



Identificación y prevención de las principales problemáticas asociadas al almacenamiento de mezclas GN-H₂ en cilindros de alta presión

Identification and prevention of the main problems associated with the storage of NG-H₂ mixtures in high-pressure cylinders

Juan Pablo Gualdrón Ramírez ¹ *

¹ Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, km 2 vía Refugio, Piedecuesta, Colombia

* Correo electrónico: jgualdron@cdtdegas.com

Resumen

El almacenamiento de mezclas de gas natural e hidrógeno en cilindros de alta presión representa un reto técnico significativo debido a las propiedades particulares del hidrógeno, como su alta difusividad, capacidad de permeación y potencial de fragilización de materiales. Esta situación plantea riesgos específicos asociados a la integridad estructural de los recipientes y a la seguridad operativa. En este contexto, el presente trabajo analiza las principales problemáticas técnicas que afectan el almacenamiento de mezclas GN-H₂ en cilindros de alta presión, mediante una revisión de los fenómenos físicos involucrados, la compatibilidad de materiales y los requisitos normativos aplicables.

Abstract

The storage of natural gas–hydrogen mixtures in high-pressure cylinders represents a significant technical challenge due to the specific properties of hydrogen, such as its high diffusivity, permeation capability, and its potential to cause material embrittlement. These characteristics introduce risks related to the structural integrity of storage vessels and operational safety. In this context, this work analyzes the main technical issues associated with the storage of NG-H₂ mixtures in high-pressure cylinders through a review of the relevant physical phenomena, material compatibility, and applicable safety regulations.

Palabras Clave

Almacenamiento, Hidrógeno, Gas natural, Mezclas, Riesgos, Normativas, Alta Presión.

1 Introducción

El almacenamiento de hidrógeno representa uno de los desafíos más significativos dentro de la transición energética y la industria de los gases. A pesar de sus ventajas como portador energético limpio y de alta densidad energética específica, sus propiedades físicas y químicas hacen que su manejo y almacenamiento sean complejos. Su reducido tamaño molecular y alta difusividad favorecen la permeación a través de materiales porosos o microfisuras, lo que puede generar fugas en cilindros, tuberías e instrumentos. Además, la interacción del hidrógeno con ciertos metales puede inducir fenómenos de fragilización, reduciendo la ductilidad y la resistencia mecánica de los componentes sometidos a presión. A esto se suma su alta inflamabilidad, caracterizada por un amplio rango de ignición y baja energía mínima de activación, lo que incrementa los riesgos asociados a eventuales liberaciones del gas. Por estas razones, el desarrollo de sistemas de almacenamiento seguros y confiables continúa siendo un reto clave para la industria energética moderna [1].

Además, la incorporación de hidrógeno en mezclas con gas natural se ha convertido en una alternativa estratégica para avanzar hacia sistemas energéticos más limpios sin reemplazar completamente la infraestructura existente. No obstante, esta práctica introduce desafíos adicionales relacionados con la compatibilidad de materiales, la integridad estructural de recipientes a alta presión y el comportamiento de combustión de la mezcla. Bajo determinadas condiciones operativas pueden presentarse variaciones composicionales asociadas a diferencias de densidad entre componentes, como fenómenos de estratificación; sin embargo, las problemáticas más críticas se relacionan con la permeabilidad del hidrógeno, la fragilización de materiales y el incremento del riesgo de ignición.

Dentro del Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas) se están desarrollando bancos de experimentación para la preparación y almacenamiento de mezclas de hidrógeno y gas natural, lo que ha requerido la aplicación de normativas de seguridad como la NFPA 2 (National Fire Protection Association) para el manejo seguro del hidrógeno y la NFPA 70 para las instalaciones eléctricas en áreas

Tabla 1. Propiedades del hidrógeno [1].

Propiedad	Valor	Comparación con GN
Densidad (gas)	0,089 kg/m ³	1/10 del GN
Densidad (líquido)	70,79 kg/m ³	1/6 del GNL
Temperatura de ebullición	-252,76 °C	93 °C menos que el GN
Velocidad de llama	346 cm/s	8 veces la del GN
Rango de ignición	4 % a 77 % en aire	6 veces el del GN
Energía de ignición	0,02 MJ	1/10 la del GN
Poder calorífico superior máximo	33,3 kWh/kg	3 veces el del GN

clasificadas, así como criterios de atmósferas explosivas (ATEX). En este contexto, el presente documento recopila y analiza las principales problemáticas asociadas al almacenamiento de mezclas GN-H₂ en cilindros de alta presión, con el fin de garantizar una operación controlada, predecible y segura en aplicaciones experimentales.

