

**DESARROLLO DE UN MODELO TÉRMO-HIDRÁULICO Y KPIS PARA EL BANCO
EXPERIMENTAL DE ENSAYOS CON MEZCLAS DE HIDRÓGENO Y GAS NATURAL**

VINICIUS ANGARITA VALENCIA



**PRÁCTICA PRESENTADA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2025

**DESARROLLO DE UN MODELO TÉRMO-HIDRÁULICO Y KPIS PARA EL BANCO
EXPERIMENTAL DE ENSAYOS CON MEZCLAS DE HIDRÓGENO Y GAS NATURAL**

VINICIUS ANGARITA VALENCIA

**PRÁCTICA PRESENTADA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

DIRECTOR

Ing. JUAN CARLOS RAMÍREZ BELTRÁN

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2025

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
I. GENERALIDADES	13
A. Nombre de la empresa	13
B. Diagnóstico de la empresa	14
C. Alcance	15
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
A. Antecedentes.....	16
III. JUSTIFICACIÓN.....	20
IV. OBJETIVOS	21
A. Objetivo general.....	21
B. Objetivos específicos	21
V. MARCO REFERENCIAL	22
A. Marco teórico.....	22
B. Marco conceptual.....	23
C. Marco legal	29
VI. METODOLOGÍA	35
A. Tipo de investigación.....	35
B. Enfoque metodológico	35
C. Población	35
D. Diseño Metodológico.....	35
1) Enfoque del Estudio	35
2) Objetivos de la Metodología	35
E. Fase 1: Análisis de Información Previa	36
1) Recolección de Información	36
2) Revisión de Literatura.....	36
F. Fase 2: Diseño y Desarrollo del Modelo Térmico.....	36
1) Selección de Herramientas y Configuración del Software	36
2) Creación del Modelo.....	37
3) Ejecución de Simulaciones Preliminares.....	37

G. Fase 3. Establecimiento de KPIs y Métricas de Desempeño.....	37
1) Definición de KPIs.....	37
2) Búsqueda de KPIs Adicionales:.....	37
3) Planteamiento de Métricas y Documentación.....	37
H. Fase 4: Ejecución del Modelo y Análisis de Resultados	37
1) Simulación Completa de los Escenarios de Mezcla.....	37
2) Análisis Comparativo.....	37
3) Generación de Reportes y Recomendaciones	38
I. Fase 5. Validación y Optimización.....	38
1) Validación de Resultados.....	38
2) Propuestas de Optimización.....	38
3) Presentación Final:.....	38
J. Actividades por desarrollar.....	38
1) Análisis de Información Previa.....	38
2) Revisión de Literatura.....	38
3) Elaboración del Modelo Térmico	39
4) Análisis de Resultados	39
K. Establecimiento y Evaluación de KPIs.....	39
1) Establecer KPIs específicos	39
VII. RESULTADOS	40
A. Procedimiento de Operación del Sistema de Suministro de Gas para Autoclaves.....	42
B. Costos Directos	52
1) Materia Prima e Insumos	52
2) Equipamiento y Mantenimiento.....	53
3) Mano de Obra Directa.....	53
4) Consumo de Energía y Recursos	53
5) Manejo de Residuos y Desechos.....	53
C. Costos Indirectos.....	54
1) Gastos Administrativos.....	54
2) Infraestructura y Servicios Generales	54
3) Control de Calidad y Certificaciones	54

4) Logística y Transporte	55
5) Innovación y Desarrollo.....	55
6) Cumplimiento Legal y Regulatorio.....	55
D. Resultados de los Cálculos de Masa de Gas para el Llenado del Sistema de Tubing y Autoclaves	55
1) Resultados de los Cálculos de las Autoclaves	57
2) Resultados de Pérdidas de Presión en Líneas de Purga con Nitrógeno y Líneas de Autoclaves con Metano e Hidrógeno.....	61
3) Resultados software DWSIM.....	69
VIII. CONCLUSIONES	80
IX. RECOMENDACIONES	83
REFERENCIAS	85

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Formas de producir hidrogeno, [5]	23
Fig. 2. Ventajas y desventajas del blending.	26
Fig. 3. Plano P&ND.	41
Fig. 4. Ruta del N ₂ durante la purga del gas natural.....	43
Fig. 5. Ruta del N ₂ durante la purga del hidrogeno	44
Fig. 6. Ruta del N ₂ durante la purga del sistema de llenado cilindro de mezcla	45
Fig. 7. Ruta del H ₂ durante el llenado	46
Fig. 8. Ruta del CH ₄ durante el llenado.....	48
Fig. 9. Ruta de vaciado de autoclave mezcla	49
Fig. 10, Datos iniciales.....	56
Fig. 11. Resultados cálculos de tubing.....	57
Fig. 12. Resultados cálculos de moles en las autoclaves.	58
Fig. 13. Resultados cálculos de gramos en las autoclaves 0,002 m3.	58
Fig. 14. Resultados cálculos de gramos en las autoclaves 0,003m3.	58
Fig. 15. Resultados cálculos de gramos en las autoclaves.	58
Fig. 16. Gramos de gas en los cilindros.	59
Fig. 17. Variacion de la masa de mezcla en funcion de la proporcion H ₂ /CH ₄	60
Fig. 18. Datos de entrada línea de metano.	63
Fig. 19. Calculos línea de metano.	63
Fig. 20. Masa en función de tiempo de cilindro de metano.	64
Fig. 21. Datos de entrada de línea de nitrógeno.	65
Fig. 22. Resultados línea nitrógeno.	65
Fig. 23. Masa en función de tiempo de cilindro de nitrógeno.....	66
Fig. 24. Datos de entrada línea de Hidrogeno.	67
Fig. 25. Resultados línea de Hidrogeno.	67
Fig. 26. Masa en función de tiempo de cilindro de hidrogen.....	68
Fig. 27. Diagrama de simulación DWSIM.....	70
Fig. 28. Datos de entrada de metano a 5×10^{-5} m ³ /s.	70
Fig. 29. Datos de entrada de hidrogeno a 5×10^{-5} m ³ /s.....	71

