno ha crecido considerablemente, por lo que varios países han empezado a adoptar

estrategias nacionales de energía, estudiando las posibilidades de instalar electrolizadores para la producción de hidrógeno.

Por lo que el 2020 la comisión europea presentó “A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe.” (European commission, 2020), la cual busca lograr una neutralidad climática para el año 2050, transformando su sistema de energía que representa el 75% de las emisiones de efecto invernadero de la UE y establecer una economía de hidrógeno limpia y sostenible.

Cabe recalcar también, que los países europeos de manera individual tienen sus propias políticas y regulaciones sobre el blending de hidrógeno, estas regulaciones se basan en cuanto a objetivos financieros, requisitos de certificación, normas de seguridad y reglas de conexión. Se debe entender que los límites de mezcla existentes son muy restrictivos en comparación con lo que se ha probado con éxito en la literatura.

En la tabla 1, se muestran los límites para la mezcla de hidrógeno en la red de gas en las regulaciones nacionales existentes.

Tabla 1

Límites para la mezcla de hidrógeno en la red de gas, basado en las normativas nacionales vigentes.

País	Límite de mezcla (máximo)
Alemania	10%
Francia	6%
España	5%
Austria	4%
Suiza	2%

Finlandia	1%
Países bajos	0,5%
Reino Unido	0,1%
Bélgica	0,1%

Nota. Traducido de (Gianluigi Lo Basso*, Lorenzo Mario Pastore, Antonio Sgaramella, Ali Mojtahed, Livio de Santoli, 2024)

2.4. Sistema Power to Gas (PtG)

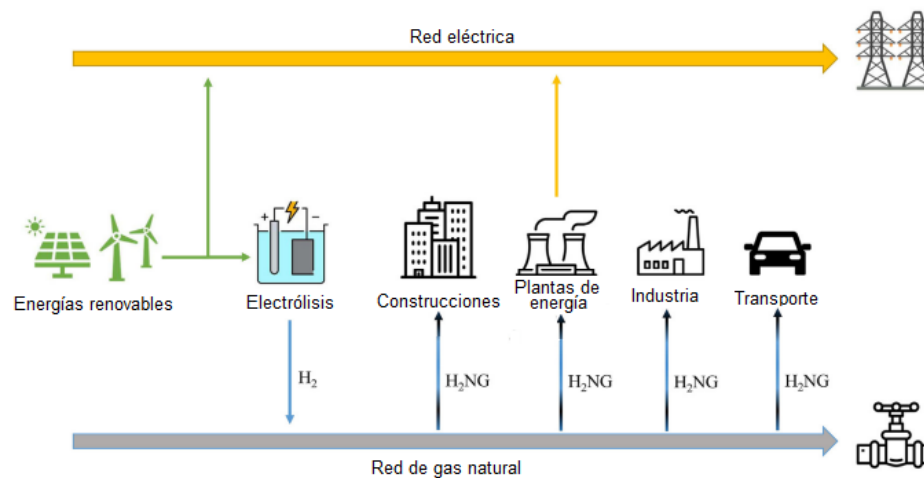
El sistema Power to Gas (PtG) es una tecnología la cual se encarga en convertir las energías renovables en hidrógeno a través del proceso de electrolisis para su posterior almacenamiento y uso. Esta tecnología ha sido pensada para ser usada en la red de gas natural existente, ya que la energía generada puede ser almacenada a gran escala y puede ser transportada a través de la red.

“Dentro del sistema PtG se pueden dar dos opciones para la conversión y aprovechamiento de la energía eléctrica: Producción de H₂ e inyección a la red de gas natural y producción de hidrógeno, conversión a gas natural sintético e inyección en red de gas natural”
(Carlos Eduardo García Sánchez, Corporación Centro de desarrollo Tecnológico del Gas)

A continuación, a manera de ejemplo se muestra un pequeño esquema que explica la función del sistema PtG.

Figura 1

Vista esquemática del sistema PtG con hidrógeno mezclándose con la red de gas.



Nota. Traducido de (Gianluigi Lo Basso*, Lorenzo Mario Pastore, Antonio Sgaramella, Ali Mojtahed, Livio de Santoli, 2024).

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923030203>.

El Blending es la alternativa energética más recientemente utilizada para la disminución de la huella de carbono dada por la producción de combustibles fósiles, como el gas natural, petróleo, gasolina, diésel, entre otros. Sabemos que la extracción y producción de hidrógeno no representa un factor significativo en las emisiones de gases de efecto invernadero disminuyendo la demanda de gas natural y abriendo camino a la nueva alternativa energética.

Esta nueva forma de beneficio energético aprovecha la infraestructura existente de distribución de gas, lo que vuelve sustentable económicamente, en materia cívica y civil; pues no se crea la necesidad de realizar nuevas obras para el uso ciudadano de esta mezcla de gases.

En materia de Blending, el avance tecnológico ha sido paulatino desde su inicio como prototipo, ya que la variación de la proporción de hidrógeno disuelto en el gas natural

actualmente se plantea en función a la composición de las tuberías y equipos necesarios para su almacenamiento y distribución, estos equipamientos están construido de una variedad de materiales tales como el acero inoxidable, aleaciones de níquel, aleaciones de aluminio entre otros materiales como compósitos reforzados con fibra de vidrio presentes en la infraestructura. (Ángel So, 2013) (Carlos Eduardo García Sánchez, Corporación Centro de desarrollo Tecnológico del Gas)

2.5. Proceso de extracción y producción de hidrógeno verde

Para llevar a cabo el sistema “Power to Gas (PtG), se han estado investigando distintas tecnologías para la extracción de hidrógeno verde a partir de las energías renovables como la solar o eólica. Sin embargo, la producción de este hidrógeno verde no es una tarea sencilla.

Basados en este contexto, las tecnologías de electrolisis han ganado un protagonismo significativo en el camino hacia un mundo más verde. De las cuales destacan: Los electrolizadores de membrana de intercambio (PEM), los electrolizadores alcalinos y las celdas de electrolisis de oxido solido (SOECs), donde cada una de estas tecnologías ofrece un enfoque único, con sus propias ventajas y desventajas.