2 Propiedades de la mezcla

El hidrógeno es un elemento que presenta un número atómico 1 debido a que cuenta con un protón en su núcleo atómico. A pesar de estar ubicada en el grupo 1 y periodo 1 de la tabla periódica, es un elemento difícil de clasificar ya que, aunque este ubicado cerca a los metales alcalinos, el hidrógeno es un no metal. El dihidrógeno (H₂) o hidrógeno molecular, gas incoloro, inodoro e insípido y extremadamente inflamable, es el gas al que se hace referencia a la hora de realizar las mezclas con gas natural y el que se usa en la industria [1].

Las propiedades del hidrógeno más relevantes se presentan en la Tabla 1.

El gas natural es bastante común, debido a que es el gas que en su mayoría circula por redes domiciliarias para proveer a los hogares. Además de eso al ser una mezcla, está compuesto por varias sustancias, lo cual hace que se requiera de análisis de su composición pues sus propiedades varían en función de los niveles de concentración de cada sustancia [2].

Para este artículo se decidió que el gas natural manejaría unos valores predeterminados para dar explicación a las diferentes problemáticas que se presentan en este artículo; la composición usada se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición de un gas natural [2].

Sustancia	Composición
Metano	77,824
Nitrógeno	2
CO ₂	6
Etano	8
Propano	3
Isobutano	0,15
Butano	0,3
Isopentano	0,05
Pentano	0,165
Hexano	0,215
Heptano	0,088
Octano	0,024
Nonano	0,015
Decano	0,009
Hidrógeno	0,4
Oxígeno	0,5
CO	0,2
Agua	0,01
H ₂ S	0,25
Helio	0,7
Argon	0,1

El gas natural con la composición descrita presenta las propiedades que se muestran en la Tabla 3.

Conocer las propiedades del gas es un factor muy importante a la hora de identificar los problemas debido a propiedades como la densidad del gas, punto de ignición, factor de compresibilidad, etc., debido a que permiten identificar características del gas que pueden influenciar o detonar posibles riesgos que afecten al laboratorio.

Tabla 3. *Propiedades del gas natural [2].*

Propiedad	Valor	Unidad SI
Densidad	68,52	kg/m ³
Factor de compresibilidad (Z)	0,8345	—
Presión	6,895	MPa
Velocidad del sonido	368,73	m/s
Masa molar	0,02054	kg/mol
Densidad relativa (condiciones de referencia)	0,7110	—
Poder calorífico volumétrico (condiciones de referencia)	39,26	MJ/m ³

3 Inflamabilidad de las mezclas GN–H₂

La inflamabilidad constituye una de las principales problemáticas asociadas al almacenamiento y manejo de mezclas de gas natural e hidrógeno en cilindros de alta presión. Ambos gases son combustibles; sin embargo, el hidrógeno presenta características que incrementan significativamente el nivel de riesgo frente al gas natural convencional.

El hidrógeno posee un rango de inflamabilidad en aire considerablemente más amplio (aproximadamente de 4 % a 75 % en volumen) en comparación con el metano, principal componente del gas natural, cuyo rango se encuentra alrededor de 5 % a 15 %. Asimismo, la energía mínima de ignición del hidrógeno es aproximadamente un orden de magnitud menor que la del metano, lo que implica que fuentes de energía relativamente pequeñas, como descargas electrostáticas o chispas de baja intensidad, pueden iniciar la combustión. A esto se suma su elevada velocidad de propagación de llama, que puede favorecer transiciones

rápidas hacia regímenes más severos de combustión en condiciones confinadas [3, 4].

Cuando el hidrógeno se incorpora al gas natural, las propiedades de inflamabilidad de la mezcla se modifican progresivamente en función de la fracción molar de H₂. En general, la adición de hidrógeno tiende a ampliar el rango de inflamabilidad y a aumentar la velocidad de llama, lo que puede incrementar la severidad potencial de un escenario de fuga e ignición. Además, debido a su baja densidad y alta difusividad, el hidrógeno puede acumularse en zonas superiores de espacios confinados, generando atmósferas localmente enriquecidas y, por tanto, más susceptibles a la ignición.

En cilindros de almacenamiento, tuberías e instrumentación asociada, esta problemática exige medidas específicas tales como una adecuada clasificación de áreas, sistemas de ventilación efectivos, dispositivos de detección de fugas compatibles con hidrógeno y el uso de equipos eléctricos certificados para atmósferas potencialmente explosivas.

Por lo tanto, la inflamabilidad no solo representa un riesgo intrínseco del combustible, sino un factor determinante en el diseño, operación y gestión de la seguridad de sistemas que almacenan y transportan mezclas GN-H₂.

4 Problemáticas del almacenamiento del hidrógeno

El almacenamiento y manejo de hidrógeno a alta presión implica desafíos técnicos relevantes debido a sus propiedades físico-químicas particulares. Su reducido tamaño molecular y alta difusividad favorecen la permeación a través de materiales metálicos y poliméricos, lo que puede generar fugas progresivas en cilindros, tuberías, válvulas e instrumentos de medición. Además, la interacción del hidrógeno con la microestructura de ciertos metales puede inducir fenómenos de fragilización, reduciendo la ductilidad, la resistencia a la fatiga y la integridad estructural de componentes sometidos a

presión. Estas problemáticas hacen que la selección adecuada de materiales, el diseño mecánico y los criterios de operación sean factores críticos para garantizar la seguridad y confiabilidad de los sistemas que almacenan y transportan hidrógeno o mezclas que lo contienen.