Fig. 30. Datos de entrada de metano a 5×10^{-6} m ³ /s.....	71
Fig. 31. Datos de entrada de hidrogeno a 5×10^{-6} m ³ /s.....	72
Fig. 32. Resultado del compresor a 5×10^{-5} m ³ /s.....	73
Fig. 33. Resultado del compresor a 5×10^{-6} m ³ /s.....	74
Fig. 34. Datos de salida monitor #3.	75
Fig. 35. Datos de salida monitor #7.	76
Fig. 36. KPIS.....	77
Fig. 37. Recomendación.....	84

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

API: American Petroleum Institute

ASTM: American Society for Testing and Materials

CH₄: Metano

CO₂: Dióxido de carbono

H₂: Hidrógeno

HCNG: Mezcla de hidrógeno y gas natural

ISO: International Organization for Standardization

KPI: Key Performance Indicator (Indicador Clave de Desempeño)

N₂: Nitrógeno

NO_x: Óxidos de nitrógeno

GLOSARIO

Blending: Proceso de mezcla de hidrógeno con gas natural para su transporte en infraestructuras existentes. Citado en [9].

Descarbonización: Proceso de reducción o eliminación de emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. Citado en [12].

Difusividad del hidrógeno: Velocidad a la que el hidrógeno se propaga a través de un material. Citado en [27].

Eficiencia adiabática: Relación entre el trabajo real y el trabajo ideal en un proceso de compresión sin transferencia de calor. Citado en resultados de simulación (DWSIM).

Fragilización por hidrógeno: Fenómeno en el que el hidrógeno reduce la ductilidad y resistencia de los metales. Citado en [6], [18].

Hidrógeno verde: Hidrógeno producido mediante electrólisis del agua usando energías renovables. Citado en [5].

KPIs (Indicadores Clave de Desempeño): Métricas para evaluar la eficiencia, seguridad y costos en sistemas de hidrógeno. Citado en [29], [30].

Permeabilidad: Capacidad de un material para permitir el paso del hidrógeno. Citado en [27].

Purga: Procedimiento para eliminar impurezas o gases residuales en tuberías usando nitrógeno. Citado en procedimientos operativos (NFPA 55).

Tubing: Tubería de acero inoxidable utilizada para transportar gases a alta presión. Citado en antecedentes del proyecto.



RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO EN ESPAÑOL

TITULO: DESARROLLO DE UN MODELO TÉRMO-HIDRÁULICO Y KPIS PARA EL BANCO EXPERIMENTAL DE ENSAYOS CON MEZCLAS DE HIDRÓGENO Y GAS NATURAL

AUTOR(ES): Vinicius Angarita Valencia

PROGRAMA: Pregrado – Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): Fernando Corzo Álvarez – Juan Carlos Ramírez Beltrán

RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo analizar el comportamiento térmico-hidráulico en un sistema de tuberías que transporta una mezcla de hidrógeno y gas natural, evaluando su desempeño y seguridad. En el contexto de la transición energética y el uso de combustibles sostenibles, este estudio analiza los efectos térmicos, propiedades de combustión y el impacto de la fragilización del metal por hidrógeno en las tuberías. El enfoque principal radica en evaluar indicadores clave de desempeño (KPIs, por sus siglas en inglés) como eficiencia térmica, emisiones de gases como CO₂ y NO_x, estabilidad de combustión, y costos operativos, optimizando así la viabilidad y sostenibilidad del uso del hidrógeno como vector energético.

El proyecto se estructura en etapas: primero, un análisis de información previa recoge propiedades térmicas, estudios previos, y datos clave de fragilización. Posteriormente, una revisión de literatura explora metodologías y normativas de seguridad relevantes (ISO/TR 15916 y ASME B31.12), proporcionando el marco para la elaboración del Modelo Térmico. Finalmente, se dan recomendaciones y se proponen indicadores clave de desempeño para la medición continua de estos sistemas.

Los resultados de esta investigación ofrecerán una base sólida para entender el comportamiento de sistemas mixtos de hidrógeno y gas natural, promoviendo prácticas seguras y eficientes en aplicaciones industriales. Este trabajo contribuirá a los sectores de energía y medio ambiente, ofreciendo una guía metodológica y datos experimentales para el uso del hidrógeno como recurso complementario en la reducción de emisiones y eficiencia energética.

