

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

EDITOR

GENERAL :

**CARLOS EDUARDO GARCÍA
SÁNCHEZ, Ph.D.**

Líder Investigación
y Relacionamento Externo
revistamyf@cdtdegas.com

Parque Tecnológico UIS Guatiguará
km 2 vía Refugio, Piedecuesta
Teléfono: 312 3505221.

COMITÉ EDITORIAL :

HENRY ABRIL BLANCO
Director - CDT de Gas

JOSE AUGUSTO FUENTES
M.Sc.
Gestor Técnico - CDT de Gas

**LUIS EDUARDO GARCÍA
SÁNCHEZ**
Gerente Inline Fluid Systems

ARLEX CHAVES GUERRERO,
Ph.D.
Docente e Investigador - Universidad
Industrial de Santander

JUAN MANUEL ORTIZ
AFANADOR
Gerente - Polygon Energy

**DIONISIO ANTONIO LAVERDE
CATAÑO, Ph.D.**
Docente e Investigador - Universidad
Industrial de Santander

DISEÑADOR :

LEONARDO MANZANO
PAREDES
Diseñador

CONTENIDO MET&FLU

CIENCIA - TECNOLOGÍA - INNOVACIÓN

6

De la señal a la acción:
adquisición de datos y control

22

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

El impacto energético de la inteligencia artificial

El lanzamiento del chatbot ChatGPT a finales de 2022 fue un hito en la disponibilidad y utilidad de la inteligencia artificial (IA), y muchas otras empresas comenzaron a ofrecer sus propios servicios de IA [1, 2]. Aunque el usuario suele familiarizarse con el nombre de la capa de aplicación (por ejemplo, ChatGPT o Copilot), lo que realiza el trabajo de construir las respuestas es un modelo de lenguaje de gran tamaño (LLM, por las siglas en inglés). Actualmente existen decenas de LLM diferentes (sin contar las diferentes versiones del "mismo" LLM), y entre los más conocidos están Claude (Anthropic), DeepSeek-R1 (DeepSeek), Gemini (Google DeepMind), GPT (OpenAI), Granite (IBM), Grok (xAI), Llama (Meta), o4 (OpenAI), Qwen (Alibaba Cloud) y Stable LM (Stability AI) [3]. También se han desarrollado decenas de modelos que se encargan de generar imágenes o videos de unos pocos segundos a partir de entradas de texto.



A pesar del elevado impacto social de estas herramientas de IA, durante 2025 se ha generado cierta desilusión sobre ellas. Entre los motivos se encuentran los siguientes tres: (1) ChatGPT generó unas expectativas infladas sobre la IA; (2) los líderes de las mayores compañías de IA hicieron promesas sobre las capacidades de sus modelos que no podían cumplir; y (3) en general las empresas que han invertido en herramientas de IA no han logrado recuperar sus inversiones [1, 2]. Adicionalmente, aún no es claro cómo las grandes compañías desarrolladoras de IA recuperarán las increíbles cantidades de dinero que han gastado en construcción de centros de datos y en entrenamiento de modelos [1]. Las actualizaciones tecnológicas centrales (es decir, en los modelos) no son los grandes saltos de hace unos años, porque con el hardware y la estrategia preferida de modelado actuales se ha alcanzado el límite de parámetros que pueden incluirse en los LLM de manera que su entrenamiento tome un tiempo aceptable (esto es, unos pocos meses) [1, 4]. Y los LLM actuales son mejores que el humano promedio en muchas cosas diferentes, pero no son mejores que un humano experto, además de que tienden a ser mucho peores para generalizar que las personas [1].

Lo anterior no quiere decir que se haya alcanzado el límite superior operativo de la IA. El problema está en que los lanzamientos de años recientes dieron la impresión de que los avances se presentarían de manera espectacularmente veloz [1]. Pero en realidad, el desarrollo de las capacidades actuales de IA ha sido un trabajo gradual, con una teoría básica que comenzó a desarrollarse hace más de 60 años y un crecimiento progresivo de la producción de conocimiento sobre IA; para la muestra, el número de artículos científicos relacionados con IA se duplicó de 2010 a 2021 [2]. De modo que se espera que el uso de IA sea cada vez mayor, con un futuro en el que se utilicen ampliamente agentes de IA y otras aplicaciones de mayor complejidad que las actuales [5]. Y este inevitable uso creciente de la IA tendrá implicaciones sobre los sistemas energéticos y los recursos naturales, porque la IA requiere de recursos: los materiales que se usan en la construcción de los centros de datos y el hardware, agua para enfriamiento, y mucha energía. Vale la pena mencionar que no es una novedad que los desarrollos tecnológicos que permiten realizar procesos a mayor velocidad o de manera automatizada, o sustituir actividades humanas, requieran recursos para su fabricación y, sobre todo, energía para su operación.

Los modelos de IA consumen energía en sus dos etapas de existencia: durante su entrenamiento, y durante su uso (o "inferencia"). Si es un modelo que no se modifica automáticamente, la energía del entrenamiento es un gasto único, pero significativo. Por ejemplo, se estima que el entrenamiento de GPT-4 duró más de tres meses, costó más de 100 millones de dólares y consumió 50 GWh de energía [6], que es aproximadamente la cantidad de electricidad que consume la ciudad de Bucaramanga (más de 600 000 habitantes) durante 24 días [7]. Y durante la inferencia o uso, la energía que consuma dependerá de las veces que se utilice el modelo (que "se consulte"); se estima que actualmente más del 80 % del poder de cómputo para IA se usa para inferencia [5]. El consumo energético de una consulta depende de muchas variables, incluyendo el tamaño y tipo del modelo y el tipo de salida que se está generando. De manera asociada, las emisiones de gases de efecto invernadero de una consulta dependen, además del consumo energético, de la ubicación del centro de datos y la red de electricidad a la que está conectado, y de la hora del día. Según Google, una consulta promedio de texto, que no genere imágenes o videos, a Gemini consume 0.24 Wh (864 J) de electricidad, que es aproximadamente el consumo de un microondas en 1 s [8]. Y de acuerdo con la información presentada en ML.Energy Leaderboard por investigadores de la Universidad de Michigan, que calculan el consumo energético por parte de modelos abiertos, la creación de una imagen por parte de Stable Diffusion consume en promedio 3.56 kJ, y la creación de un video de 5 s a partir de la descripción de una escena por parte de Wan 2.1 requiere en promedio alrededor de 340 kJ [9]. Usando la analogía del microondas, la creación de la imagen equivaldría a usar el microondas unos 4 s, y generar el video de 5 s gastaría energía como el uso del microondas durante unos seis minutos y medio.

El crecimiento de nuevas tecnologías, incluyendo la IA, ha contribuido a nuevos récords en la demanda mundial de energía, y a pesar de que el despliegue de renovables haya sido creciente por vigesimotercer año consecutivo, también el consumo de energías fósiles y nuclear han tocado máximos históricos [10]. El consumo de electricidad para IA ocurre en los centros de datos que se destinan parcialmente para su entrenamiento y uso. Entre 2005 y 2017, el consumo eléctrico de los centros de datos se mantuvo más o menos constante, porque aunque se

construyeron muchos centros de datos, las mejoras en eficiencia impidieron que el consumo energético se incrementara [5]. Pero después se comenzaron a construir centros de datos con hardware para IA, que requieren mucha energía, y por esto para 2023 el consumo energético de los centros de datos en Estados Unidos se había duplicado; hoy en día los más de 3 000 centros de datos estadounidenses consumen el 4.4 % de la electricidad de ese país [5, 11, 12]. En Estados Unidos se teme que los tratos entre las empresas de electricidad y los centros de datos terminen ocasionando un incremento en el precio de la energía para los demás usuarios [12]. Adicionalmente, muchos centros de datos han recurrido a combustibles fósiles para satisfacer sus demandas inmediatas de energía [5, 12]. Todo esto contribuye a que se esté evidenciando una disminución en el impulso de los esfuerzos internacionales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, a pesar de que 2024 fue el primer año en que la temperatura global promedio excedió 1.5 °C por encima de los niveles pre-industriales [10].