4.1 Permeabilidad del hidrógeno

El hidrógeno presenta una elevada capacidad de permeación a través de numerosos metales estructurales, especialmente a temperaturas elevadas y bajo gradientes de presión. Este fenómeno, gobernado por los procesos de disociación molecular, disolución atómica y difusión en la red metálica, constituye un aspecto crítico en el diseño y operación de sistemas industriales que manejan hidrógeno. Conocer la permeabilidad del hidrógeno no solo permite predecir pérdidas de gas, sino que resulta esencial para evaluar riesgos de seguridad, integridad estructural y emisiones no controladas al ambiente.

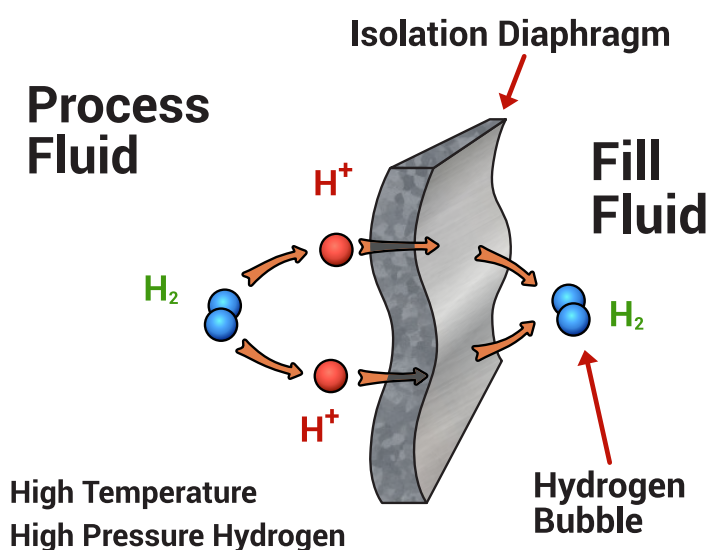


Figura 1. Permeación del hidrógeno a través del acero. Tomada de [6].

Adicionalmente, la permeación de hidrógeno puede contribuir a fenómenos de degradación de materiales, como la fragilización por hidrógeno, reduciendo la vida útil de los componentes y aumentando la probabilidad de fallas mecánicas. Este riesgo se ve acentuado en sistemas sometidos a ciclos térmicos o a exposiciones prolongadas, donde el hidrógeno disuelto puede acumularse y alterar las propiedades microestructurales del metal. Por tanto, una estimación adecuada de la permeabilidad es indispensable para garantizar la confiabilidad estructural de instalaciones que operan con hidrógeno a mediana y alta temperatura [5].

El proceso inicia cuando el hidrógeno molecular (H_2) llega a la superficie del metal, como se aprecia en la Figura 1. Allí, las moléculas se adsorben físicamente o químicamente sobre la superficie. Una vez adsorbido, el hidrógeno molecular se disocia en átomos de hidrógeno (H). Este paso es clave, ya que solo el hidrógeno atómico puede penetrar la red cristalina del metal. Por esta razón, la permeación suele

presentar una dependencia con la raíz cuadrada de la presión, de acuerdo con la ley de Sieverts. Los átomos de hidrógeno se disuelven en los sitios intersticiales de la red cristalina del metal (especialmente en estructuras cúbica centrada en las caras y cúbica centradas en el cuerpo). La concentración de hidrógeno disuelto depende de la presión parcial de hidrógeno, la temperatura y el material del metal.

Una vez disuelto, el hidrógeno difunde a través del espesor del metal, impulsado por un gradiente de concentración entre la cara de alta presión y la de baja presión. Este paso suele ser el mecanismo controlante y se describe mediante la ley de Fick:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x}$$

donde:

(J) es el flujo de permeación.

(D) es el coeficiente de difusión.

($\partial c / \partial x$) es el gradiente de concentración.