De las tecnologías descritas anteriormente los electrolizadores alcalinos, son la tecnología más usada y económicamente rentable, ya que estos destacan por su confiabilidad y eficiencia en aplicaciones industriales a gran escala. Después tenemos los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM) que ofrecen una alta densidad de potencia y son ideales para aplicaciones que requieren un suministro rápido y constante de hidrógeno, sin embargo, estas ventajas llevan a costos más altos. Por último, se tienen las celdas de electrolisis de oxígeno

solido que representan una tecnología emergente con una eficiencia eléctrica superior a las dos mencionadas, estas celdas se basan en la reacción de descomposición del agua a altas temperaturas, lo que aumenta la eficiencia eléctrica, y aún no alcanza su etapa comercial, ya que sus costos son mucho más altos que las dos tecnologías mencionadas. (Víctor Poncelas Villabrille, 2022)

3. Compatibilidad de materiales en la infraestructura

Los valores límites de hidrógeno se basan en la compatibilidad de estos materiales, por lo que es posible que haya más problemas en la etapa de transporte que en la de distribución doméstica, esto a causa de la mayor presión usada en la etapa de transporte. En general, se considera que las modificaciones requeridas en las redes de transmisión y distribución son menores si la cantidad de hidrógeno en la mezcla es muy baja, por ende, si se desea implementar la mezcla de gas natural, es crítico evaluar la compatibilidad de los materiales de la infraestructura, ya que los diferentes materiales poliméricos y metálicos pueden interactuar de distintas maneras frente al hidrógeno, lo que puede afectar su integridad estructural, resistencia a la corrosión y sus propiedades mecánicas, también es necesario tener en cuenta las condiciones de operación, tales como la presión, temperatura y la presencia de otros agentes agresivos, ya que estos factores pueden aumentar o mitigar los efectos del hidrógeno en los materiales. (Carlos Eduardo García Sánchez, Corporación Centro de desarrollo Tecnológico del Gas).

3.1. Materiales utilizados en la infraestructura de gas natural

Para garantizar una transmisión, distribución y almacenamiento seguro y eficiente, se suelen usar una alta variedad de materiales, cada uno con sus propias ventajas y desventajas frente a su resistencia al hidrógeno, a continuación, se mostrarán algunos de los materiales más comúnmente utilizados:

3.1.1 *Materiales metálicos*

En las tuberías de transporte se usan en gran medida los aceros al carbono, ya que estos ofrecen buena resistencia y durabilidad, el problema de dichos materiales es que son susceptibles a la fragilización por hidrógeno. Los aceros inoxidables austeníticos y de baja aleación ofrecen una mayor resistencia al hidrógeno, debido a la alta densidad de su microestructura, la desventaja de usar dichos materiales pueden ser su costo y disponibilidad.

La difusividad del hidrógeno en los materiales de estructura cristalina es predecible. El factor de empaquetamiento de la red cristalina para las estructuras FCC es de 0.74 y para las BCC es de 0.68 siendo este un valor significativo para el comportamiento difusivo del hidrógeno. Sin embargo, teniendo en cuenta el tamaño intersticial o distancia entre átomos de las celdas, vemos que la celda unitaria FCC es mucho más grande en proporción de la BCC, por lo tanto, aun teniendo un factor de empaquetamiento mayor, la densidad atómica se deriva de la distancia entre los átomos y no del factor de empaquetamiento, no obstante, al encontrar un material aleante específico donde este pueda llenar cada uno de estos espacios intersticiales con átomos, sería óptimo para la no permeación del hidrógeno. En todo caso, a mayor densidad atómica es más difícil para el hidrógeno poder permear la estructura de un material, por lo tanto, Las

microestructuras que poseen una mayor cantidad de átomos por unidad de volumen y de forma acicular son las más susceptibles a sufrir daño por hidrógeno. (Hinojosa, 2000) (IVÁN URIBE PÉREZ, 2011) (Ane Miren García Romero, 2018)

3.1.1.1 Aceros al carbono. Las tuberías de acero suelen ser usadas para la transmisión de gas natural en largas distancias debido a su resistencia mecánica, durabilidad, bajo costo y facilidad de fabricación, uno de los estándares más usados en esta industria es la línea de tuberías API 5L y ASTM A53 estas líneas de tuberías cubren aceros desde el grado B hasta el X80 con diferentes niveles de resistencia y tenacidad, estos aceros poseen un porcentaje de carbono < 0.3% lo que los convierte en aceros suaves o dulces, este tipo de aceros comúnmente poseen una forma microestructural BCC, esto les otorga propiedades óptimas para el transporte de este tipo de gas a partir de su densidad atómica y factor de empaquetamiento siendo este 0.68 (UNITED STEEL INDUSTRY CO, 2022) (IVÁN URIBE PÉREZ, 2011)

3.1.1.2 Acero inoxidable. Cuando se presentan entornos donde la corrosión es un problema, se suelen usar aceros inoxidables austeníticos, para esta función se suelen usar los aceros ASTM A312 TP316 y TP316L. Al formar una capa pasiva de óxido de cromo presentan una excelente resistencia a la corrosión, como también presentan una alta ductilidad y tenacidad. (S. Gutiérrez de Saiz-Solabarría, 1998)

3.1.1.3 Aleaciones específicas. Cuando se tiene un entorno en el cual las condiciones operativas son extremas en las cuales se requiere una resistencia a temperaturas elevadas, medios

corrosivos severos y altas presiones, se recurren a las aleaciones específicas que ofrezcan una combinación excepcional de resistencia a la corrosión, altas propiedades mecánicas para altas temperaturas y una buena durabilidad. Algunos ejemplos son: Inconel 625 (base níquel) las aleaciones 600 y 800 (base hierro-níquel-cromo) y las superduplex (aceros inoxidable con un alto contenido de cromo y níquel). (SEDANO, 2023) (AMERICAN SPECIAL METALS , 2015)

3.1.2 Tuberías poliméricas

3.1.2.1 Polietileno (PE). A nivel residencial y comercial es común encontrar que los sistemas de distribución de gas natural están hechos de tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE) y media densidad (MDPE). El uso de estos materiales puede ofrecer ventajas como facilidad de instalación, ligereza, resistencia a la corrosión y un costo relativamente bajo. Si se compara el HDPE y el MDPE se tiene que el HDPE tiene una mayor rigidez, resistencia a la tracción y a las grietas por esfuerzo ambiental. (Cegna, 2011) (Martínez, 2022)

3.1.2.2 Otros polímeros. Dependiendo de la aplicación es posible encontrar tuberías de polipropileno (PP), polipropileno copolímero random (RPP) o poliamidas (nylon). Estos materiales a diferencia del Polietileno presentan mejores propiedades a altas temperaturas y una mejor resistencia química. (Martínez, 2022)

3.2 Comparación entre los distintos materiales usados en la infraestructura de gas natural

A continuación, se muestra una tabla que compara los materiales escritos anteriormente mostrando sus ventajas y desventajas.