PALABRAS CLAVE:

Palabras claves - Modelo térmico, Hidrógeno, Gas natural, Tuberías, Eficiencia térmica, Fragilización del metal, Indicadores Clave de Desempeño (KPIs), Estabilidad de combustión, Normativas de seguridad, Vector energético

Vº Bº DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO



GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DEVELOPMENT OF A THERMO-HYDRAULIC AND KPI MODEL FOR THE TEST BENCH WITH MIXTURES OF HYDROGEN AND NATURAL GAS

AUTHOR(S): Vinicius Angarita Valencia

FACULTY: Undergraduate - Mechanical Engineering

DIRECTOR: Fernando Corzo Álvarez – Juan Carlos Ramírez Beltrán

ABSTRACT

This project aims to analyze the thermo-hydraulic behavior in a pipeline system that carries a mixture of hydrogen and natural gas, evaluating its performance and safety. In the context of energy transition and sustainable fuel use, this study analyses thermal effects, combustion properties and the impact of hydrogen embrittlement on pipelines. The main focus is to evaluate Key Performance Indicators (KPIs) such as thermal efficiency, emissions of gases such as CO and NO_x, combustion stability, and operating costs, thus optimizing the feasibility and sustainability of using hydrogen as an energy vector.

The project is structured in stages: first, an analysis of Prior Information collects thermal properties, previous studies, and key data of fragilization. Subsequently, a literature review explores relevant safety methodologies and standards (ISO/TR 15916 and ASME B31.12), providing the framework for the development of the Thermal Model. Finally, recommendations are made and key performance indicators proposed for the continuous measurement of these systems.

The results of this research will provide a solid basis for understanding the behavior of mixed hydrogen and natural gas systems, promoting safe and efficient practices in industrial applications. This work will contribute to the energy and environment sectors, providing methodological guidance and experimental data for the use of hydrogen as a complementary resource in emission reduction and energy efficiency.

KEYWORDS:

Keywords - Thermal model, Hydrogen, Natural gas, Pipelines, Thermal efficiency, Metal embrittlement, Key performance indicators (KPIs), Combustion stability, Safety regulations, Energy vector

Vº Bº DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

La transición hacia energías limpias y sostenibles ha posicionado al hidrógeno como un vector energético clave en la descarbonización de sectores industriales y de transporte. Sin embargo, su implementación a gran escala enfrenta desafíos técnicos significativos, particularmente en lo relativo a su almacenamiento, transporte y compatibilidad con la infraestructura existente de gas natural.

Entre los principales obstáculos destacan la fragilización por hidrógeno -fenómeno que compromete la integridad de materiales metálicos- y la necesidad de evaluar el comportamiento termo-hidráulico de mezclas de hidrógeno y gas natural (HCNG) en sistemas de distribución. Este proyecto, desarrollado en colaboración con la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC), aborda estos retos mediante el desarrollo de un modelo térmico-hidráulico y la definición de Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) para un banco experimental de pruebas con mezclas HCNG((Hydrogen Compressed Natural Gas).

La investigación combina enfoques experimentales y simulativos para analizar procesos críticos como carga, descarga y venteo bajo normativas internacionales, evaluando pérdidas de presión, estabilidad de combustión y riesgos asociados a la fragilización de materiales. Utilizando herramientas como DWSIM para análisis termodinámicos y pruebas en autoclaves con diferentes proporciones de HCNG, el estudio establece métricas para monitorear rendimiento, costos operativos y cumplimiento ambiental en sistemas de transporte de hidrógeno.

Los resultados aportan datos esenciales para optimizar la adaptación de gasoductos existentes, reducir emisiones y promover prácticas seguras en la industria energética colombiana, alineándose con iniciativas como la Alianza para el Desarrollo de la Hidrogenación (ADPH+). El documento presenta un marco teórico robusto, metodologías validadas, resultados de simulaciones y cálculos detallados, junto con un glosario estandarizado que facilita la comprensión de términos técnicos y normativos, garantizando claridad y precisión en la comunicación de los avances logrados en esta investigación.

I. GENERALIDADES

A. Nombre de la empresa

Corporación para la investigación de la corrosión

El 1º de noviembre de 1994, después de seis meses de gestión con la industria petrolera, liderada por el Departamento Nacional de Planeación - DNP y COLCIENCIAS, se creó la Corporación para la Investigación de la Corrosión - C.I.C., orientada a brindar soluciones integrales y generar conocimiento alrededor del fenómeno de la corrosión. Particularmente, en la constitución jurídica de la C.I.C. participaron seis entidades, a saber, la Empresa Colombiana de Petróleos - ECOPETROL, Occidental de Colombia, BP Exploration Company (Colombia), Sika Andina, la Universidad Industrial de Santander - UIS y el Centro Internacional de Física - CIF, quienes son sus miembros Fundadores y, juntamente con el Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA, conforman su Consejo Directivo. El Departamento Nacional de Planeación - DNP y Minciencias son miembros invitados permanentes de este consejo directivo.

La Corporación para la Investigación de la Corrosión (C.I.C.) es un Centro de Desarrollo Tecnológico enmarcado en la Ley de Ciencia, Tecnología e Innovación dedicado a la prestación de servicios especializados, ejecución de proyectos y programas y desarrollo de productos tecnológicos para la gestión de corrosión e integridad, con el fin de ofrecer al sector productivo soluciones que contribuyan al fortalecimiento tecnológico, económico y sostenible del país.

Está organizada a partir de un Consejo Directivo del que hacen parte empresas del sector privado, entidades gubernamentales y la universidad. A lo largo de 18 años, la CIC ha planteado el reto de diseñar e implementar un plan de desarrollo diversificado en Unidades Estratégicas de Negocio (UEN), a través de diferentes Líneas Tecnológicas (LT) que se constituyen en el foco del desarrollo y gestión de conocimiento, permitiendo desarrollar Programas, Proyectos y Servicios Especializados relacionados con gestión en Corrosión e Integridad, para ofrecer al sector productivo soluciones alternativas que minimicen las pérdidas económica y mejoren sus posibilidades competitivas con un firme compromiso con la preservación del ambiente.