Todo esto para llegar a la cara opuesta de material y generar una fuga silenciosa,

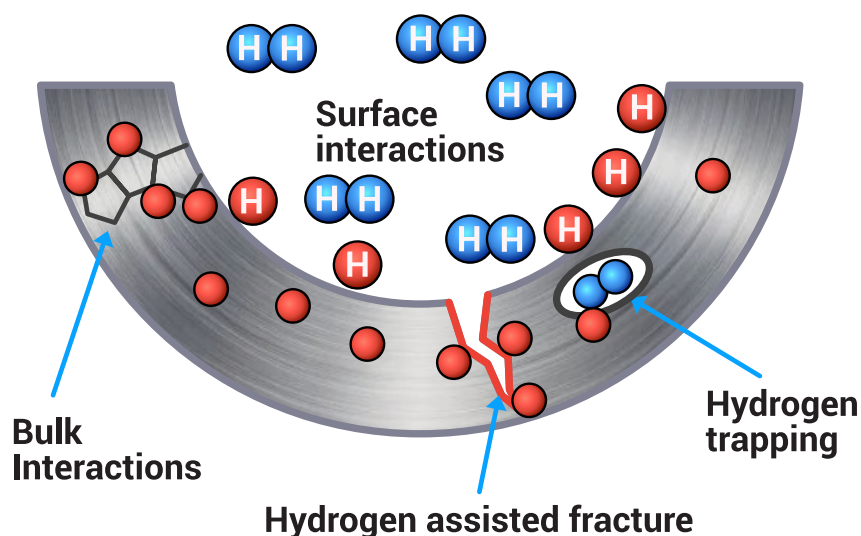


Figura 2. Fragilización por hidrógeno en el acero. Tomada de [7].

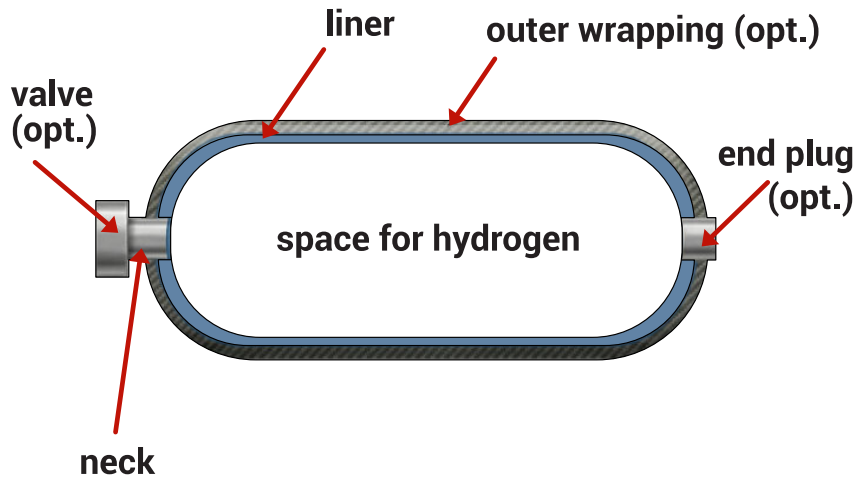


Figura 3. Componentes del cilindro para hidrógeno. Tomada de [12].

incontrolable y peligrosa en caso de no tomar las contramedidas necesarias durante la selección de los materiales de los instrumentos y equipos [6].

4.2 Fragilización por hidrógeno

Una vez conocida la permeabilidad del hidrógeno, se puede hablar de la problemática que más afecta la integridad de los equipos de almacenamiento y transporte de hidrógeno, la fragilización. La fragilización por hidrógeno (hydrogen embrittlement) es un fenómeno de degradación mecánica que afecta a muchos metales y aleaciones cuando se encuentran en contacto con hidrógeno en forma atómica o molecular bajo ciertas condiciones de servicio. Este proceso se distingue por una reducción significativa de la ductilidad, la resistencia a la fractura y la resistencia a la fatiga de un material en comparación con su comportamiento en aire y a temperatura ambiente, lo que puede comprometer la integridad estructural de componentes críticos en sistemas de hidrógeno [7, 8].

El origen de la fragilización por hidrógeno radica en la capacidad del hidrógeno atómico para difundirse dentro de la matriz

metálica como se muestra en la Figura 2. Las moléculas de hidrógeno pueden disociarse en superficie y penetrar como átomos individuales en los intersticios de la red cristalina del metal. Debido al pequeño tamaño atómico del hidrógeno, estos átomos migran rápidamente hacia zonas de alta energía interna, tales como límites de grano, concentradores de tensión, inclusiones o precipitados. En estas regiones, el hidrógeno tiende a acumularse y favorecer la nucleación de micro defectos, reduciendo así la cohesión entre átomos y acelerando la iniciación y propagación de grietas bajo carga mecánica [9, 10].

5 Selección de cilindros de almacenamiento

La selección del tipo de cilindro o depósito de hidrógeno no es una decisión trivial, influye directamente en la seguridad, eficiencia, costo y adecuación del sistema de almacenamiento frente a las condiciones específicas de operación. El hidrógeno es un gas extremadamente ligero y altamente inflamable que, debido a sus propiedades físicas, exige soluciones