Tabla 2

Comparación entre los distintos materiales usados en la infraestructura de gas natural

Material	Tipo	Ventajas	Desventajas	Compatibilidad con el hidrógeno
Aceros al carbono	Metálico	-Resistencia mecánica -Bajo costo -Amplía disponibilidad	-Susceptible a la fragilización por hidrógeno -Propenso a la corrosión	Moderada a baja
Aceros de baja aleación	Metálico	-Resistencia mecánica mejorada -Mejor resistencia a la corrosión	-Costo más elevado que los aceros al carbono	Moderada a alta
Aceros inoxidables austeníticos	Metálico	-Excelente resistencia a la corrosión -Buena resistencia al hidrógeno	-Costo elevado -Propiedades mecánicas variables	Alta
Aleaciones de níquel	Metálico	-Resistencia excepcional al hidrógeno -Buena resistencia a la corrosión	-Costo muy elevado -Disponibilidad limitada	Muy alta

Polietileno de alta densidad (HDPE)	Polimérico	-Resistencia a la corrosión -Facilidad de instalación -Bajo costo	-Permeabilidad al hidrógeno -Degradación por radiación UV	Moderada a alta (Permeabilidad)
Polietileno de media densidad (MDPE)	Polimérico	-Resistencia a la corrosión -Facilidad de instalación -Bajo costo	-Permeabilidad al hidrógeno -Propiedades mecánicas inferiores al HDPE	Moderada a alta (Permeabilidad)

Nota. (Propiedad de los autores)

3.3 Efectos del blending en los materiales

El hidrógeno puede provocar el colapso de una estructura a partir de la degradación física de los materiales que lo contienen. El resultado de la mezcla de hidrógeno y un material de naturaleza metálica es una fragilización, la cual ocurre de forma progresiva a lo largo de la vida en servicio de la pieza, siendo esta una de las mayores causas de falla en la industria de la producción o manejo de sustancias con algún contenido de hidrógeno.

El efecto del hidrógeno sobre las propiedades mecánicas de los aceros implica fenómenos como la fragilización, la fractura retardada o la fatiga estática, la corrosión bajo tensión, el empollamiento, el descascaramiento o la exfoliación. (IVÁN URIBE PÉREZ, 2011)

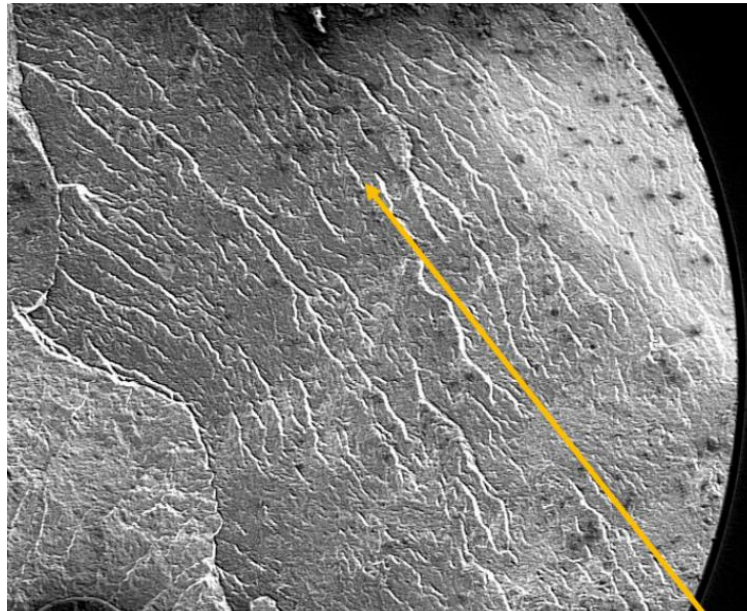
3.3.1 Aceros

Al hablar de propiedades mecánicas en materiales metálicos, el mayor efecto que el hidrógeno provee sobre estos es la fragilización, que es la consecuencia más frecuente a la

exposición de hidrógeno, se produce por un proceso de adsorción y difusión en la red cristalina a través de la superficie del metal, allí se presentan reacciones químicas donde se disocia la molécula del hidrógeno facilitando la penetración en la estructura. Esta filtración mueve los átomos de hidrógeno hacia el interior por un mecanismo llamado difusión en estado sólido, llegando a afectar de forma permanente o temporal al material (IVÁN URIBE PÉREZ, 2011)

Figura 2

Propagación de grietas en una superficie de fractura frágil debido al hidrógeno.



Nota. Imagen sacada de (Clara Moyano, Parker, 2020). chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Instrumentation-Products-Division/Technical-Articles/Abordando_el_desaf%C3%ADo_de_la_fragilizaci%C3%B3n_por_hidr%C3%B3geno_en_la_metalurgia_ES.pdf

Otro factor importante para tener en cuenta en todos los aceros es la propagación de grietas por fatiga, causada por el contacto con hidrógeno puro, esto sucede; ya que el hidrógeno facilita la nucleación y propagación de grietas al reducir la energía necesaria para la deformación plástica en frente de la grieta. Además, es posible que forme compuestos frágiles tales como hidruros metálicos en la punta de las grietas, fomentando el crecimiento de estas. Algunos estudios muestran que el acero X70 es un buen material ya que presenta baja susceptibilidad al crecimiento de grietas inducidas por el hidrógeno, que puede manejar hasta un 25% de este gas sin degradarse (Simonas CERNIAUSKAS, 2020). Otro material con buena respuesta es el X52, ya que este acero puede manejar hasta un 50% de hidrógeno mezclado (Hodges, 2015).

Por otra parte, se debe tener en cuenta la corrosión bajo tensión, pues esta corrosión se presenta en mayor proporción si el ambiente es altamente corrosivo, este tipo de corrosión puede comprometer la integridad estructural de los componentes al implicar la nucleación y propagación de grietas a lo largo de la dirección donde es aplicada la tensión. (Sarabia, 2023)⁷

3.3.2 Materiales poliméricos

En los materiales poliméricos se considera que no ocurre el riesgo por fragilización, pero es necesario tener en cuenta algunos aspectos relevantes como:

3.3.2.1 Permeación del gas en materiales poliméricos. En los materiales poliméricos uno de los principales problemas es la permeación del gas causada por el hidrógeno al migrar a través de las paredes del material, sin embargo, a presiones de distribución de (20 a 100 psig) causas perdidas de hidrógeno muy pequeñas (K. Birkitt, 2021).

3.3.2.1 Efectos en propiedades mecánicas de los polímeros. La exposición al hidrógeno también puede causar una afectación en las propiedades mecánicas de algunos polímeros, ya que se puede presentar disminución en la ductilidad o resistencia del material, especialmente en condiciones de alta temperatura y presión. Aunque estos efectos pueden variar dependiendo del polímero usado. (Carlos Eduardo García Sánchez, Corporación Centro de desarrollo Tecnológico del Gas).