En la actualidad, la Corporación para la Investigación de la Corrosión (C.I.C.), cuenta con equipo de alto desempeño integrado por más de ciento diez (110) trabajadores con diferentes competencias interdisciplinarias y niveles de formación: Doctores, Másteres, Profesionales en Ingeniería, Ciencias Aplicadas, Ciencias económicas, Técnicos y Tecnólogos. La capacidad

interdisciplinaria que posee el equipo de trabajo, le ha permitido a la C.I.C. generar procesos de desarrollo y transferencia de tecnología hacia el sector productivo, acordes con las necesidades del país, como lo muestran los resultados de los trabajos desarrollados hasta la fecha.

El tutor del proyecto designado por la CIC es el ingeniero químico y físico FERNANDO CORZO ALVAREZ, jefe de la línea Tecnológica de Electroquímica.

La CIC se localiza en el Km. 2 Vía Refugio, Sede UIS, Guatiguará. Piedecuesta, Santander, Colombia. El número de teléfono es (57) (7) 655 0807 o (57) (7) 655 0809 y el Fax: (57) (7) 655 0808.

La mayor parte de la información contenida en este capítulo ha sido proporcionada por la página web de la corporación (Corporación para la investigación de la Corrosión, 2019).

Dirección: Parque Tecnológico UIS Guatiguará, km 2 vía Refugio.

B. Diagnóstico de la empresa

La Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC) es un centro de desarrollo tecnológico reconocido por Minciencias, con amplia experiencia en la evaluación de materiales y desarrollo de soluciones innovadoras para la industria energética y petroquímica. En línea con las tendencias globales hacia el uso de energías más limpias y sostenibles, CIC ha iniciado un proyecto orientado al análisis de la integridad estructural de tuberías originalmente diseñadas para transportar gas natural, pero reconvertidas para operar con mezclas de HCNG (mezclas de hidrógeno y gas natural).

La conversión de la infraestructura de transporte de gas natural para permitir la inyección de hidrógeno plantea importantes desafíos técnicos, especialmente en la gestión de la integridad de las tuberías. El hidrógeno puede inducir fenómenos como la fragilización de los materiales metálicos, afectando la durabilidad y seguridad del sistema. En este contexto, el presente proyecto a realizar en el marco de la pasantía en CIC tiene como objetivo desarrollar modelos térmicos del banco de pruebas, donde se simularán las condiciones operativas de estas tuberías para estudiar la interacción entre los gases, temperatura, presión y materiales.

Además, se plantea el establecimiento de indicadores clave de proceso (KPI) que permitirán medir y asegurar el desempeño del sistema en términos de eficiencia operativa y seguridad. Esto es fundamental para evaluar la viabilidad de esta transición y garantizar la operación segura de las tuberías en condiciones cambiantes de mezcla de gases y temperatura.

Este proyecto es fundamental para apoyar la transición hacia energías más limpias en Colombia, alineándose con la agenda nacional y los objetivos de sostenibilidad global. La investigación busca no solo mitigar los riesgos asociados a la fragilización por hidrógeno, sino también proporcionar datos valiosos que optimicen el proceso de conversión de la infraestructura ya existente. Adicionalmente, la implementación de un modelamiento térmico riguroso permitirá simular las condiciones críticas de operación, brindando una mayor comprensión de los fenómenos físicos involucrados.

C. Alcance

Investigación y desarrollo tecnológico experimental. El desarrollo de este modelo permitirá poner a prueba el sistema de simulación, el proceso de una manera segura antes de realizar los ensayos. El proyecto se enfoca en el análisis y simulación del comportamiento termo-hidráulico en el banco experimental de pruebas de hidrógeno, así como en la creación de indicadores clave de desempeño (KPIs) para evaluar la integridad en la transmisión de gas natural a mezclas de hidrógeno. Se desarrollará un modelo termo-hidráulico cero dimensional que simule las condiciones operativas del banco, incluyendo procesos como carga, descarga y venteo, para evaluar la seguridad y eficiencia de las líneas de transmisión de gas.

Además, se implementarán KPIs para monitorear en tiempo real los parámetros de rendimiento del sistema, basados en los resultados del modelo térmico y en normativas aplicables. Estos indicadores evaluarán la integridad del sistema, la seguridad operacional y la eficiencia térmica.

Finalmente, se realizará una verificación de los resultados de la simulación para asegurar el cumplimiento de los estándares de seguridad y rendimiento en condiciones operativas reales, garantizando la validez y aplicabilidad del modelo térmico.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A. Antecedentes

La corporación para la investigación de la corrosión es beneficiaria de la convocatoria ADPH+. La Alianza para el Desarrollo de la Hidrogenación (ADPH) y MinCiencias suelen colaborar en iniciativas relacionadas con la transición energética y la promoción de tecnologías sostenibles en Colombia.

Objetivos Comunes:

- Promover el uso de hidrógeno como fuente de energía limpia.
- Desarrollar proyectos que contribuyan a la descarbonización y sostenibilidad.
- Fomentar la investigación y la innovación tecnológica en el sector energético.