Referencias

- [1] Heaven, W. D. (2025). The great AI hype correction of 2025. Recurso web, disponible en <https://www.technologyreview.com/2025/12/15/1129174/the-great-ai-hype-correction-of-2025/>
- [2] Stanford Online. (s. f.). Getting beyond the hype: A guide to AI's potential. Recurso web, disponible en <https://online.stanford.edu/getting-beyond-hype-guide-ais-potential>
- [3] Caballar, R. D. y Stryker, C. (2025). Una lista de modelos de lenguaje de gran tamaño. Recurso web, disponible en <https://www.ibm.com/es-es/think/topics/large-language-models-list>
- [4] Patel, D. (2023). The AI brick wall – A practical limit for scaling dense transformer models, and how GPT 4 will break past it. Recurso web, disponible en <https://newsletter.semianalysis.com/p/the-ai-brick-wall-a-practical-limit>
- [5] O'Donnell, J. y Crownhart, C. (2025). We did the math on AI's energy footprint. Here's the story you haven't heard. Recurso web, disponible en <https://www.technologyreview.com/2025/05/20/1116327/ai-energy-usage-climate-footprint-big-tech/>
- [6] Patel, D. y Wong, G. (2023). GPT-4 architecture, infrastructure, training dataset, costs, vision, MoE. Recurso web, disponible en <https://newsletter.semianalysis.com/p/the-ai-brick-wall-a-practical-limit>
- [7] Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios. (2025). Energía / Comercia l /Consolidado energía por empresa departamento y municipio. Recurso web, disponible en http://reportes.sui.gov.co/fabricaReportes/frameSet.jsp?idreporte=ele_com_096
- [8] Crownhart, C. (2025). In a first, Google has released data on how much energy an AI prompt uses. Recurso web, disponible en <https://www.technologyreview.com/2025/08/21/1122288/google-gemini-ai-energy/>
- [9] Chung, J.-W., Ma, J. J., Wu, R., Liu, J., Kweon, O. J., Xia, Y., Wu, Z., Chowdhury, M. (2025). The ML.ENERGY Leaderboard - How much time and energy do generative AI models consume? Recurso web, disponible en <https://ml.energy/leaderboard/>
- [10] International Energy Agency. (2025). World Energy Outlook 2025.
- [11] Ontiveros, J. E., Patel, D., Zhou, W., Kourabi, A. J. y Barkin, M. (2025). xAI's Colossus 2 - First gigawatt datacenter in the world, unique RL methodology, capital raise. Recurso web, disponible en <https://newsletter.semianalysis.com/p/xais-colossus-2-first-gigawatt-datacenter>
- [12] Samaras, C., Strubell, E. y Krishnan, R. (2025). AI's energy impact is still small—but how we handle it is huge. Recurso web, disponible en <https://www.technologyreview.com/2025/05/20/1116274/opinion-ai-energy-use-data-centers-electricity/>

CARLOS E GARCÍAS

CARLOS EDUARDO GARCIA SANCHEZ

Editor General

Revista Met&Flu



De la señal a la acción: adquisición de datos y control

From signal to action: data acquisition and control

Junior Gonzalo Hernández Espinosa ¹ *

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

* Correo electrónico: jhernandez@cdtdegas.com

Resumen

Este artículo presenta una visión integral de los sistemas de adquisición de datos y control aplicados a entornos reales de automatización, con énfasis en sistemas de pequeña y mediana escala. Se abordan los conceptos fundamentales relacionados con sensores, actuadores y controladores industriales, analizando la naturaleza de las señales involucradas y los desafíos que surgen al interactuar con procesos físicos no ideales. Asimismo, se discuten aspectos clave del acondicionamiento de señal, la conversión analógico-digital y la influencia del ruido eléctrico en la calidad de la medición y el desempeño del control. El artículo describe los controladores industriales principales, junto con nociones prácticas de teoría de control, muestreo y latencia. Finalmente, se presentan buenas prácticas de programación y seguridad, destacando su importancia para lograr sistemas confiables, robustos y seguros en aplicaciones reales.

Abstract

This article presents a comprehensive overview of data acquisition and control systems applied to real-world automation environments, with an emphasis on small and medium-scale systems. It addresses the fundamental concepts related to sensors, actuators, and industrial controllers, analyzing the nature of the signals involved and the challenges that arise when interacting with non-ideal physical processes. It also discusses key aspects of signal conditioning, analog-to-digital conversion, and the influence of electrical noise on measurement quality and control performance. The article describes the main industrial controllers, along with practical notions of control theory, sampling, and latency. Finally, it presents good programming and safety practices, highlighting their importance in achieving reliable, robust, and safe systems in real-world applications.

Palabras clave

Automatización, DAQ, control industrial, sensores, actuadores.

1 **Introducción**

La automatización consiste en el uso de comandos lógicos de programación y equipos que coordinan para reducir o reemplazar la intervención humana [1]. En su núcleo se encuentran los sistemas de control, conjuntos de dispositivos y algoritmos diseñados para monitoreo y coordinación de procesos de manera automática. Las necesidades y el avance tecnológico han permitido el desarrollo de sistemas para facilitar la operación y mejorar la productividad de procesos industriales. Actualmente, la automatización y los sistemas de control están presentes en la mayoría de los sectores productivos, por lo que resulta fundamental conocer las bases de su funcionamiento, los principales retos que plantean y las buenas prácticas para su implementación.

Un sistema de control emplea un controlador, sensores y transductores para obtener información sobre el estado actual de un proceso y, a partir de dicha información, generar señales de control que permitan dirigir el comportamiento del sistema de manera precisa. Dentro de un sistema de control intervienen diversos tipos de señales utilizadas para la comunicación entre dispositivos, por lo que el adecuado manejo y acondicionamiento de estas señales es fundamental para garantizar el desempeño global del sistema. La selección de equipos y dispositivos, así como de los estándares y protocolos de comunicación, debe realizarse considerando los requisitos del proceso, las condiciones de operación, la compatibilidad entre componentes y el nivel de precisión y confiabilidad deseado. Una elección apropiada asegura no solo un funcionamiento eficiente, sino también la capacidad de integrar, mantener y escalar el sistema conforme evolucionen las necesidades del proceso [2].

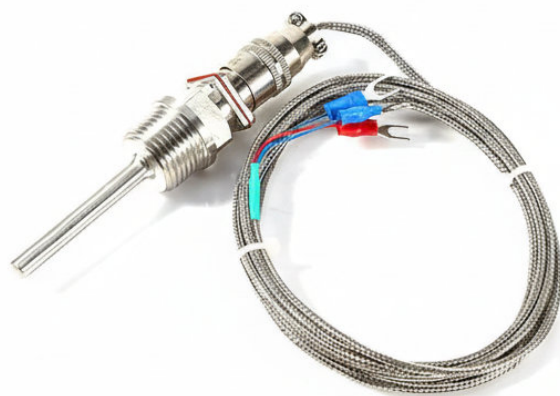
Los sistemas de adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en inglés), son parte fundamental de los sistemas de control. Se define como el proceso general mediante el cual fenómenos del mundo real son capturados y registrados en formato digital. Una lectura errónea, un dato que no llega, o que llega alterado pueden significar pérdida de productividad o condiciones inseguras en un entorno operativo.