3.4 Impacto sobre quemadores

El funcionamiento de los quemadores es otro factor importante a tener en cuenta, ya que al aplicar el blending este tiene un efecto significativo en la llama, por lo que afecta la integridad de los quemadores, para analizar este impacto se debe entender ciertos parámetros como el índice de Wobbe, velocidad de la llama y las condiciones de la combustión. (Carlos Eduardo García Sánchez, Corporación Centro de desarrollo Tecnológico del Gas)

3.4.1 Índice de Wobbe

El índice de Wobbe es definido como la división entre el poder calorífico superior del gas y la raíz cuadrada de su densidad relativa (Carlos Eduardo García Sánchez, Corporación Centro de desarrollo Tecnológico del Gas). A la hora de hablar de quemadores el índice de Wobbe es uno de los índices más importantes ya que este valor tiene la misma carga térmica que un quemador. Algunos experimentos han demostrado que un 10% de volumen de hidrógeno

disminuye en un 3% aproximadamente el índice de Wobbe (Carlos Eduardo García Sánchez, Corporación Centro de desarrollo Tecnológico del Gas) (Harmen de Vries, 2017)

3.4.1 Condiciones de la combustión

En el blending al realizar la combustión un factor que desempeña un papel crucial es la variación en las relaciones aire-combustible. En los gasodomésticos, las relaciones abarcan desde condiciones “ricas en combustible” hasta “ultras pobres”. La norma ISO 13686:2013, resalta la importancia de comprender y controlar dichas relaciones para garantizar un rendimiento eficiente y seguro. Por ende, ajustar los sistemas de control para adaptarse a diferentes composiciones de combustible se vuelve esencial para mantener un rendimiento óptimo y reducir los riesgos asociados con condiciones de combustión inadecuadas. (Carlos Eduardo García Sánchez, Corporación Centro de desarrollo Tecnológico del Gas)

3.4.2 Velocidad de la llama

La velocidad de la llama laminar tiende a aumentar con la presencia de hidrógeno, esto ocurre ya que la velocidad de la llama de hidrógeno es 5 veces mayor que la del metano. Este aumento en la velocidad de la llama puede tener implicaciones importantes en la estabilidad y retroceso en la llama de los quemadores, por lo que es posible que dicho retroceso cause daños en los quemadores o provocar fugas de combustible, por lo que sería necesario instalar sistemas de control activos para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente. Conforme se vayan aumentando este tipo de aplicaciones en los distintos países es necesario realizar investigaciones

adicionales que ayuden a comprender mejor el impacto a largo plazo del retroceso de la llama en los dispositivos de consumo. (Alejandra Hormaza Mejía, 2020)

4. Casos de estudio y proyectos piloto

En los últimos años, en todo el mundo se han desarrollado una amplia gama de proyectos similares, esta información es útil como aprendizaje para guiar el desarrollo e implementación de esta solución tecnológica.

Considerando la información previa sobre aspectos como: seguridad, compatibilidad de materiales e impacto en quemadores. Es importante validar de manera empírica el comportamiento de estas mezclas en un entorno real. Las pruebas realizadas en entornos reales nos permiten salir de especulaciones teóricas para así obtener datos concretos sobre la viabilidad operativa, adaptabilidad técnica e integridad continua.

A continuación, se presentarán algunos proyectos y casos de estudio que demostraron las capacidades y limitaciones de esta tecnología, ya que los casos exitosos nos demuestran la viabilidad técnica y los proyectos piloto nos dan lecciones aprendidas para optimizar diseños e implementaciones, potenciando las posibilidades de éxito para un futuro de descarbonización energética.

4.1 Estudios de caso exitoso

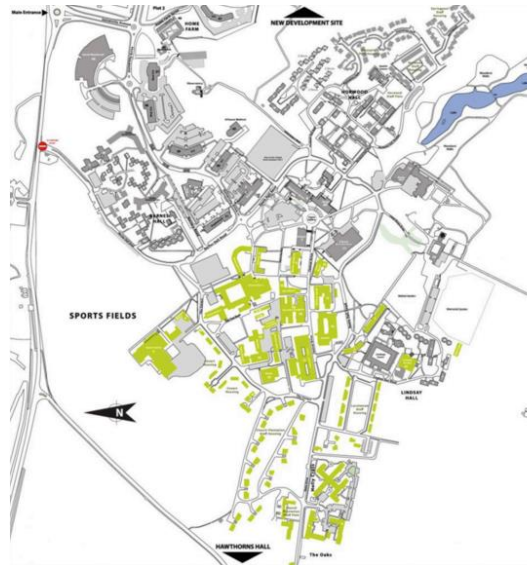
4.1.1 HyDeploy (Reino Unido)

En el continente europeo uno de los proyectos más ambiciosos es el proyecto HyDeploy, este proyecto busca aprovechar la red de gas de primera clase del Reino Unido para poder suministrar una mezcla gas-hidrógeno de calidad, este es un proyecto que lleva en vigencia desde el 2017. Hasta la fecha. HyDeploy ha demostrado que el hidrógeno se puede mezclar de forma segura en las redes existentes sin ningún tipo de interrupción para los consumidores (HyDeploy, s.f.), a continuación, se mostraran las fases llevadas a cabo en este proyecto.

4.1.1.1 Fase 1. Prueba en la Universidad de Keele. Aprovechando la red privada de gas que tiene la Universidad de Keele y que el tamaño de esta universidad se asemeja al de un pueblo, el proyecto HyDeploy llevo a cabo una fase de prueba de 18 meses, la cual consistió en realizar mezclas de hasta un 20% de hidrógeno de volumen inyectado en gas fósil. Se realizaron pruebas de laboratorio en una variedad de aparatos de gas y se realizó una extensa investigación sobre los efectos del blending en los distintos materiales encontrados en una red de gas natural como un estudio social que buscaba entender la percepción de los consumidores sobre el hidrógeno mezclado. (HyDeploy, s.f.)

Figura 3

Las propiedades domésticas y comerciales incluidas en el ensayo Keele HyDeploy



Nota. Imagen sacada de (Professor Zoe Robinson Dr Adam Peacock | Dr Maddy Thompson Dr Phil Catney | Keele University, 2022).

<https://academic.oup.com/ce/article/3/2/114/5487479?login=false>

4.1.1.2 Fase 2. Prueba en Winlaton. Los resultados positivos obtenidos en la Universidad de Keele facilitaron el camino para realizar una prueba más grande en Winlaton, esta prueba inició en agosto del 2021 y finalizó en junio del 2022. La prueba fue operada por Northern Gas Networks y se suministró un total de 668 casas, una escuela, una iglesia y algunas pequeñas empresas, para esta prueba se usó un 20% de hidrógeno de volumen inyectado en gas fósil. Este proyecto demostró que es posible usar de manera segura el blending de hidrógeno en la red de gas natural, y la evidencia recolectada será usada para ayudar al gobierno inglés a implementar leyes que formulen políticas sobre el hidrógeno. Cabe aclarar que las dos fases fueron supervisadas por el Ejecutivo de Salud y Seguridad (HSE) (Professor Zoe Robinson Dr Adam Peacock | Dr Maddy Thompson Dr Phil Catney | Keele University, 2022).