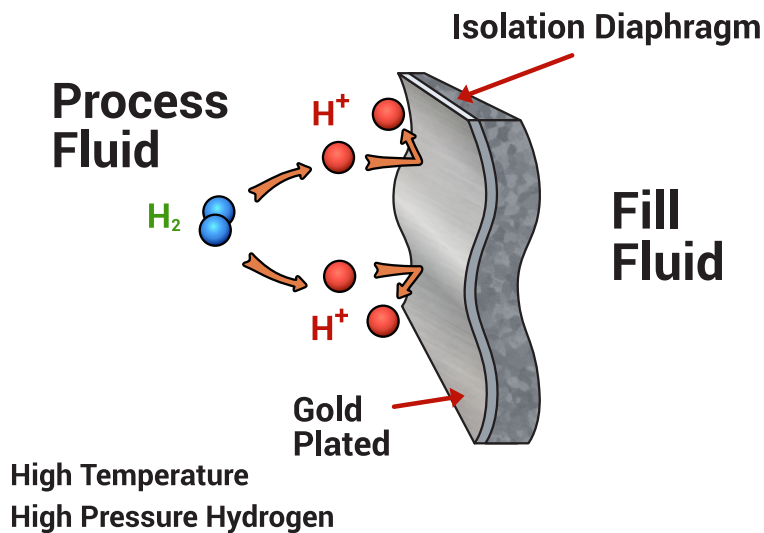


Figura 4. Función del liner contra la permeabilidad. Tomada de [6].

de almacenamiento diseñadas para soportar altas presiones y para minimizar riesgos como los mencionados, tales como fugas, fragilización por hidrógeno o fallos estructurales. Elegir un cilindro inadecuado puede resultar en un rendimiento pobre, mayor consumo energético, o incluso riesgos para la integridad de las instalaciones y las personas. Por ello, los criterios de selección típicos incluyen la presión de diseño, el volumen interno, la masa de hidrógeno que se desea almacenar, el rango de temperatura de operación, la masa total del tanque, sus dimensiones, ciclo de vida y certificaciones del recipiente.

5.1 Características del cilindro

Con el fin de prever los problemas antes mencionados, se manejan cilindros de almacenamiento de hidrógeno específicamente diseñados para contener este tipo de gas. A la gran mayoría de

cilindros para hidrógeno se les puede describir de la forma en la que se muestra en la Figura 3.

El liner o revestimiento interno tiene como función principal contener el hidrógeno disociado dentro del volumen útil del tanque, asegurando la estanqueidad del sistema como se muestra en la Figura 4. En muchos diseños, este revestimiento se encuentra rodeado por una envoltura externa, cuya función es proporcionar soporte estructural frente a los elevados esfuerzos mecánicos generados durante el almacenamiento a alta presión, además de contribuir como una capa adicional de aislamiento térmico en tanques de hidrógeno de alta presión.

El cuello del tanque constituye el punto de conexión entre el sistema de almacenamiento y los elementos externos, ya que es a través de esta zona donde se realiza la carga y descarga del hidrógeno. En él se integran las conexiones hacia tuberías o válvulas que permiten un flujo

controlado del gas. Habitualmente, esta sección incorpora dispositivos de seguridad, como válvulas de alivio, y en algunos casos sensores o sistemas de válvulas más avanzados que facilitan una regulación adicional de la presión interna.

De manera opcional, el tanque puede incluir un tapón final, que actúa como una abertura secundaria y puede emplearse para funciones específicas según el diseño y la aplicación del sistema de almacenamiento [12].

5.2 Clasificación de los cilindros

Los cilindros destinados al almacenamiento de hidrógeno, ya sea en estado puro o en mezclas con otros gases, deben contar con certificaciones específicas que garanticen su compatibilidad y seguridad operativa. La identificación de un recipiente apto para servicio con hidrógeno no depende únicamente de su clasificación estructural, sino del cumplimiento de normas internacionales que evalúan la integridad mecánica y la interacción del material con este gas. Entre las principales normativas se encuentran la ISO 11114, relacionada con la compatibilidad de materiales metálicos y la evaluación de fenómenos de fragilización; la ISO 19881, aplicable a recipientes utilizados en vehículos de hidrógeno; así como las especificaciones DOT (Department of Transportation) y ASME (American Society of Mechanical Engineers), que establecen criterios de diseño, fabricación y ensayos de presión, fatiga y permeación.

En función de estas certificaciones, los cilindros se clasifican estructuralmente en cinco tipos (Tipo I al Tipo V), cada uno con características particulares en cuanto a materiales, configuración del liner y sistema de refuerzo. La selección del tipo de cilindro depende de los requerimientos de presión, condiciones de operación y

aplicación específica, garantizando en todos los casos el cumplimiento de los estándares de seguridad exigidos para el almacenamiento de hidrógeno.

Tipo 1: cilindros metálicos tradicionales

Los depósitos Tipo 1 están fabricados completamente en metal, generalmente acero o aluminio. Su construcción robusta representa un diseño sencillo y económico capaz de soportar presiones de hasta 350 bar, lo que los hace útiles para aplicaciones industriales estacionarias y almacenamiento fijo de gas. Sin embargo, su alto peso limita su uso en aplicaciones móviles.