2 **Sensores, actuadores y controladores en el mundo real**

2.1 **Sensores: naturaleza de la señal**

El primer elemento en un sistema de control y adquisición de datos es el sensor o transductor. Estos dispositivos constituyen la interfaz entre el mundo físico y el sistema de procesamiento, transformando fenómenos mecánicos, térmicos, eléctricos o químicos en información utilizable por un controlador o sistema DAQ. En la práctica, la calidad de esta transformación condiciona todo el desempeño del sistema: ningún algoritmo de control puede compensar una medición deficiente.

Un sensor es un dispositivo que modifica una propiedad interna en respuesta a una variable física presente en el entorno, mientras que un transductor se encarga de convertir dicha variación en una señal eléctrica cuantificable por un controlador. En muchos dispositivos comerciales, ambos elementos se encuentran integrados dentro de un mismo encapsulado, sin embargo, una excepción se encuentra en la medición de temperatura, donde el elemento sensor (como un RTD) se adquiere por separado del transmisor de señal, el cual convierte la variación de resistencia en una señal de corriente.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Elemento sensor de temperatura RTD y (b) Transductor con salida de corriente 4-20 mA.

En aplicaciones industriales, estos dispositivos suelen operar con una alimentación de 24 VDC y proporcionan salidas diseñadas para soportar entornos con altos niveles de ruido, vibraciones e interferencias electromagnéticas. La confiabilidad del sistema depende tanto del principio de operación del sensor como de la señal y forma en que esta señal es generada y transmitida [3].

2.1.1 Sensores con salida analógica

Los sensores con señales de salida analógicas representan variables continuas como temperatura, presión, flujo o distancia, mediante corriente o voltajes, y son ampliamente utilizadas cuando se requiere un control más preciso del sistema, como un control de lazo cerrado. Los tipos de señales de salidas analógicas se pueden dividir en dos principales categorías:

- **Señales de corriente:** Son las más utilizadas en entornos industriales debido a su inmunidad al ruido eléctrico y capacidad para largas distancias. El lazo de corriente de 4-20 mA es el estándar global. Su rango permite

detectar fallos como cables rotos si la corriente cae a 0. Por su parte, 0-20 mA es menos común ya que no permite diferenciar su valor mínimo de una falla del sistema.

- **Señales de tensión:** Varían según el tipo de aplicación, siendo la señal de 0-10 V la más común en automatización, y 0-5 V/1-5 V en dispositivos de baja potencia. Son fáciles de implementar y leer (únicamente utilizando un multímetro), sin embargo, son susceptibles al ruido EMI e ineficientes para largas distancias debido a la resistencia del conductor que incrementa con la distancia del mismo, ocasionando caída de tensión alterando la información transmitida.

2.1.2 Sensores con salida digital

Los sensores digitales son aquellos dispositivos que entregan la información medida en forma de señales discretas, ya sea como niveles lógicos binarios (0 o 1) o como datos digitales codificados. A diferencia de los sensores analógicos, no proporcionan una señal continua proporcional a la magnitud física, sino un resultado ya interpretado.

- Salida de conmutación discretizada: Presente en sensores inductivos, capacitivos o fotoeléctricos, de 3 hilos, que usan un transistor interno NPN (0 V) o PNP (24 V) para definir un estado en su salida, como interruptores de fin de carrera y sensores de nivel líquido digitales. Estas salidas se tratan como señales binarias por el controlador.
- Interfaz serie: La señal nativa del sensor es digitalizada y configurada para funcionar a través de protocolos de comunicación tales como I²C, UART, Modbus, CAN o salidas de frecuencia, modulación por ancho de pulso (PWM), empleadas para enviar valores medidos de forma cuantitativa. Esto permite además incluir características de compensación, calibración y autodiagnóstico sin necesidad de procesamiento externo.

2.2 Actuadores: de la decisión al movimiento

Los actuadores representan el elemento final del sistema de control, encargado de convertir una señal de mando en una acción física sobre el proceso. Esta acción puede manifestarse como movimiento, fuerza, torque o regulación de flujo energético. En la práctica, la selección del actuador determina no solo la capacidad de control, sino también la velocidad de respuesta, el consumo energético y el nivel de mantenimiento requerido.

En entornos industriales son comunes los actuadores eléctricos, neumáticos e hidráulicos. Los sistemas neumáticos ofrecen simplicidad y seguridad intrínseca, los hidráulicos permiten altas fuerzas en aplicaciones de potencia, y los eléctricos destacan por su precisión, eficiencia y facilidad de integración con controladores digitales. Independientemente de su principio de funcionamiento, todos los actuadores imponen límites físicos que deben ser considerados en el diseño del

control, como saturaciones, retardos y no linealidades.

2.2.1 Actuadores eléctricos

Un actuador eléctrico es un dispositivo que convierte la energía eléctrica en movimiento mecánico. Se accionan mediante señales eléctricas de control, las cuales pueden ser digitales o analógicas y su comportamiento puede regularse en términos de posición, velocidad y par, dependiendo del tipo de actuador y del sistema de realimentación empleado. Los actuadores eléctricos se caracterizan por su alta precisión y repetibilidad, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren un control exacto del movimiento. Además, se integran fácilmente con PLC y controladores industriales. Requieren menor mantenimiento y una mayor eficiencia energética en comparación con los sistemas hidráulicos, aunque tienen limitaciones en cuanto a la fuerza que pueden desarrollar y suelen ser menos robustos en entornos extremos [4].

Los actuadores eléctricos se pueden encontrar de baja potencia, utilizados principalmente en aplicaciones de mecatrónica, sistemas CNC y robótica; microactuadores, capaces de generar fuerzas o movimientos muy pequeños, como los empleados en el control de enfoque automático de cámaras fotográficas; y actuadores de mayor potencia, como los motores eléctricos o accionamientos electromecánicos, comunes en líneas de producción o sistema de transporte [2, 5].

2.2.2 Actuadores neumáticos

Los mecanismos que convierten la energía del aire comprimido en trabajo mecánico son denominados actuadores neumáticos. Su mecanismo de funcionamiento consta

de una cámara de aire, un pistón y un diafragma que puede generar una salida que puede ser rotativa o lineal según el tipo de actuador. Los actuadores neumáticos pueden ser de simple efecto, en donde el aire empuja en una única dirección y un resorte retorna el pistón a su origen; o de doble efecto, con dos entradas de aire que permiten mayor control a costa de un mayor consumo de aire. Estos actuadores suelen utilizarse en válvulas de control en sistemas de tubería, accionamiento de frenos y puertas de acceso en vehículos de transporte público, entre otros.

2.2.3 Actuadores hidráulicos

Los actuadores hidráulicos están formados por un cilindro y un pistón que utilizan energía hidráulica y el principio de Pascal para generar movimiento lineal, rotatorio y oscilatorio, al mismo tiempo que multiplican la fuerza. Al igual que los actuadores neumáticos, pueden ser de efecto simple o de doble efecto [4]. Son de gran utilidad en aplicaciones que requieren una gran fuerza, como maquinaria pesada, grúas y prensas. Los actuadores en un sistema hidráulico están acompañados de una bomba, un depósito de fluido y válvulas de control, haciéndolos más costosos que otros sistemas como el neumático. Por su parte, los actuadores electrohidráulicos incorporan su propia bomba y motor integrados dentro del mismo actuador, facilitando su instalación y disminuyendo el mantenimiento requerido [1].