4.1.1.3 Fase 3 Habilitar la política del gobierno. El gobierno del Reino Unido busca evidencia y puntos de vista para analizar el valor estratégico y económico del blending de hidrógeno y las opciones de liderazgo para su implementación (Department for energy security & Net zero, 2023).

En base a lo anterior el proyecto HyDeploy trabaja para completar dicha evidencia en base a sus dos anteriores éxitos para así poder permitir que el gobierno del Reino Unido implemente dicha decisión.

Para seguir con esto HyDeploy ya demostró con éxito la implementación de un 20% de hidrógeno de volumen inyectado en gas fósil en dos entornos industriales: Pilkington Glass y Unilever empresas encargadas en la producción de láminas de vidrio, y también se están realizando pruebas con Lucideon para estudiar la implementación del blending en la industria de la cerámica. (HyDeploy, s.f.)

4.1.2 Proyecto H2GN (Chile)

El proyecto H2GN es un proyecto liderado por Gasvalpo, a través de su marca Energas, el cual es estudiado por la Universidad de la Serena (ULS), el fin de este proyecto es producir e inyectar hidrógeno verde en sus redes de distribución de gas natural para beneficiar más de 2000 hogares de las ciudades de Coquimbo y La Serena.

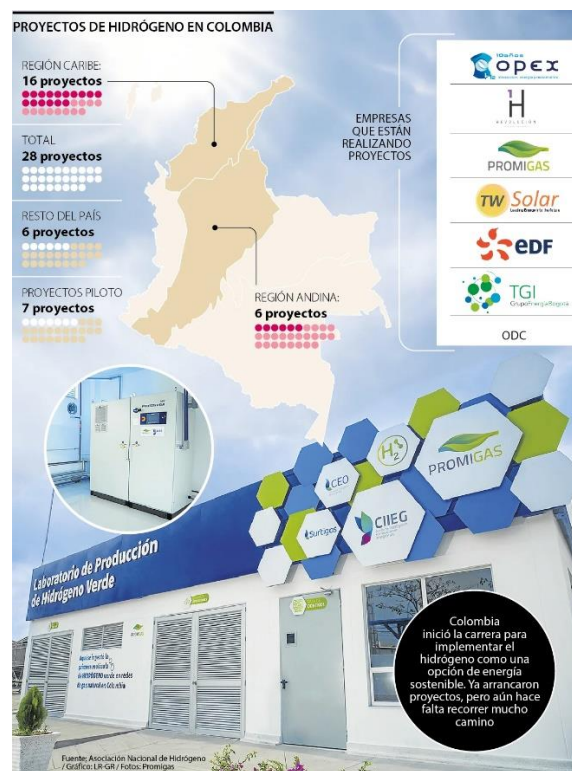
Para lo anterior, este proyecto aumentara progresivamente el hidrógeno verde en la red de gas natural que ira por etapas, aumentando de 5% en 5% hasta llegar a un máximo de 20% de inyección. Este proyecto está estipulado en un periodo de 2 años y en octubre del 2022 se realizó la primera inyección de la mezcla en la red de gas natural. (Gasvalpo, 2024)

4.1.2 Proyectos en Colombia

En Colombia se están llevando a cabo un alto número de proyectos en la producción de hidrógeno aproximadamente 28 proyectos, donde está identificado que 16 de estos 28 proyectos están siendo ejecutados en la región Caribe, 6 en la región andina y los 6 faltantes en el resto del país. (ROJAS, 2024)

Figura 4.

Proyectos de hidrógeno en Colombia. La República



Nota. La República, Colombia. <https://www.larepublica.co/especiales/hidrógeno-en-el-radar-de-colombia/cuales-proyectos-de-generacion-de-hidrógeno-hay-en-colombia-3809906>

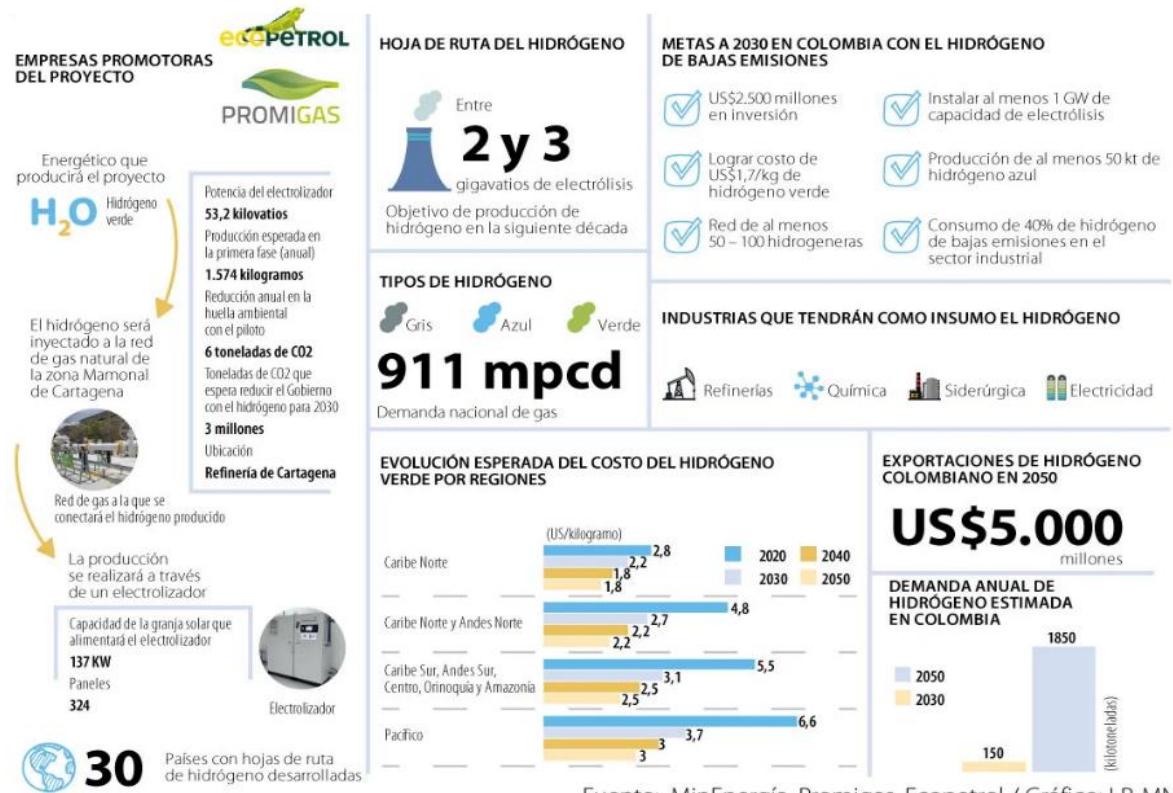
4.1.1.1 Proyecto piloto Promigas y Ecopetrol. La transportadora de gas natural “Promigas” inició un proyecto piloto de producción de hidrógeno verde mezclado con gas natural en redes de transporte y distribución, ubicado en la estación Heroica, en la zona industrial de Mamonal (Cartagena). La planta piloto está diseñada para ser escalada en cinco fases de crecimiento. (PROMIGAS, 2022)