Tipo 2: metal con refuerzo compuesto

Los cilindros Tipo 2 combinan un revestimiento metálico con una envoltura externa de materiales compuestos (como fibra de vidrio o aramida). Esta combinación permite soportar presiones mayores que los cilindros totalmente metálicos con cierto ahorro de peso, aunque todavía no son los más adecuados para aplicaciones donde el peso es crítico.

Tipo 3: liner metálico con refuerzo avanzado

En los depósitos Tipo 3, el liner metálico es más delgado y la resistencia estructural principal proviene de un refuerzo compuesto de fibras (normalmente de carbono). Esta arquitectura permite presiones de hasta 700 bar y proporciona un equilibrio entre peso y capacidad de almacenamiento, haciéndolos útiles en aplicaciones industriales móviles, por ejemplo, en unidades portátiles o sistemas de transporte de hidrógeno.

Tipo 4: compuesto completo

Los cilindros Tipo IV emplean un liner no metálico (polimérico) recubierto por fibras compuestas de alta resistencia

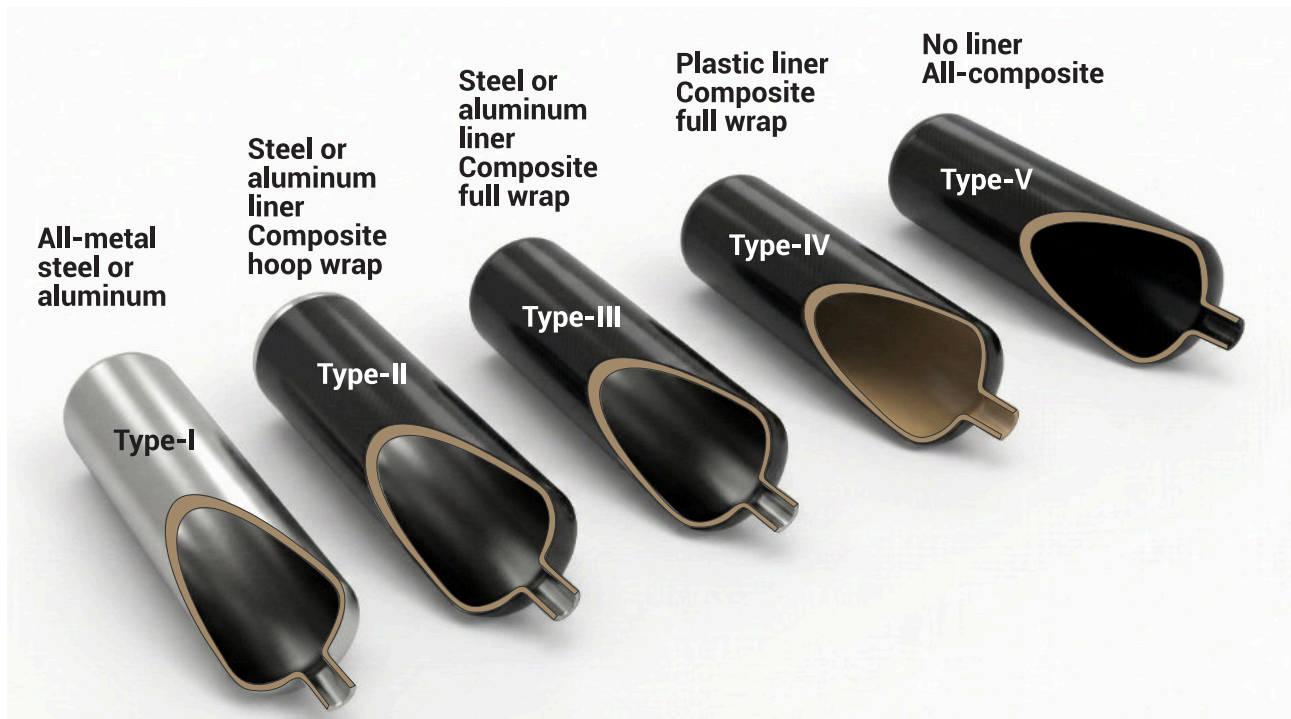


Figura 5. Tipos de cilindros para hidrógeno. Tomada de [12].

como fibra de carbono, lo que los convierte en los más ligeros dentro de los diseños de alta presión. Esta característica los hace especialmente adecuados para aplicaciones móviles, tales como vehículos con pilas de combustible y estaciones de repostaje avanzadas, donde minimizar peso sin sacrificar presión es crucial.

Tipo 5: cilindros completamente compuestos (sin liner)

Los cilindros Tipo V se caracterizan por estar fabricados íntegramente con materiales compuestos, prescindiendo totalmente de un revestimiento interno metálico o polimérico. En este diseño, la función de contención del hidrógeno y la resistencia mecánica frente a la presión interna recaen exclusivamente en la estructura compuesta, generalmente basada en fibras de carbono de alta resistencia y matrices poliméricas avanzadas.