2.3 Controladores industriales

Un controlador industrial es un dispositivo de hardware programable diseñado para monitorear variables de proceso, procesar información en tiempo real y ejecutar acciones de control sobre sistemas físicos. Para ello, recibe señales provenientes de sensores y dispositivos de

campo, ejecuta una lógica de control definida por software y genera señales de salida hacia actuadores como motores, válvulas o relés. Estos dispositivos están diseñados para operar de forma segura en entornos industriales exigentes, caracterizados por vibraciones, amplios rangos de temperatura, ruido eléctrico y condiciones ambientales adversas [6]. El uso de controladores reduce la intervención humana y minimiza errores operativos. Además, contribuyen significativamente a la seguridad de las personas, los equipos y la planta, al permitir estrategias de protección, supervisión y respuesta ante fallas [7]. Asimismo, optimizan el uso de recursos, mejoran la eficiencia productiva y facilitan el diagnóstico y mantenimiento del sistema.

En la industria existen distintos tipos de controladores, diseñados para cubrir necesidades específicas según la complejidad del proceso y la escala del sistema. Entre los más representativos se encuentran el Controlador Lógico Programable (PLC) y el Controlador de Automatización Programable (PAC).

2.3.1 Controlador lógico programable (PLC)

Los Controladores Lógicos Programables (PLC) son computadoras industriales especializadas ampliamente utilizadas para el control de procesos discretos y secuenciales. Están diseñados para operar de forma confiable en condiciones severas, tolerando polvo, humedad, vibraciones, ruido eléctrico y variaciones térmicas. Su arquitectura está orientada al manejo de entradas y salidas digitales y analógicas, permitiendo la ejecución de lógica de control basadas en estados, eventos y temporizaciones [3].

Los PLC realizan procesamiento en tiempo real, respondiendo de manera



Figura 2. PLC Siemens SIMATIC S7-1500.

determinística a los cambios del proceso. Su programación se apoya en lenguajes estandarizados como Diagrama de Escalera (LD), Diagrama de Bloques de Función (FBD) o texto estructurado, lo que facilita el desarrollo, la depuración y el mantenimiento de las aplicaciones. Gracias a su robustez, simplicidad y alta confiabilidad, los PLC son ampliamente utilizados en líneas de ensamblaje, control de máquinas individuales, sistemas de transporte y automatización discreta. En este tipo de aplicaciones, ofrecen una solución eficiente cuando se requiere rapidez de respuesta y control preciso de eventos lógicos [2]. La Figura 2 muestra un PLC Siemens SIMATIC S7-1500.

2.3.2 Controlador de automatización programable (PAC)

Los Controladores de Automatización Programable (PAC) surgen a comienzos de los años 2000 como respuesta a la creciente complejidad de los sistemas industriales. Aunque los PLC demostraron ser extremadamente confiables, comenzaron a resultar limitados para aplicaciones que requerían mayor

capacidad de cómputo, integración de datos y control avanzado. El PAC está diseñado para aplicaciones complejas, donde se combinan control lógico, control analógico, algoritmos PID, movimiento, procesamiento de datos y conectividad con sistemas de nivel superior.

La diferencia principal entre un PLC y un PAC no radica únicamente en el hardware, sino en su arquitectura de software y capacidad de integración. Los PAC ofrecen entornos de desarrollo unificados, una base de datos centralizada de variables y soporte nativo para estándares abiertos como Ethernet, OPC, TCP/IP y SQL. Esto permite modelar procesos completos, manejar grandes volúmenes de información y ejecutar algoritmos avanzados sin depender de computadoras externas. Debido a estas características, los PAC son clave para aplicaciones modernas y para la implementación de conceptos asociados a la industria 4.0, mientras que los PLC continúan siendo la opción preferida en aplicaciones simples por su economía y facilidad de implementación [8]. La Figura 3 muestra un controlador PAC de Opto 22.



Figura 3. Controlador SNAP-PAC-S1 de Opto22.

3 Control en sistemas reales

En la teoría clásica de control, los sistemas suelen modelarse bajo condiciones ideales: sensores perfectos, actuadores sin retardos, señales libres de ruido y modelos matemáticos sin errores. Sin embargo, en aplicaciones reales, incluso en sistemas pequeños o de laboratorio estas condiciones rara vez se cumplen. El control automático debe enfrentarse a mediciones incompletas, señales alteradas, retardos de comunicación y limitaciones físicas de los actuadores. Por esta razón, el diseño del control no puede separarse del sistema de adquisición de datos que lo alimenta.

Controlar un proceso implica tomar decisiones basadas en datos. Si dichos datos no representan fielmente el estado

del sistema físico, el controlador actuará sobre una versión distorsionada de la realidad. En este contexto, la calidad de la medición resulta tan importante como el algoritmo de control empleado. Un controlador simple, correctamente alimentado con información confiable, suele ofrecer mejores resultados que un algoritmo sofisticado operando sobre señales ruidosas o mal acondicionadas.

3.1 Teoría de control

Desde un punto de vista práctico, la teoría de control es la ciencia de manipular las entradas de un sistema con el objetivo de lograr que su salida siga un valor de referencia deseado, incluso cuando existan perturbaciones externas o incertidumbre [9]. Para esto, se hace uso de un controlador, en conjunto con otros elementos que conforman un sistema de control.

En la Figura 4 se observan un lazo de control y las partes que lo conforman.

- **Planta.** Es el sistema en sí, lo que se quiere controlar: un motor, un reactor químico, un sistema de calefacción, etc.
- **Variable de proceso o salida $y(t)$.** La variable del sistema que se mide y controla: temperatura, velocidad, nivel, etc.
- **Punto de ajuste o setpoint $r(t)$.** El valor deseado para la variable de proceso.
- **Error $e(t)$ y señal de control $u(t)$.** El error es la diferencia entre la variable de proceso y el punto de ajuste: $e(t) = r(t) - y(t)$. La señal de control es una función calculada a partir del error: $u(t) = f(e(t))$.
- **Actuador.** Recibe la señal de control para actuar sobre la variable de proceso o de salida (ej. una válvula, un motor eléctrico, un calentador).
- **Sensor.** Dispositivo que mide la variable de proceso y envía la información de vuelta al controlador [10].

3.2 Lazo abierto y lazo cerrado en la práctica

Según la presencia o no de realimentación, los sistemas de control pueden operar en lazo abierto o lazo cerrado. En un sistema de control en lazo abierto, la acción de control se aplica sin considerar la respuesta real del proceso. Este enfoque es común en aplicaciones simples donde el comportamiento del sistema es altamente predecible o donde las perturbaciones son despreciables, algunos ejemplos de lazo abierto son el ciclo de una lavadora, un horno con temporizador, o una tostadora; todos estos elementos siguen un proceso sin saber si se logró o no el resultado deseado. En entornos reales, la variabilidad del proceso y la presencia de perturbaciones hacen que el lazo abierto sea insuficiente para garantizar precisión y estabilidad. El control en lazo cerrado introduce retroalimentación, utilizando la señal medida por los sensores para corregir continuamente la acción de control y obtener una salida precisa y predefinida.

3.3 El control en lazo cerrado

En un sistema de control de lazo cerrado, la variable de salida se retroalimenta al sistema mediante sensores. El controlador utiliza esta información para calcular el ajuste necesario en la señal de control, con el objetivo de que la variable de salida se

aproxime al valor de referencia (setpoint). Para lograr este ajuste, existen tres tipos de acciones de control: proporcional (P), integral (I) y derivativo (D).

Acción proporcional (P). Ajusta la salida del sistema de manera proporcional al error, lo que permite obtener respuestas inmediatas y una corrección rápida del sistema. Sin embargo, deja un error en estado estacionario, o puede generar oscilaciones en el sistema si se ajusta con una ganancia (P) muy alta.

Acción integral (I). Acumula el error a lo largo del tiempo, lo que ayuda a eliminar el error permanente de la acción proporcional. Aunque esto mejora la precisión en régimen estacionario, puede generar una respuesta más lenta o en algunos casos generar oscilaciones o inestabilidad.