Por su parte Ecopetrol, en su filial Refinería de Cartagena (Reficar), lleva a cabo la producción de hidrógeno verde por medio de un electrolizador de tecnología de membrana de intercambio de protones y paneles solares. (Anderson Urrego, 2022)

Figura 5

Así es el primer proyecto piloto de producción de hidrógeno en el país

ASÍ ES EL PRIMER PILOTO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO EN EL PAÍS



Nota. La República, Colombia.
<https://www.larepublica.co/empresas/promigas-pondra-en-marcha-su-proyecto-piloto-para-generacion-de-hidrogeno-verde-3325410>

4.1.1.2 PtX centro de operaciones en Colombia. El centro internacional Power-to-X es un centro de experiencia y colaboración para cadenas de valor innovadoras y sostenible de hidrógeno verde y Power-to-X, la cual su objetivo es junto a sus socios identificar soluciones Power-to-X que se adapten a las particulares de cada país y conducir una transformación económica sostenible. (International PtX Hub , 2024)

Este centro realizo un estudio técnico y económico que busca identificar regiones potenciales para el establecimiento de hubs de hidrógeno verde en Colombia. En dicho estudio se

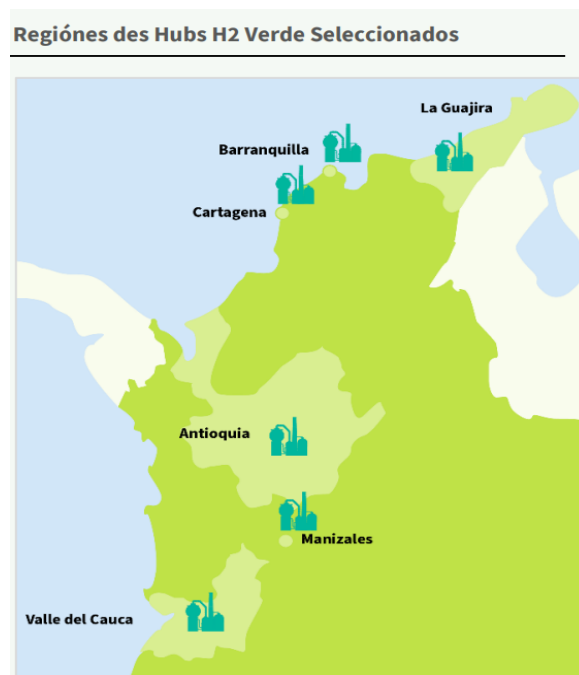
identificaron 6 regiones potenciales para el establecimiento de hubs de hidrógeno verde. (Peter Foerster, Jorge Roncancio Gómez y Juan Manuel Salazar Gómez (GIZ), 2023)

Las regiones potenciales para la creación de hubs son las siguientes: Cartagena, Barranquilla, Valle del Cauca, Medellín, Manizales y la Guajira.

De las cuales el estudio demostró que el hub de Cartagena, Barranquilla y la Guajira presentan condiciones aceptables para la implementación del Blending gas- hidrógeno.

Figura 6.

Regiones seleccionadas para la creación de Hubs.



Nota. International PtX Hub, Colombia.

https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2024/02/International-PtX-Hub_202309_H2-Hubs-Colombia.pdf

4.2 Lecciones aprendidas de casos de estudio y proyectos piloto

- La adaptación de quemadores domésticos e industriales al blending requiere ajustes menores para mantener condiciones de combustión seguras y eficientes.
- La integridad estructural de las redes de acero no parece verse significativamente afectada con porcentajes de hasta 20% de hidrógeno.
- Es clave realizar pruebas sobre la composición específica de los gases naturales de cada región

4.3 Orientación para futuras implementaciones

- Realizar pruebas a mayor escala en redes vivas de distribución.
- Evaluar efectos a muy largo plazo sobre la integridad de infraestructura.
- Desarrollar estándares internacionales para la inyección segura de hidrógeno en redes de gas natural.

5. Síntesis de los hallazgos

Como se observaron en los proyectos piloto, se realizaron pruebas en las que el porcentaje de hidrógeno mezclado con gas natural variaba en los rangos del 5% al 20% dando resultados exitosos, en principio la idea nació a partir de la disminución de la huella de carbono producida por la minería del gas, al implementar la mezcla se evidenció una disminución considerable en las emisiones de CO₂ a la atmosfera tal y como se tenía previsto, pues la producción del hidrógeno verde y su uso en determinada cantidad supone un impacto menor.

(Fraguío, 2020)

Se determinó que los materiales en contacto con el hidrógeno presentan efectos en sus propiedades mecánicas tales como fragilización y ampollamientos. A largo plazo, el efecto del hidrógeno sigue siendo tema de estudio, pues aún se esperan resultados en la calidad y funcionamiento de los elementos que usan este gas constantemente. Se deben tener precauciones en la manipulación de esta mezcla de gases ya que posee una velocidad de reacción mucho más alta en comparación a la del gas natural, existen recomendaciones dadas a partir de la velocidad de reacción de la combustión del hidrógeno; donde se deben realizar pruebas en los quemadores establecidos para el servicio y aprovechamiento. (IVÁN URIBE PÉREZ, 2011)

6. Limitaciones y áreas de investigación futura

Actualmente, las limitaciones más comunes en el manejo del hidrógeno son relacionadas con la seguridad y la manipulación de este gas, ya que, con proporciones establecidas de hidrógeno y gas natural, se han encontrado trazas de difusión por parte del hidrógeno en el material que lo transporta; esto debido a que no se ha desarrollado un material con las características físicas necesarias para contener la totalidad de este gas, minimizando las fugas y accidentes que esto puede conllevar, además, La falta de normativas y estándares internacionales específicos para el uso, almacenamiento y transporte de mezclas de hidrógeno y gas natural, también resultan siendo una limitación, por ende, Investigaciones y colaboraciones son necesarias para establecer regulaciones claras y estándares de seguridad en su uso.