La alianza busca impulsar el hidrógeno como una fuente de energía alternativa al gas natural y al petróleo, apoyando las metas de descarbonización y reducción de la dependencia de combustibles fósiles. El hidrógeno verde, producido a partir de energías renovables como la solar y la eólica, es una de las opciones más sostenibles, y su desarrollo es visto como un pilar para alcanzar la neutralidad de carbono en el país hacia 2050. Uno de los pilares de la alianza es el apoyo a la investigación científica y tecnológica relacionada con el hidrógeno. MinCiencias, a través de sus programas de financiación y sus redes de colaboración académica, proporciona recursos para proyectos de investigación que exploran la producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno. La ADPH, por su parte, contribuye con su experiencia técnica e industrial para que estos proyectos tengan un enfoque práctico y aplicable al mercado colombiano. Este proyecto busca explorar y evaluar el potencial de Colombia para la producción de hidrógeno verde mediante energía renovable. Zonas como La Guajira, con gran capacidad eólica, y regiones del interior con alta radiación solar, han sido áreas de interés para la instalación de plantas piloto que aprovechan estos recursos naturales. Los resultados de estos proyectos no solo permiten estudiar la viabilidad económica y técnica del hidrógeno en el país, sino que también sientan las bases para futuras expansiones a mayor escala.[1]

La Corporación para la Investigación de la Corrosión está desarrollando un laboratorio especializado con el objetivo de analizar la infraestructura actual de transporte de gas natural y evaluar su capacidad para operar con mezclas de hidrógeno y gas natural (blending). Este estudio es crucial para determinar la viabilidad técnica y operativa de introducir hidrógeno en la red de

distribución existente, minimizando riesgos asociados a la fragilización por hidrógeno y garantizando la seguridad e integridad estructural del sistema. La implementación de esta tecnología tiene el potencial de contribuir a la descarbonización del sector energético, facilitando la transición hacia fuentes más limpias sin requerir modificaciones inmediatas en la infraestructura de distribución.

Para llevar a cabo estas pruebas, el laboratorio se ubica en el séptimo piso del edificio, lo que implica una restricción normativa con respecto al almacenamiento de cilindros de gases comprimidos, debido a la regulación de seguridad estos deben permanecer en áreas externas a la infraestructura. Como solución, se ha diseñado un sistema de tubing. Para garantizar la seguridad y compatibilidad en el transporte de los gases utilizados en el estudio, se seleccionó un sistema de tubing de 1/4" de diámetro, fabricado en acero inoxidable 316. Este material fue elegido debido a sus propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, lo que lo hace adecuado para el transporte de hidrógeno, gas natural y nitrógeno en condiciones de alta presión y temperatura. Además, el acero inoxidable 316 presenta resistencia a la fragilización por hidrógeno, un factor crítico en aplicaciones donde este gas está presente, minimizando el riesgo de fisuración y garantizando la integridad estructural del sistema de distribución. El tubing tiene una extensión total de 70 metros, permitiendo el suministro seguro de hidrógeno, gas natural y nitrógeno desde la zona de almacenamiento hasta el laboratorio. Esta configuración garantiza el cumplimiento de normativas de seguridad y al mismo tiempo permite la realización de ensayos en condiciones controladas.

Con el fin de evaluar el comportamiento de la red, se realizó cálculos detallados de las pérdidas de presión en la tubería, considerando tanto pérdidas distribuidas por fricción con las paredes internas como pérdidas localizadas debido a accesorios como válvulas, codos y reducciones. Estas evaluaciones ayudan a comprender los efectos del hidrógeno en la infraestructura existente, considerando su menor densidad energética volumétrica, mayor permeabilidad y potencial impacto en la resistencia mecánica de los materiales empleados en la red de distribución.

Una de las preguntas clave que se busca responder con este proyecto es la incertidumbre existente en torno a diversas variables operativas del banco de pruebas, cuyo conocimiento es esencial para mejorar la seguridad e integridad del sistema. La falta de datos precisos sobre el comportamiento del hidrógeno en condiciones operativas reales representa un desafío para su implementación a gran escala. Por ello, el estudio se enfoca en caracterizar los parámetros críticos

de operación y en establecer lineamientos técnicos que permitan mitigar riesgos y optimizar el desempeño del sistema.

Este estudio permitirá establecer recomendaciones técnicas para la adaptación de la infraestructura de gas natural a mezclas de hidrógeno, alineándose con estándares internacionales como la ASME B31.12 (2019), que regula el diseño y operación de tuberías para hidrógeno, y con iniciativas globales de transición energética orientadas a la reducción de emisiones de carbono.

Utilidad de los KPIs

Los KPIs son métricas esenciales para evaluar la efectividad y sostenibilidad de sistemas de energía y combustión, especialmente cuando se utilizan combustibles alternativos como el hidrógeno. En proyectos experimentales de combustión y eficiencia energética, los KPIs ayudan a: Medir la eficiencia energética de los sistemas de combustión y transporte de gas. Evaluar el impacto ambiental mediante el monitoreo de emisiones contaminantes. Monitorear la estabilidad y seguridad de la combustión en diversas mezclas de gas natural e hidrógeno. Optimizar costos operativos, determinando el balance óptimo entre hidrógeno y gas natural.

“Experimental investigation on performance and emission characteristics of a SI engine fueled with hydrogen enriched natural gas at different spark timings”.