Acción derivativa (D). Se enfoca en la velocidad de cambio del error, anticipando cómo cambiará el error en el futuro. Esto mejora la estabilidad y el amortiguamiento del sistema, evitando picos y oscilaciones.

Estas acciones de control deben implementarse cuidadosamente según el comportamiento del sistema y los objetivos del control. La selección y ajuste de los términos proporcional, integral y derivativo dependen de las características propias de cada proceso, como su dinámica, estabilidad y sensibilidad a

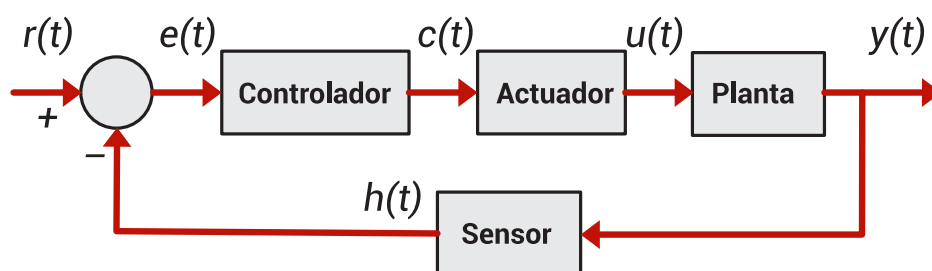


Figura 4. Diagrama de control de lazo cerrado.

perturbaciones. Es fundamental analizar cada proceso para determinar la combinación y sintonización de las ganancias P, I y D más adecuada del controlador.

4 Acondicionamiento de la señal, el puente entre sensores, actuadores y controlador

El acondicionamiento de señal constituye una etapa fundamental en cualquier sistema de medición y control, ya que actúa como el puente entre las variables físicas del proceso y los sistemas electrónicos que las interpretan. A través de técnicas como amplificación, filtrado, aislamiento y adaptación de niveles, se garantiza que las señales provenientes de sensores sean precisas, estables y compatibles con los dispositivos de adquisición y control, permitiendo así que las decisiones automáticas se basen en información confiable y representativa del proceso real.

4.1 La naturaleza de la señal

En sistemas reales, sensores y actuadores no son elementos ideales. En el mundo físico, la señal nace en presencia de ruido, con retardos, errores de medición y limitaciones mecánicas. Por esta razón, el diseño de sistemas de adquisición y control no debe centrarse únicamente en el controlador, sino en comprender cómo se genera la información y cómo se ejecuta la acción final. La calidad del dato y la capacidad del actuador son, en muchos casos, más determinantes que la sofisticación del algoritmo de control.

Cada magnitud medida por un sensor (temperatura, presión, concentración de

gas, caudal) proviene de un dominio físico continuo, inherentemente imperfecto y ruidoso. La medición obtenida lleva asociada una incertidumbre, cuya magnitud depende tanto de la naturaleza del fenómeno físico como del principio de funcionamiento del sensor. Por ejemplo, en un sensor de presión basado en el fenómeno piezoeléctrico, la presión aplicada genera una deformación mecánica en un material piezoeléctrico, la cual se traduce en una señal eléctrica proporcional. Sin embargo, esta conversión no es ideal: factores como el ruido ambiental, la histéresis del material, la sensibilidad a la temperatura (y magnitudes de influencia en general), la vida útil del sensor y las tolerancias de fabricación introducen desviaciones respecto al valor real de la presión. Como resultado, la señal obtenida es una representación eléctrica que se estima de la magnitud física real [11].

Por otra parte, debido al principio de funcionamiento de los sensores o a la naturaleza de las magnitudes físicas, se obtienen señales que resultan incompatibles con los sistemas electrónicos de adquisición de datos. Por ejemplo, las señales eléctricas producidas por el corazón en el cuerpo humano se encuentran en el orden de los milivoltios o microvoltios; un sensor para la detección de gases inflamables, basado en reacciones electroquímicas, genera corrientes del orden de nano o microamperios; o un sensor cuya salida varía su resistencia en función de la temperatura cuya respuesta es no lineal [12]. A continuación se presentan algunas técnicas utilizadas cuando se trabaja con este tipo de señales.

4.1.1 Amplificación

La amplificación de una señal tiene como objetivo aumentar la amplitud (potencia) de una señal eléctrica débil, conservando

su información. Esto se logra mediante configuraciones de amplificadores operacionales que pueden entregar una ganancia controlada. El objetivo no es solo elevar el nivel de la señal, sino hacerlo con bajo ruido añadido, conservando su linealidad, su ancho de banda y su forma de onda para su posterior digitalización y procesamiento [1].

4.1.2 Adaptación de niveles

Según el controlador utilizado, puede ser necesario ajustar el nivel de salida del sensor, ya que no todos los dispositivos electrónicos trabajan con los mismos rangos de tensión. Cuando estos niveles no coinciden, el controlador puede interpretar mal la señal o incluso verse afectado en su funcionamiento. Por ejemplo, para un transmisor de presión con una salida de 0-10 V que se conecte a un microcontrolador cuyos niveles de tensión suelen de 3.3 V o 5 V, es necesario primero adaptar la señal de salida mediante el uso de divisores resistivos o amplificadores operacionales atenuadores.

4.1.3 Conversión resistencia-tensión

Muchos sensores no entregan directamente una tensión "lista para usar", sino que responden variando su resistencia o generando una pequeña corriente. En estos casos, el primer paso es convertir esa magnitud en una señal de tensión proporcional y estable. Por ejemplo, una resistencia variable puede transformarse en una tensión mediante un divisor de voltaje o un puente de Wheatstone [13].

4.2 Ruido eléctrico, enemigo permanente

En sistemas industriales reales, la medición nunca ocurre en condiciones

ideales. A diferencia del laboratorio o del modelo matemático, la señal que llega al sistema de control está inmersa en un entorno electromagnéticamente hostil. En este contexto, el ruido eléctrico no debe considerarse una anomalía ocasional, sino una condición permanente de operación.

La principal fuente de ruido es la interferencia electromagnética (EMI), producido generalmente por motores eléctricos de gran potencia, variadores de frecuencia, líneas de potencia cercanas, estaciones de radio/TV. Estas fuentes generan campos eléctricos y magnéticos variables que se acoplan a los circuitos de medición por conducción, inducción o radiación. Como resultado, la señal adquirida por sensores y sistemas de instrumentación rara vez representa de forma pura la magnitud física de interés [13].

Estas perturbaciones a la señal no son inofensivas, y no solo afectan la precisión de la medición, sino el comportamiento general en un lazo de control, que pueden terminar en alarmas falsas, paradas imprevistas y la no confiabilidad en los datos adquiridos y del proceso en general, que a largo plazo significa menos productividad y más gastos de operación y mantenimiento.

Para mitigar estos efectos, es fundamental diseñar el sistema pensando en el ruido: usar cables apantallados o pares trenzados, rutas separadas de líneas de potencia y una correcta conexión a tierra minimiza el acoplamiento electromagnético. Además, adaptar la señal, mediante filtrado, amplificación o conversión a señales robustas como 4-20 mA, aumenta la inmunidad frente al entorno industrial. Por el lado de software, técnicas de filtrado digital y promediado de lecturas en el controlador ayudan a distinguir la señal real de la interferencia.

Otra forma de mitigar el ruido eléctrico es aterrizando correctamente los equipos.

Las señales eléctricas se miden respecto a un potencial de referencia, normalmente la tierra. Cuando distintos gabinetes, sensores o controladores utilizan referencias de tierra que no son equipotenciales, surgen corrientes de bucle de tierra que fluyen por los conductores de referencia. Estas corrientes inducen diferencias de tensión adicionales en las entradas de los sistemas de adquisición, que se suman a la señal útil y pueden generar errores sistemáticos, fluctuaciones o lecturas erróneas [13, 14].