En cuanto a la infraestructura, la transición energética aún se queda corta en realizar un cambio total en la composición de gas energético transportado por tuberías, pues hasta el

momento la cantidad máxima puesta a prueba ha sido del 20%, de esta manera, existe un largo camino para llegar a un mínimo del 50% de hidrógeno contenido en las redes de distribución.

Por otra parte, la concientización de los usuarios ante una nueva tecnología es vital, pues son los usuarios activos de esta nueva tecnología y, por lo tanto, se deben concientizar de las normativas domésticas para el uso responsable del hidrógeno y las nuevas precauciones que se deben tener con el uso de este gas en casa.

7. Conclusiones

En conclusión, el estado del arte sobre el efecto de blending gas-hidrógeno a diferentes composiciones en tuberías aptas para el transporte de gas natural refleja la creciente importancia e interés del avance energético, además de la complejidad de la integración de hidrógeno en la infraestructura de gas existente. Si bien la mezcla de hidrógeno con gas natural plantea una solución prometedora para descarbonizar el sector energético y así reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Cabe recalcar que las investigaciones actuales destacan una serie de desafíos y consideraciones que se deben abordar de manera cuidadosa.

Uno de los desafíos más importantes para tener en cuenta es la compatibilidad de los materiales usados en la infraestructura existente. Como se mencionó en el documento distintos estudios han demostrado que los distintos materiales pueden reaccionar de distinta manera al ser expuestos a la mezcla gas-hidrógeno, lo que puede afectar su integridad estructural, resistencia a la corrosión, propiedades mecánicas y funcionalidad en general.

En el caso de los materiales metálicos, los fenómenos mencionados tales como: fragilización por hidrógeno, propagación de grietas por fatiga inducida causa por el hidrógeno y

la corrosión bajo tensión representan riesgos significativos que pueden comprometer la seguridad y funcionamiento de la infraestructura. Por otro lado, los materiales poliméricos, como el polietileno, tienen la ventaja de no ser susceptibles a la fragilización por hidrógeno, pero pueden presentar dificultades al presentar la permeación del gas y el impacto en sus propiedades mecánicas, especialmente en condiciones de alta temperatura y presión.

Aparte de los efectos causados en los materiales, la adición de gas natural tiene implicaciones significativas en el funcionamiento y la seguridad de los quemadores domésticos, comerciales e industriales. Aspectos como, la velocidad de la llama, las condiciones de combustión, el índice de Wobbe, requieren ser evaluados y modificados en los sistemas de control y diseño de quemadores.

A pesar de los desafíos mencionados anteriormente, los casos de estudios y proyectos piloto exitosos, tales como HyDeploy en el Reino Unido y H2GN en Chile, han demostrado la viabilidad técnica y operativa del blending gas-hidrógeno en redes de distribuciones ya existentes y operativas. Estos proyectos han proporcionado información valiosa y han sentado las bases para futuras implementaciones a mayor escala.

Cabe recalcar la importancia de reconocer que aún existen áreas las cuales requieren mayor investigación de desarrollo; Algunas de estas incluyen la realización de pruebas a mayor escala en redes vivas de distribución, la evaluación de los efectos en la infraestructura en un muy largo plazo y el desarrollo de estándares internacionales para la inyección segura de hidrógeno en redes de gas natural.

También es necesario tratar los desafíos regulatorios y normativos relacionados con la mezcla gas-hidrógeno. Como se mencionó en el documento algunos países han empezado a

implementar políticas y regulaciones específicas, aún existe la necesidad de establecer un marco legal y normativo coherente a nivel internacional que brinde seguridad y calidad a todos los involucrados en esta transición energética.

Además, esta revisión subraya la importancia de continuar la investigación y el desarrollo en este campo para garantizar una transición segura y eficiente hacia el uso de mezclas de gas-hidrógeno en el transporte de gas natural. Se enfatiza la necesidad de enfoques multidisciplinarios, colaboraciones industriales y avances tecnológicos para abordar los desafíos identificados y aprovechar las oportunidades que presenta la transición hacia un sistema energético más sostenible.

Referencias bibliográficas

- Alejandra Hormaza Mejía, J. B. (2020). El hidrógeno se fuga al mismo ritmo que el gas natural en una infraestructura típica de gas de baja presión. *Revista Internacional de Energía del Hidrógeno* , 8810-8826.
- AMERICAN SPECIAL METALS . (2015). *THE STRENGTH OF ALLOY* . Obtenido de Aleaciones Inconel :
<https://www.americanspecialmetals.com/AleacionesInconel.html#:~:text=INCONEL%20es%20una%20marca%20registrada,soluciones%20corrosivas%20reductoras%20como%20oxidantes>
- Anderson Urrego. (Viernes 18 de Marzo de 2022). *La república*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/empresas/promigas-pondra-en-marcha-su-proyecto-piloto-para-generacion-de-hidrogeno-verde-3325410>
- Ane Miren García Romero, N. M. (2018). INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DE LOS MATERIALES Y SUS PROPIEDADES (I). Universidad del País Vasco.
- Ángel So, B. V. (2013). Materiales y corrosión en la industria de gas natural. *OmniaScience*, 87-102.
- Arun SK Raju, P. A.-M. (18 de Julio de 2022). Hydrogen Blending Impacts Study. Riverside , California , USA: University of California .
- Brucart, E. B. (1987). EL Gas Natural . En E. B. Brucart, *EL Gas Natural, Características, distribución y aplicaciones industriales* (pág. 1). Barcelona : EDITORES TECNICOS ASOCIADOS .
- Carlos Eduardo García Sánchez, Corporación Centro de desarrollo Tecnológico del Gas . (s.f.). Revisión de la producción, transporte y uso del hidrógeno, y el impacto de las mezclas de gas natural con hidrógeno sobre la infraestructura del gas . *Revisión de la producción, transporte y uso del hidrógeno, y el impacto de las mezclas de gas natural con hidrógeno sobre la infraestructura del gas* . Piedecuesta, Santander , Colombia .
- Cegna, G. (Febrero de 2011). Caracterización mecánica al impacto de uniones de Polietileno soldadas por termofusión. Mar de Plata , Argentina : RINFI Repositorio Institucional .
- Clara Moyano, Parker. (2020). Abordado el desafío de la fragilización por hidrógeno en la metalurgia . *Abordado el desafío de la fragilización por hidrógeno en la metalurgia Documentación técnica* . Reino Unido : Parker .
- Department for energy security & Net zero. (2023). *Hydrogen Blending into GB Gas Distribution Networks: Government Response to Consultation*. London UK: Open Government Licence.