Este estudio examina los efectos de la mezcla de hidrógeno y gas natural en motores de combustión interna, analizando la eficiencia térmica y las emisiones. Muestra cómo las proporciones variables de hidrógeno impactan en la eficiencia y en la reducción de emisiones de CO₂ y NO_x. [2]

“Characterization of the effects of hydrogen addition in premixed methane/air flames”

investiga cómo la adición de hidrógeno (H₂) al metano (CH₄) afecta la combustión laminar premezclada. Mediante experimentos en quemadores y modelado cinético, los autores demuestran que el H₂ aumenta significativamente la velocidad de la llama (hasta un 40% con 20% de H₂), amplía los límites de inflamabilidad (especialmente en mezclas pobres) y reduce el espesor de la llama debido a una mayor producción de radicales libres (H/O/OH). Estos cambios mejoran la estabilidad en combustión pobre pero incrementan el riesgo de flashback (retroceso de llama), lo que exige ajustes en el diseño de quemadores para aplicaciones prácticas como turbinas de gas. [3]

“Review on safety, standards and regulations of hydrogen and natural gas blends in pipelines”.

Analiza los estándares de seguridad para el manejo de hidrógeno y gas natural en redes de tuberías, incluyendo aspectos normativos y de regulación. Este artículo también aborda KPIs de seguridad y estabilidad en el contexto de mezclas de combustibles.[4]

III. JUSTIFICACIÓN

El proyecto tiene como objetivo evaluar el impacto de diferentes materiales de transmisión en tuberías utilizadas en sistemas que involucran mezclas de gas natural e hidrógeno, contribuyendo así a la descarbonización. Se llevará a cabo un estudio sobre la afectación de estos materiales, utilizando un banco experimental que facilitará la investigación.

El modelo térmico desarrollado permitirá operar el banco de manera segura, estableciendo límites en las condiciones operativas de presión, temperatura y caudales. Además, este enfoque contribuirá a la caracterización de materiales en el contexto de la transición energética a nivel regional.

Para la Corporación para la investigación de corrosión, este proyecto representa una herramienta clave para la modernización de procesos físicos y potenciará las capacidades de simulación de flujos y diagramas de flujo. La Universidad Pontificia Bolivariana, reforzando los lazos de colaboración en investigación. Asimismo, me brindará la oportunidad de aplicar los conocimientos adquiridos en las asignaturas del plan de estudios de la universidad, contribuyendo al avance de la comunidad en el ámbito de la transición energética.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Analizar el comportamiento termo-hidráulico del banco de pruebas, generando indicadores de desempeño para los procesos de transmisión de gas natural a hidrógeno, estudiando las variables térmicas clave, mediante métodos de análisis técnico, para optimizar la eficiencia energética y el diseño de futuros sistemas.

B. Objetivos específicos

- Realizar una revisión de la literatura relacionada permitiendo recopilar prácticas seguras, herramientas y enfoques tanto teóricos y experimentales en el manejo térmico y operacional de sistemas de hidrógeno y gas natural.
- Desarrollar un modelo térmico cero dimensional que contemple los procesos de carga, descarga, venteo, y purga, para los cilindros y las pruebas adicionales del banco de exposición de autoclaves en el proyecto de integridad de hidrógeno.
- Analizar los resultados del modelo térmico transitorio para garantizar la seguridad en las condiciones operativas del sistema.
- Desarrollar indicadores clave de desempeño (KPIs) basados en los resultados obtenidos, considerando las condiciones operativas de un gasoducto en operación normal.

V. MARCO REFERENCIAL

A. *Marco teórico*

El hidrógeno, el primer elemento de la tabla periódica, es el más ligero de todos. Su átomo consiste en un protón y un electrón y suele encontrarse en una forma estable como molécula diatómica (H_2). En condiciones normales, el hidrógeno se presenta como un gas, sin color, sabor ni olor. Es sumamente abundante en la Tierra y representa aproximadamente el 75 % de la materia en el universo. Sin embargo, se encuentra usualmente combinado con otros elementos, como con el oxígeno en el agua o con el carbono en compuestos orgánicos. Por esta razón, no se extrae directamente de la naturaleza como un combustible; en cambio, se emplea como un vector energético, similar a la electricidad, y necesita ser "producido" o separado para su uso. Existen varios métodos para producir hidrógeno, que emplean diversas materias primas, fuentes de energía y técnicas específicas. Dependiendo de los recursos y de la fuente de energía elegida, los procesos pueden ser totalmente renovables, completamente basados en combustibles fósiles o una combinación de ambos en ciertos porcentajes.

La producción de hidrógeno es flexible: puede realizarse en grandes instalaciones centrales, en pequeñas unidades distribuidas o directamente cerca del lugar donde será usado. Esto permite que cualquier región, incluso áreas remotas, tenga la capacidad de generar su propia energía. Cuando se emplean fuentes renovables para la producción de hidrógeno y se utiliza en pilas de combustible de alta eficiencia, los beneficios ambientales son aún más notables. Además, el hidrógeno puede producirse y almacenarse utilizando excedentes de energías renovables como la solar, eólica o hidráulica. Un kilogramo de hidrógeno libera más energía que un kilogramo de otros combustibles casi tres veces más que la gasolina o el gas natural y, en el proceso, no genera dióxido de carbono, emitiendo solo vapor de agua, lo cual hace que su impacto ambiental sea prácticamente nulo.[5]