4.3 De analógico a digital

La mayoría de controladores modernos incluyen módulos de conversión analógica, los cuales incorporan un conversor analógico-digital (ADC por sus siglas en inglés), además de integrar varias otras etapas de adaptación mencionadas previamente: filtrado, amplificación, atenuación. Algunos conceptos clave para tener en cuenta al digitalizar una señal utilizando un ADC son:

Resolución. La resolución de un ADC indica el número de niveles discretos en los que puede dividirse el rango dinámico de la señal analógica de entrada. Un ADC de 16 bits puede representar $2^n = 65\,536$ niveles distintos, lo que permite una cuantificación muy fina de la señal [13].

El paso de cuantificación o valor del bit menos significativo o LSB, se define como la mínima variación de voltaje que el ADC puede distinguir y se calcula como:

$$\text{LSB} = \frac{V_{\text{refmax}} - V_{\text{refmin}}}{2^n - 1}$$

Donde V_{refmax} y V_{refmin} representan los límites de entrada de la señal analógica y n es el

número de bits del ADC. Cuanto mayor sea el LSB, menor será el error de cuantificación introducido por el ADC.

Muestreo. El muestreo determina con qué frecuencia se toma la señal analógica. Si la frecuencia de muestreo es demasiado baja en comparación con las variaciones de la señal, el ADC no captará todos los eventos, y pueden aparecer errores conocidos como aliasing, donde la señal digital resultante no representa fielmente la forma de onda real. Una referencia sólida para definir la tasa de muestreo es el teorema de Nyquist, el cual establece que la frecuencia de muestreo debe ser al menos dos veces la frecuencia máxima de la señal [15].

Saturación. La saturación ocurre cuando la señal analógica excede el rango máximo que el ADC puede medir. Por encima de este valor, el ADC mostrará siempre el máximo permitido, conllevando a la pérdida de información.

4.4 Estándares y protocolos de comunicación

Con la señal digitalizada, está lista para ir hacia el controlador y para ello utilizan interfaces y protocolos de comunicación serial. Algunas de las más populares actualmente son I²C, UART, RS-232 y RS-485. La interfaz define cómo se transmiten los bits a nivel eléctrico: niveles de tensión, tipo de señal, número de conductores y topología de conexión. El protocolo, en cambio, define el significado de esos bits: quién inicia la comunicación, cómo se estructura un mensaje, cómo se detectan errores y cómo se interpretan los datos. Dos dispositivos pueden compartir la misma interfaz física y aun así no entenderse si no utilizan el mismo protocolo de comunicación [14].

SPI, I²C y UART son interfaces de corto alcance comúnmente utilizadas en microcontroladores y módulos, incluyendo

sensores, placas de adquisición de datos y sistemas embebidos. La interfaz SPI se destaca por su alta velocidad y simplicidad, aunque requiere cuatro líneas de conexión para su funcionamiento. Por otro lado, I²C utiliza únicamente dos líneas, lo que lo hace más eficiente en términos de cables. Ambos protocolos operan bajo una arquitectura maestro-esclavo, lo que permite la conexión de múltiples dispositivos a través de la misma línea de comunicación [16].

Aunque estas interfaces son muy populares en el desarrollo electrónico, su uso en entornos industriales suele limitarse a distancias cortas y ambientes controlados. El ruido eléctrico, las diferencias de potencial de tierra y las largas distancias de cableado hacen que no siempre sean adecuadas para comunicación directa en planta.

Interfaces como RS-232 representan una generación anterior de comunicación serial, pero aún se encuentran presentes en numerosos equipos industriales. Su principal fortaleza es la simplicidad: comunicación punto a punto, fácil de implementar y ampliamente soportada. Sin embargo, sus limitaciones en distancia, en inmunidad al ruido y en capacidad de expansión han hecho que su uso se restrinja principalmente a configuración, mantenimiento y equipos heredados [14].

En contraste, RS-485 es una de las interfaces más utilizadas en el campo industrial. Diseñada para entornos ruidosos y largas distancias, permite la conexión de múltiples dispositivos sobre un mismo bus y ofrece una alta inmunidad a interferencias electromagnéticas. Más que una solución elegante, RS-485 es una solución robusta, capaz de operar de forma confiable en condiciones donde otras interfaces fallan. Por esta razón, sirve como base física para numerosos protocolos industriales ampliamente

adoptados.

Sobre estas interfaces físicas se implementan protocolos de comunicación que permiten organizar el intercambio de información de manera estructurada. Protocolos como Modbus, entre otros, definen cómo se solicitan datos, cómo se responden las peticiones y cómo se gestionan los errores. La correcta selección y configuración del protocolo es tan importante como la elección de la interfaz, ya que de ello depende la interoperabilidad entre dispositivos de distintos fabricantes.

5 Mecanismos de seguridad en sistemas de control

En un sistema de control es fundamental considerar mecanismos y estrategias que garanticen un comportamiento seguro y/o aumenten la confiabilidad de los procesos, para que este sea más estable y predecible ante fallos, perturbaciones o condiciones anormales. Estos elementos forman parte del diseño del control y complementan la lógica de operación normal del sistema.

5.1 Interlocks

Los interlocks son restricciones lógicas que impiden la ejecución de una acción cuando no se cumplen ciertas condiciones de seguridad u operación. Su objetivo es evitar que el sistema alcance estados potencialmente peligrosos para las personas, los equipos o el proceso. A diferencia de la lógica normal de control, los interlocks no buscan optimizar el funcionamiento, sino limitarlo cuando es necesario.

Ejemplos comunes incluyen impedir el arranque de un equipo si una variable

crítica se encuentra fuera de rango, bloquear la apertura de una válvula cuando la presión supera un umbral seguro, o evitar la activación de un actuador si se detecta un fallo de sensor. Como buena práctica, los interlocks deben ser simples, claramente documentados y tener prioridad sobre cualquier lógica de operación automática.

5.2 Deadbands

En sistemas reales, las señales medidas siempre presentan ruido, fluctuaciones y pequeñas variaciones. Las deadbands, o bandas muertas, se utilizan para evitar que estas variaciones provoquen conmutaciones constantes en actuadores o cambios innecesarios en el estado del sistema.

Una deadband define un rango alrededor de un valor de referencia dentro del cual no se ejecuta ninguna acción de control. Este enfoque es especialmente útil en controles ON/OFF, alarmas y sistemas donde el desgaste mecánico o eléctrico es un factor relevante. Lejos de ser una pérdida de precisión, el uso adecuado de deadbands mejora la estabilidad del sistema y prolonga la vida útil de los equipos.

5.3 Watchdogs y temporizadores de vigilancia

Los watchdogs y temporizadores de vigilancia, son mecanismos diseñados para detectar fallos en la ejecución del controlador. Su función es supervisar que el programa se esté ejecutando correctamente y dentro de los tiempos esperados. Si el sistema deja de responder o entra en un estado de bloqueo, el watchdog actúa; si una válvula no se acciona o un transmisor no detecta cambios en X segundos, el temporizador de vigilancia dispara una alerta.

Estos mecanismos pueden reiniciar el controlador, generar una alarma o forzar la transición a un estado seguro. En aplicaciones industriales, los watchdogs son fundamentales para detectar fallos que no son evidentes a nivel de proceso, como errores de software o cuelgues del sistema operativo del controlador.

5.4 Estados seguros (Fail-safe)

El concepto de estado seguro se refiere a la condición en la que el sistema debe quedar cuando ocurre un fallo. En lugar de intentar mantener la operación a toda costa, el diseño de estado seguro busca que el proceso adopte el estado más seguro posible ante la pérdida de energía, fallos de comunicación o errores internos.