La principal ventaja de este tipo de cilindro es su peso extremadamente reducido, lo que permite alcanzar una relación peso-capacidad superior a la de los cilindros Tipo IV. Esta característica los hace particularmente atractivos para aplicaciones donde la reducción de masa es crítica, como en el sector aeroespacial, aeronáutico o en sistemas móviles de alto desempeño. Asimismo, el diseño sin liner elimina problemas asociados a la fragilización del metal o a la permeación del hidrógeno a través de polímeros, aunque introduce nuevos desafíos técnicos [11].

Entre las principales limitaciones de los cilindros Tipo V se encuentran el control de la permeabilidad del hidrógeno, la durabilidad a largo plazo, la resistencia a ciclos repetidos de carga y descarga, y la complejidad en los procesos de fabricación y certificación. Debido a estos retos, su uso se encuentra actualmente en fases de investigación y desarrollo, con

aplicaciones principalmente experimentales y demostrativas, más que en entornos industriales convencionales.

En la Figura 5 se pueden apreciar los diferentes tipos de cilindros con sus vistas cortadas para poder identificar cada uno de los elementos y características mencionadas en cada tipo de cilindro. Esa clasificación se realiza con el fin de poder ofrecer diferentes tipos de cilindros que se ajusten a cada una de las necesidades del usuario, ajustando principalmente variaciones en peso, materiales, precio, etc.

6 Normativas de seguridad

La creciente incorporación del hidrógeno como vector energético, ya sea de forma pura o en mezclas con gas natural (GN-H₂), introduce nuevos desafíos en términos de seguridad, diseño y operación de instalaciones industriales. En este contexto, los códigos y estándares de la National Fire Protection Association (NFPA) proporcionan lineamientos fundamentales para la prevención y mitigación de riesgos asociados a la inflamabilidad, la dispersión de fugas y las fuentes de ignición. Entre ellos, la NFPA 2: Hydrogen Technologies Code y la NFPA 70: National Electrical Code (NEC) resultan particularmente relevantes.

6.1 NFPA 2, Código de tecnologías de hidrógeno

La NFPA 2 establece los requisitos mínimos de seguridad para la producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno, abordando de manera integral los riesgos específicos derivados de sus propiedades fisicoquímicas. En el caso de mezclas GN-H₂, la NFPA 2 resulta especialmente relevante porque proporciona criterios para la clasificación de áreas peligrosas, considerando

escenarios de liberación de hidrógeno, define distancias de separación, ventilación y detección de fugas, aspectos críticos cuando el hidrógeno se mezcla con gas natural, ya que la estratificación y la dispersión pueden diferir significativamente de las del GN puro, introduce requisitos de compatibilidad de materiales, reconociendo fenómenos como la permeación y la fragilización por hidrógeno, que pueden verse agravados incluso a bajas fracciones molares de H₂ en la mezcla.

Aunque la NFPA 2 está enfocada principalmente en hidrógeno puro, sus principios de seguridad son aplicables y cada vez más utilizados como referencia para evaluar instalaciones con blending de hidrógeno en redes de gas natural, donde los riesgos no son una simple superposición de ambos combustibles, sino el resultado de interacciones complejas, por lo que tenerla en cuenta para aplicaciones como almacenamientos de mezclas de GN-H₂ resulta bastante crítico para su implementación [13].

6.2 NFPA 70, Código nacional eléctrico

La NFPA 70, conocida como National Electrical Code, regula el diseño e instalación de sistemas eléctricos en áreas clasificadas, con el objetivo de prevenir la ignición de atmósferas inflamables. Este estándar es crítico en sistemas GN-H₂ debido a la baja energía de ignición del hidrógeno, considerablemente menor que la del gas natural.

Desde la perspectiva de mezclas GN-H₂, la NFPA 70 establece criterios para la clasificación de áreas (Clase, División o Zona) en presencia de gases inflamables, donde la adición de hidrógeno puede modificar la categoría de riesgo originalmente definida para GN, también define requisitos para equipos eléctricos a

prueba de explosión, intrínsecamente seguros o con protección aumentada, esenciales para evitar chispas, arcos eléctricos o superficies calientes y cobra especial importancia en sistemas de instrumentación, sensores, actuadores y sistemas de control, donde la migración de hidrógeno por permeación o fugas puede generar atmósferas explosivas en volúmenes confinados.

La NFPA 70, en combinación con la NFPA 2, permite abordar el riesgo de ignición desde una perspectiva integral, considerando tanto la fuente de combustible (mezcla GN-H₂) como las fuentes potenciales de ignición eléctrica [14].

Conclusiones

El almacenamiento de mezclas GN-H₂ en cilindros de alta presión constituye un desafío técnico integral debido a las particularidades fisicoquímicas del hidrógeno y a su interacción con los materiales estructurales. A partir del análisis desarrollado, se identificaron como principales problemáticas el aumento de la inflamabilidad de la mezcla, la posible estratificación por diferencias de densidad, la permeación del hidrógeno a través de materiales, la fragilización metálica y la degradación progresiva de la integridad mecánica de los recipientes a presión.