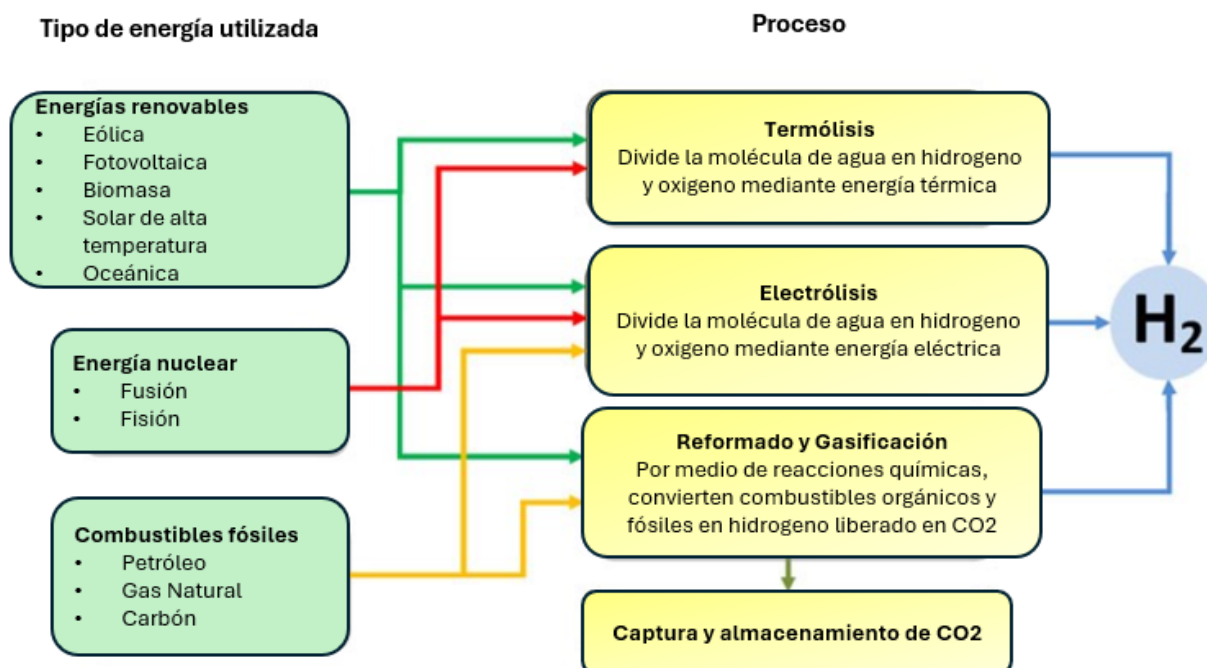


Fig. 1. Formas de producir hidrógeno, [5]

B. Marco conceptual

Clasificación de Hidrógeno

El hidrógeno se clasifica generalmente por el método de producción y la fuente de energía que se utiliza en el proceso.

Hidrógeno Gris: Producido a partir de combustibles fósiles, principalmente mediante el reformado de gas natural. Este proceso genera emisiones significativas de CO₂. [6]

Hidrógeno Azul: También producido a partir de combustibles fósiles, pero en este caso, las emisiones de CO₂ son capturadas y almacenadas (tecnología de captura y almacenamiento de carbono - CCS). Este método reduce el impacto ambiental en comparación con el hidrógeno gris.

Hidrógeno blanco: La producción de hidrógeno blanco se origina a partir de procesos geoquímicos naturales en el subsuelo, resultado de la interacción entre el agua y minerales específicos, así como de diversas reacciones químicas de origen geológico. A diferencia de otros tipos de hidrógeno, su extracción no implica procesos industriales intensivos, lo que minimiza significativamente su impacto ambiental. Su obtención requiere únicamente la perforación y extracción desde formaciones subterráneas, evitando la generación de emisiones asociadas a métodos convencionales de producción. En contraste, la producción de hidrógeno gris involucra la

reforma del metano con vapor a temperaturas superiores a los 1000°C, lo que conlleva la liberación de dióxido de carbono como subproducto, contribuyendo así a la huella de carbono del proceso.[7]

Hidrógeno Verde: Producido mediante la electrólisis del agua, utilizando electricidad de fuentes renovables como la energía solar, eólica o hidráulica. No genera emisiones de carbono durante el proceso de producción, por lo que es considerado el método más sostenible.[6]

Hidrógeno Amarillo, Naranja y Rosa: Estas clasificaciones menos comunes se refieren a hidrógeno producido por electrólisis con fuentes de energía específicas:

- **Amarillo:** Energía solar. producido a partir de electrólisis del agua, pero con una diferencia clave respecto a otros tipos: la electricidad utilizada proviene de una combinación de fuentes renovables y fósiles. Es decir, su impacto ambiental no es fijo y varía dependiendo del mix energético de la red eléctrica que lo alimente.
- **Naranja:** Mezcla de energía renovable y fósil.
- **Rosa:** Energía nuclear.

Fragilización por Hidrógeno

La fragilización por hidrógeno es un fenómeno en el que el hidrógeno penetra en los metales, reduciendo su ductilidad y resistencia. La difusión de hidrógeno en los metales es un proceso mediante el cual el hidrógeno atómico penetra y se mueve a través de la estructura interna de un material metálico, afectando su resistencia y propiedades mecánicas. Exposición a Hidrógeno Gaseoso: En ambientes de alta presión y temperatura donde el hidrógeno está presente en estado gaseoso, como en plantas de generación de energía o sistemas de almacenamiento, las moléculas de hidrógeno se disocian en átomos y comienzan a penetrar en el metal. Esta fragilización ocurre porque los átomos de hidrógeno generan tensiones internas en el metal, aumentando la susceptibilidad al agrietamiento bajo esfuerzos de tensión, especialmente en zonas de concentración de hidrógeno, como puntos de corrosión o zonas soldadas.[6]

Descarbonización

La descarbonización es el proceso mediante el cual se reducen o eliminan las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero (GEI), con el propósito de mitigar el cambio climático y reducir el impacto ambiental de las actividades humanas. Este concepto está ligado a la transición hacia una economía baja en carbono y el cumplimiento de compromisos internacionales en materia ambiental.