Ejemplos típicos incluyen válvulas que se cierran automáticamente al perder alimentación, salidas que pasan a un estado definido ante fallos del controlador, o sistemas que detienen el proceso de manera controlada. Definir correctamente el estado seguro es una de las decisiones más importantes en el diseño de un sistema de control.

5.5 Redundancia en controladores y sensores

La redundancia se emplea cuando la confiabilidad del sistema es crítica y un único punto de fallo resulta inaceptable. Consiste en utilizar múltiples sensores, controladores o canales de medición para supervisar una misma variable o función.

La comparación entre señales redundantes permite detectar inconsistencias, fallos de hardware o degradación de sensores. No obstante, la redundancia también incrementa la complejidad del sistema, por lo que debe aplicarse de forma justificada y planificada. En muchos casos, una redundancia bien diseñada mejora

significativamente la seguridad y disponibilidad del proceso.

5.6 Validación de señales y variables de entrada

La validación y verificación de la plausibilidad consiste en comprobar que la información utilizada por el sistema de control, tanto las señales medidas provenientes de sensores como las variables de entrada de configuración y operación, sean coherente y físicamente posible. Antes de ser empleadas por la lógica de control, las variables de proceso, los setpoints, los límites de operación, las banderas lógicas y otros parámetros deben evaluarse para asegurar que se encuentren dentro de rangos permitidos, y que correspondan al modo de operación activo. Este tipo de validación permite detectar fallos como sensores dañados, errores de adquisición, valores mal configurados o comandos inconsistentes, evitando que el sistema tome decisiones basadas en información incorrecta.

5.7 Gestión de errores y alarmas

La gestión adecuada de errores y alarmas es esencial para que el operador pueda comprender el estado real del sistema y actuar de forma oportuna. Un sistema con demasiadas alarmas pierde efectividad, mientras que uno con pocas puede ocultar condiciones peligrosas.

Es importante diferenciar entre advertencias, alarmas y fallos críticos, así como asignar prioridades en función del riesgo asociado. Las alarmas deben ser claras, accionables y relevantes para la operación. Una buena gestión de alarmas no solo mejora la seguridad, sino que también reduce la carga cognitiva del operador y facilita el mantenimiento del sistema.

6 Conclusiones

A partir de lo anterior se concluye que el desempeño de un sistema de control no depende únicamente del algoritmo implementado, sino de la calidad con la que se mide, acondiciona, transmite y procesa la información proveniente del mundo físico. Sensores, actuadores y controladores deben entenderse como un conjunto integrado, donde una decisión de diseño deficiente en cualquiera de sus partes impacta directamente el funcionamiento del sistema completo.

La naturaleza no ideal de las señales reales obliga a considerar el acondicionamiento de señal como una etapa fundamental y no como un elemento accesorio. El uso de técnicas como la amplificación, adaptación de niveles, filtrado y conversión adecuada entre dominios físicos y eléctricos son determinantes para garantizar mediciones representativas y estables, especialmente cuando se emplean sistemas de control en lazo cerrado.

La selección de controladores industriales debe responder a las necesidades reales del proceso, considerando no solo la complejidad del control, sino también la capacidad de integración, la escalabilidad y la robustez frente a los entornos industriales. De igual manera, la correcta elección de interfaces y protocolos de comunicación es clave para asegurar interoperabilidad, confiabilidad y mantenimiento a largo plazo.

Por último, la implementación de buenas prácticas de programación y seguridad es fundamental para minimizar riesgos operativos y garantizar un funcionamiento seguro y continuo. En conjunto, estos elementos permiten diseñar sistemas de adquisición y control más robustos, confiables y alineados con las exigencias reales de la automatización moderna.

Referencias

- [1] Pallás Areny, R. (1993). Adquisición y distribución de señales (1 ed.), Marcombo S.A., Barcelona.
- [2] de Silva, C. W. (2007). Sensors and actuators: Engineering system instrumentation (1 ed.), CRC Press, Boca Raton FL.
- [3] Lamb, F. (2013). Industrial automation: Hands-on (1 ed.), McGraw-Hill Education, New York.
- [4] Maverick Machine & Fabrication. Hydraulic actuators 101 – What is a hydraulic actuator?, s.f. Disponible en: <https://www.maverickmachine.ca/news/hydraulic-actuators-101/>
- [5] Gutiérrez, M. y Iturralde, S. (2017). Fundamentos básicos de instrumentación y control – Serie de textos académicos de la facultad de ciencias de la ingeniería (1 ed.), Editorial UPSE, Quito.
- [6] Mazur, D. C., Stewart, B. G., Clark, H. E. y Paes, R. (2019). Analysis of PLC vs. DCS in industrial petrochemical applications. IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (PCIC), 93–102. <https://doi.org/10.1109/PCIC30934.2019.9074522>
- [7] Walker, M., Bissell, C. y Monk, J. (2010). The PLC: A logical development. Measurement and Control, 43(9): 280–284. <https://doi.org/10.1177/002029401004300904>
- [8] Bell, I. (2005). The future of control [programable automation controllers]. Manufacturing Engineer, 84(4): 36–39. <https://doi.org/10.1049/me:20050406>
- [9] Levine, W. S. (2010). The control handbook (2 ed.), CRC Press, Boca Raton FL.
- [10] Vásquez Salazar, R. D. (2013). Teoría del Control (1 ed.), Editorial ITM, Medellín.
- [11] Sáez Ruiz, S. J. y Font Ávila, L. (2001). Incertidumbre de la medición: teoría y práctica (1 ed.), L&S Consultores C.A., Maracay.
- [12] Potter, D. y Eren, H. (2018). Digital techniques and data handling - Data acquisition fundamentals. En: Lipták, B. G. y Eren, H., Process software and digital networks - Volume III (4 ed.), CRC Press, Boca Raton FL.
- [13] Measurement Computing Corporation. (2012). Signal conditioning & PC-based data acquisition handbook (3 ed.), Measurement Computing Corporation, Estados Unidos.
- [14] Keithley Instruments. (2001). Data acquisition and control handbook (1 ed.), Keithley Instruments, Cleveland OH.
- [15] Chicala, C. Adquisición de datos: medir para conocer y controlar – Handbook de adquisición de datos (1 ed.), México D. F.
- [16] Chen, J. y Huang, S. (2023). Analysis and comparison of UART, SPI and I2C. 2023 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA), 272–276. <https://doi.org/10.1109/EEBDA56825.2023.10090677>



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 másico	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.

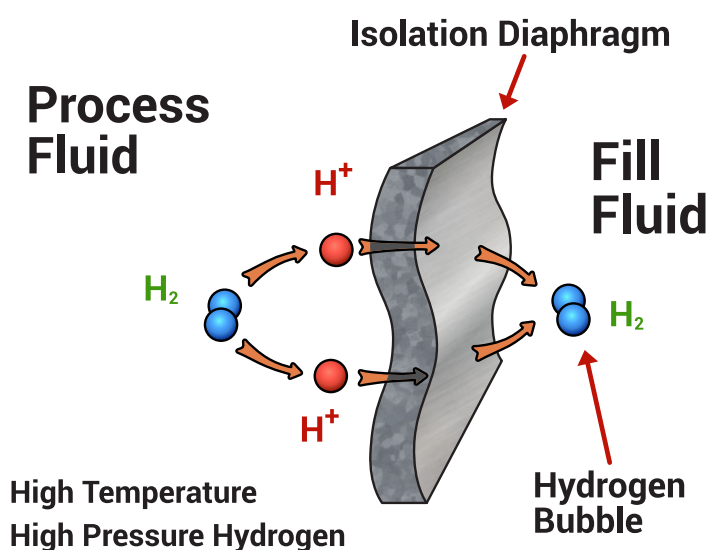


Figura 1. Permeación del hidrógeno a través del acero. Tomada de [6].