Desde el punto de vista de seguridad, la adición de hidrógeno al gas natural amplía el rango de inflamabilidad, reduce la energía mínima de ignición y aumenta la velocidad de propagación de llama, incrementando la severidad potencial de fugas en espacios confinados. La mitigación de este riesgo exige una adecuada clasificación de áreas, ventilación eficiente, sistemas de detección de fugas sensibles al hidrógeno

y el uso de equipos eléctricos certificados conforme a la NFPA 70, complementados con los lineamientos generales de la NFPA 2 para almacenamiento y separación segura.

En términos de integridad estructural, la permeación y la fragilización por hidrógeno representan los mecanismos más críticos. La permeación, descrita por la ley de Sieverts y la ley de Fick, puede generar pérdidas silenciosas y acumulación de gas, mientras que la fragilización reduce la ductilidad y resistencia a la fractura de ciertos metales bajo carga. La solución radica en la selección adecuada de materiales compatibles, el uso de liners diseñados para minimizar la difusión, la limitación de esfuerzos operativos, el control de ciclos de carga y descarga y la aplicación de estándares como la ISO 11114.

Asimismo, la correcta selección del tipo de cilindro (Tipo I-V) resulta determinante para equilibrar presión de diseño, peso, resistencia mecánica y comportamiento frente al hidrógeno. Los cilindros con refuerzo compuesto y configuraciones avanzadas ofrecen ventajas en reducción de peso y control estructural, siempre que cumplan con certificaciones internacionales y criterios de compatibilidad específicos para servicio con hidrógeno.

En conjunto, el almacenamiento seguro de mezclas GN-H₂ no depende de una única medida de mitigación, sino de la integración coherente entre conocimiento de propiedades termodinámicas, diseño mecánico, selección de materiales y cumplimiento normativo. Este enfoque multidisciplinario permite reducir riesgos, garantizar la integridad de los sistemas y facilitar la incorporación progresiva de hidrógeno en aplicaciones experimentales e industriales dentro del marco de la transición energética.

Referencias

- [1] Troncoso G., F. (2021). Claves del hidrógeno verde. *InduAmbiente* 29(171): 28-31.
- [2] American Gas Association. (2017). AGA report no. 8 – Part 1 – Thermodynamic properties of natural gas and related gases – DETAIL and GROSS equations of state (3 ed.), American Gas Association, Estados Unidos.
- [3] MFE Inspection Solutions. What is LEL? A guide to lower explosive limit, 2026-01. Disponible en <https://mfe-is.com/lel/>
- [4] Liu, C., Pei, Y., Cui, X., Li, X., Yang, H., Xing, X., Duan, P. y Li, Y. (2023). Study on the stratification of the blended gas in the pipeline with hydrogen into natural gas. *International Journal of Hydrogen Energy* 48(13): 5186-5196. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.074>
- [5] Strehlow, R. A. y Savage, H. C. (1974). The permeation of hydrogen isotopes through structural metals at low pressures and through metals with oxide film barriers. *Nuclear Technology* 22: 127-137. <https://doi.org/10.13182/NT74-A16282>
- [6] Yokogawa. (2013). Application guide - Hydrogen permeation. *Vigilant Plant* 3(4): 501.
- [7] Damm, B. FAQ: cómo evitar la fragilización por hidrógeno en el acero, 2023. Disponible en <https://www.swagelok.com/es/blog/avoid-hydrogen-embrittlement>
- [8] Herlach, D., Kottler, C., Wider, T. y Maier, K. (2000). Hydrogen embrittlement of metals. *Physica B: Condensed Matter* 289-290: 443-446. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(00\)00431-2](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(00)00431-2)
- [9] Tyson, W. (1979). Hydrogen in metals. *Canadian Metallurgical Quarterly* 18: 1-11. <https://doi.org/10.1179/cm.1979.18.1.1>
- [10] Eliezer, D. y Silverstein, R. (2018). Recent studies of hydrogen embrittlement in structural materials. *Procedia Structural Integrity* 13: 2233-2238. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.135>
- [11] Pati, S., Deshmame, A., Korff, M. y Dickhut, T. (2025). Overview of the challenges in high-pressure Type V hydrogen tanks for automotive applications. *Stuttgart Conference on Automotive Production 2024*: 402-414. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88831-1_31
- [12] Hyfindr. Depósito de hidrógeno - Tipo I-IV. Disponible en: <https://www.hyfindr.com/es/hydrogen-knowledge/deposito-de-hidr%C3%B3geno>
- [13] National Fire Protection Association. (2023). NFPA 2: Hydrogen Technologies Code. NFPA, Estados Unidos.
- [14] National Fire Protection Association. (2023). NFPA 70: National Electrical Code. NFPA, Estados Unidos.