- Devinder Mahajan, K. T. (2022). Hydrogen Blending in Gas Pipeline Networks—A Review. *Energies MDPI*, 2-5.
- Fraguío, P. D. (3 de Febrero de 2020). LA RENOVACIÓN ENERGÉTICA ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO: MARCO ESTRATÉGICO, INSTRUMENTOS Y PRÁCTICAS. *Actualidad Jurídica Ambiental n. 98*, 35.
- Gasvalpo. (22 de 12 de 2022). *Gasvalpo*. Obtenido de GASVALPO INICIA INYECCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE A SU RED DE DISTRIBUCIÓN DE GAS NATURAL EN LA REGIÓN DE COQUIMBO:
https://www.gasvalpo.cl/noticiavisor.aspx?9,GASVALPO_INICIA_INYECCI%C3%93N_DE_HIDR%C3%93GENO_VERDE_A_SU_RED_DEDISTRIBUCI%C3%93N_DE_GAS_NATURAL_EN_LA_REGI%C3%93N_DE_COQUIMBO_from_H2GN
- Gasvalpo. (2024). *H2GN*. Obtenido de <https://www.h2gn.cl/>
- Gianluigi Lo Basso*, Lorenzo Mario Pastore, Antonio Sgaramella, Ali Mojtahed, Livio de Santoli. (2024). Recent progresses in H2NG blends use downstream Power-to-Gas policies application: An overview over the last decade. *ELSEVIER* , 424-453.
- Harmen de Vries, A. V. (2017). El impacto de las mezclas de gas natural/hidrógeno en el rendimiento de los equipos de uso final: análisis de intercambiabilidad para electrodomésticos.
- Hinojosa, M. (2000). La estructura cristalina de los metales . *Ingenierías* , 3 (8), 20-25.
- HyDeploy. (December de 2021). *HyDeploy*. Obtenido de HyDeploy2 Project: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://hydeploy.co.uk/app/uploads/2022/06/HYDEPLOY2-THIRD-OFGEM-PPR.pdf>
- HyDeploy. (01 de Noviembre de 2022). *Pioneering the safe use of blended hydrogen in gas networks to reduce carbon emissions*. Obtenido de <https://hydeploy.co.uk/>
- HyDeploy. (s.f.). *Ser pionero en el uso seguro de hidrogeno mezclado en redes de gas para reducir las emisiones de carbono* . Obtenido de <https://hydeploy.co.uk/>
- International PtX Hub . (2024). *International PtX Hub* . Obtenido de <https://ptx-hub.org/about-us/>
- IVÁN URIBE PÉREZ, A. B. (2011). Fundamentos del daño por hidrógeno en los aceros. *EL HOMBRE Y LA MAQUINA* , 123-142.
- José R. Ares, F. L. (2019). EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO: MUCHO HECHO PERO CASI TODO POR HACER. *Encuentro Multidisciplinarios*, 2-3.
- K. Birkitt, M. L.-M. (2021). Materials aspects associated with the addition of up to 20 mol% hydrogen into an existing natural gas distribution network,.
- Martínez, N. A. (Mayo de 2022). Desarrollo y caracterización a fractura de polímeros reforzados . Querétaro, México : Universidad Autónoma de Querétaro.

- Monge, L. M. (Julio de 2015). ANÁLISIS DE CONCEPTOS Y EXPRESIONES DE LA VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN LAMINAR EN AIRE DE HIDRÓGENO Y DE MEZCLAS HIDRÓGENO-GAS NATURAL . Salamanca, España: Universidad de Valladolid .
- Oscar Leonardo Acevedo Castro, J. E. (2013). ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE GEI (CO₂ Y CH₄) GENERADAS DURANTE EL TRANSPORTE DE GAS NATURAL EN COLOMBIA, APLICANDO METODOLOGÍA IPCC. *Revista Fuentes: El Reventón Energético* , 6, 7, 8, 9.
- Peter Foerster, Jorge Roncancio Gómez y Juan Manuel Salazar Gómez (GIZ). (2023). *International PtX Hub*. Obtenido de IDENTIFICACIÓN HUBS H₂ VERDE En Colombia: https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2024/02/International-PtX-Hub_202309_H2-Hubs-Colombia.pdf
- Professor Zoe Robinson Dr Adam Peacock | Dr Maddy Thompson Dr Phil Catney | Keele University, U. (April de 2022). CONSUMER PERCEPTIONS OF BLENDED HYDROGEN IN THE HOME: LEARNING FROM HYDEPLOY.
- PROMIGAS. (2022). *Informe del Sector Gas Natural Colombia 2022*. Colombia.
- ROJAS, L. M. (Febrero de 2024). En la Región Caribe se están desarrollando 16 de 28 proyectos, mientras que en la Región Andina están en marcha otros seis y en el resto del país otros seis adicionales. *La República*. Obtenido de <https://larepublica.co/especiales/hidrogeno-en-el-radar-de-colombia/cuales-proyectos-de-generacion-de-hidrogeno-hay-en-colombia-3809906>
- S. Gutiérrez de Saiz-Solabarría, J. S. (Mayo de 1998). Estudio de la susceptibilidad de un acero inoxidable austenítico estabilizado con niobio al daño por tenso corrosión en medio H₂S (SSC) y corrosión intergranular (IGC) en otros medios agresivos. Madrid.
- Sarabia, L. (2023). Modelo de difusión del hidrógeno en la red cristalina metálica en los fenómenos de corrosión bajo tensión.
- SEDANO, M. A. (Diciembre de 2023). EFECTO DEL CONTENIDO DEL CROMO EN LA INTERACCIÓN HIDRÓGENO-MICROESTRUCTURA EN ALEACIONES BASE Ni . CIUDAD UNIVERSITARIA , CIUDAD DE MEXICO , MEXICO: Universidad Nacional Autónoma de México .
- Simonas CERNIAUSKAS, A. J. (2020). Options of Natural Gas Pipeline Reassignment for Hydrogen: Cost Assessment for a Germany Case Study . Germany .
- UNITED STEEL INDUSTRY CO. (2022). *UNITED STEEL INDUSTRY*. Obtenido de Tubería de acero sin costura : https://www.united-steel.com/productshow/seamless-steel-pipe.html?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw5cOwBhCiARIsAJ5njuZigOhLZ-oGmbOOzPy3sJg8-dke34CnLc__aX7RuqQ5kZ7QcmamQoIaAvjHEALw_wcB

Víctor Poncelas Villabrille, A. M. (2022). CONVERSIÓN DE LA ELECTRICIDAD EN GAS: ANÁLISIS Y APLICACIONES (POWER TO GAS). Universidad de Oviedo.