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,

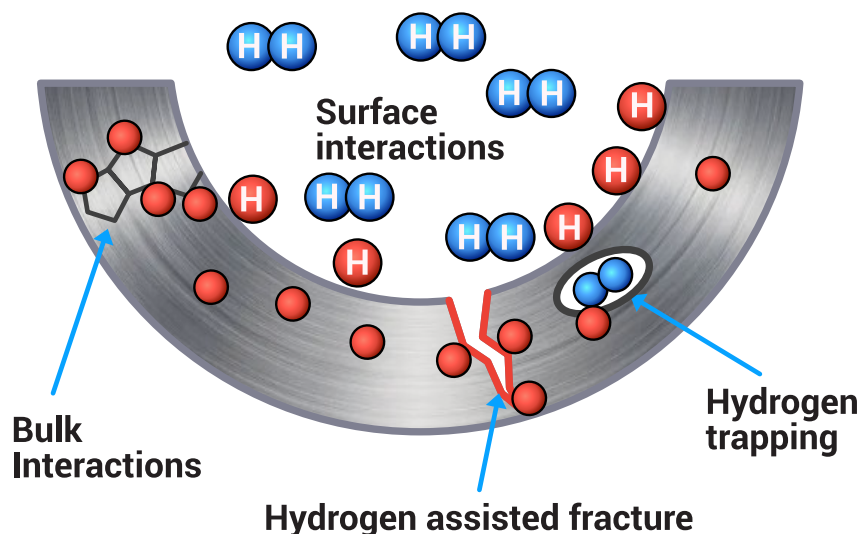


Figura 2. Fragilización por hidrógeno en el acero. Tomada de [7].

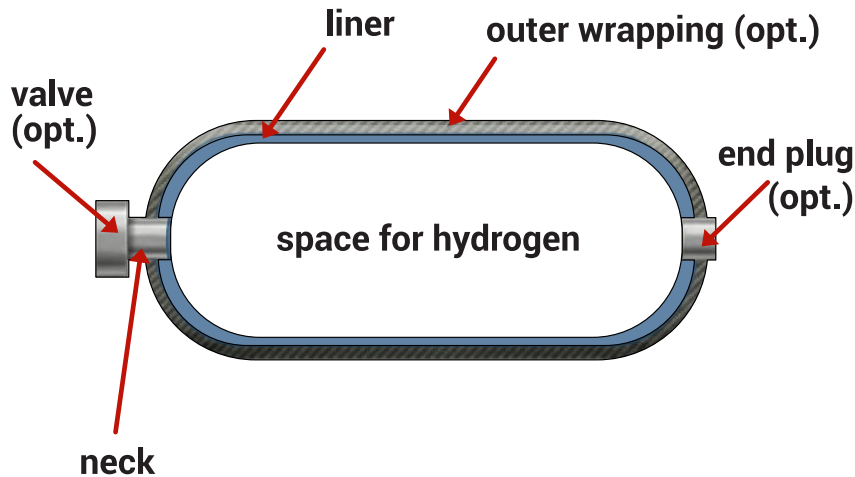


Figura 3. Componentes del cilindro para hidrógeno. Tomada de [12].

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

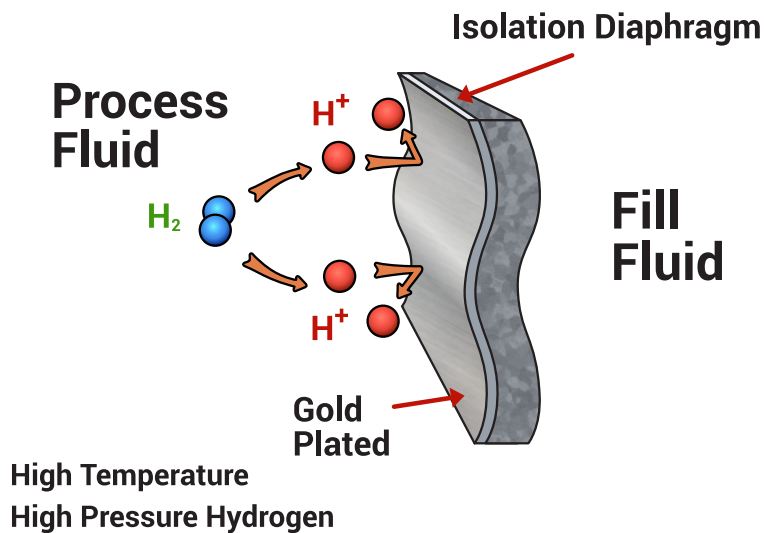


Figura 4. Función del liner contra la permeabilidad. Tomada de [6].

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

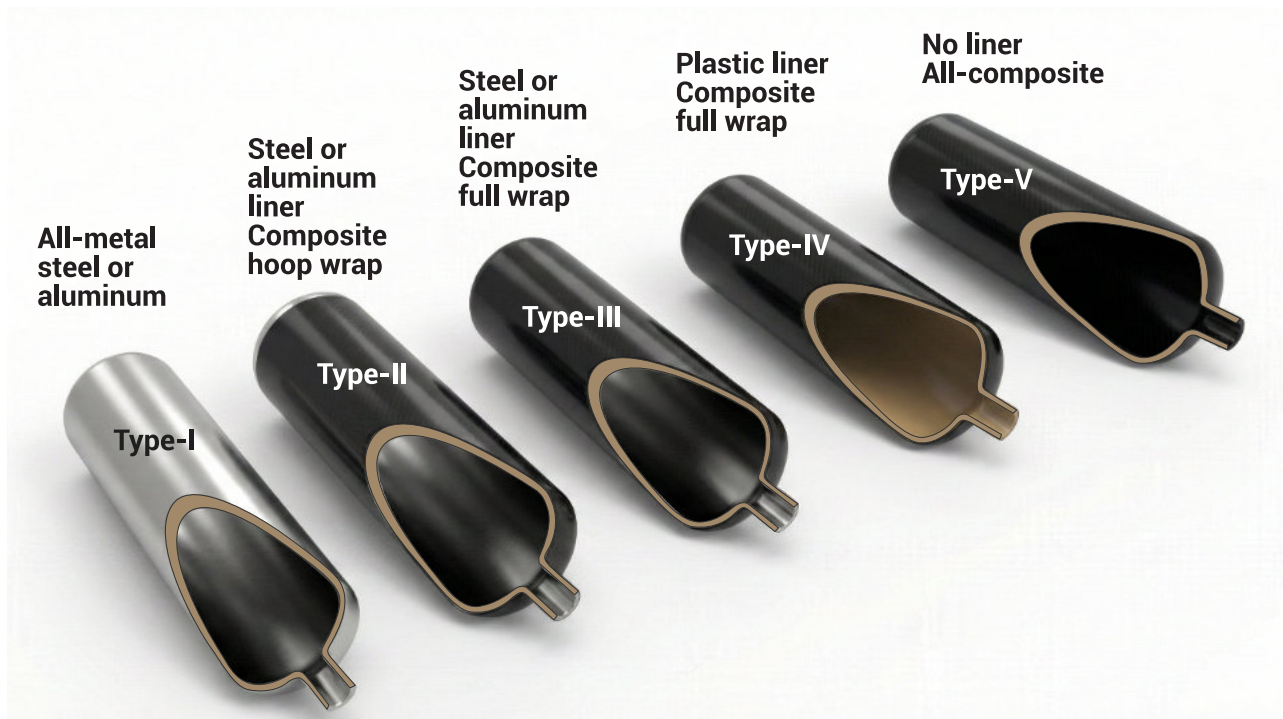


Figura 5. Tipos de cilindros para hidrógeno. Tomada de [12].

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.