A finales de 2022, las emisiones globales de gases de efecto invernadero alcanzaron un nuevo máximo histórico, llegando a 53.786 megatoneladas de dióxido de carbono equivalente (Mt CO₂-eq). Al analizar la distribución de estas emisiones, se observa que la industria energética es el principal contribuyente, generando aproximadamente el 27% del total. El sector del transporte le sigue con un 15%, mientras que la agricultura, la combustión industrial y la extracción de combustibles aportan un 12% cada uno. Los procesos industriales y los edificios representan el 9% y el 7% respectivamente, y los residuos contribuyen con un 5%. [11]

El principal objetivo de la descarbonización es alcanzar la neutralidad de carbono (Net Zero), que implica equilibrar las emisiones antropogénicas de CO₂ con su captura y absorción a través de tecnologías de captura de carbono (CCUS) o sumideros naturales, como los océanos y los bosques.[12]

Carbón: Representa aproximadamente 36% de la generación eléctrica mundial, pero es responsable del 44% de las emisiones de CO₂ del sector energético.

Petróleo: Es la fuente predominante en el transporte, representando un 90% del consumo energético del sector, lo que equivale a aproximadamente 11 GtCO₂ anuales.

Gas Natural: 40% menos CO₂ que el carbón, sigue siendo una fuente significativa de emisiones, con 7 GtCO₂ anuales.

La inyección de hidrógeno en redes de gas natural, conocida como blending, es una estrategia clave en la transición energética hacia una economía basada en hidrógeno, permitiendo la descarbonización progresiva mediante el aprovechamiento de la infraestructura existente. Este enfoque posibilita la reducción de emisiones de CO₂ sin requerir inversiones inmediatas en nuevas redes de transporte y distribución, funcionando como una etapa intermedia hacia la adopción de hidrógeno puro. La fracción volumétrica de hidrógeno en la mezcla, que puede expresarse en términos del porcentaje molar o de la presión parcial de hidrógeno (pH₂), influye directamente en las propiedades del gas transportado y en la eficiencia de los sistemas de combustión y distribución.

Mezclas de gas natural e hidrógeno alternativa para la Transición Energética

El proceso de transición energética hacia fuentes de menor impacto ambiental ha consolidado al hidrógeno como un vector energético de alta relevancia en la descarbonización industrial. Sin embargo, su almacenamiento y transporte presentan retos técnicos derivados de sus propiedades fisicoquímicas, entre las cuales destacan su baja densidad energética volumétrica y su efecto de fragilización en materiales metálicos, lo que compromete la integridad estructural de los

sistemas de conducción convencionales. Una alternativa técnica viable para mitigar estas limitaciones es el blending, un proceso que consiste en la inyección controlada de hidrógeno en las redes de distribución de gas natural. Esta estrategia permite una transición progresiva hacia el uso del hidrógeno sin la necesidad inmediata de desarrollar infraestructuras dedicadas, optimizando el uso de la red de transporte existente y minimizando los costos asociados a su implementación.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Uso de infraestructura existente Reduce costos de implementación en comparación con el desarrollo de infraestructuras 100 % dedicadas al hidrógeno. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragilización Se requiere el análisis de compatibilidad de los materiales existentes con diferentes concentraciones de hidrógeno.
<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de emisiones de carbono Posibilita una transición gradual hacia un sistema energético con menor intensidad de carbono": 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitaciones en la mezcla La proporción de hidrógeno en la mezcla debe mantenerse por debajo de ciertos umbrales. para evitar impactos en equipos.
<ul style="list-style-type: none"> • Mejorar procesos de calor de alta entalpía 	<ul style="list-style-type: none"> • Impacto en la Infraestructura y Seguridad Se requiere regulaciones y normativas para asegurar la operación segura y eficiente del blending.

Fig. 2. Ventajas y desventajas del blending.

El Hidrógeno posee una densidad energética volumétrica inferior a la del gas natural, aproximadamente un tercio, lo que reduce el poder calorífico de la mezcla y puede afectar el desempeño de los sistemas diseñados para operar con metano puro. Asimismo, sus características de combustión presentan diferencias significativas con respecto al gas natural, ya que su llama es menos visible, su rango de inflamabilidad es más amplio (4-75 %) y su energía mínima de ignición es considerablemente menor, lo que incrementa el riesgo de ignición espontánea en ambientes confinados. Además, su alta difusividad y menor viscosidad favorecen una mayor tasa de fuga en comparación con el metano, lo que exige condiciones más estrictas en la hermeticidad de las redes de transporte y almacenamiento.[9]

Importancia de la Purga en el Sistema de Llenado

El procedimiento de purga es una etapa fundamental en la preparación y operación de sistemas de llenado de gases comprimidos, ya que permite la eliminación de residuos de aire, humedad y contaminantes que podrían comprometer la seguridad y el rendimiento del proceso. Este procedimiento es especialmente crítico en la manipulación de gases altamente inflamables,

como el hidrógeno y el gas natural, donde la presencia de oxígeno u otras impurezas puede generar reacciones no deseadas o afectar la calidad del producto final.

En sistemas de tuberías que transportan gases inflamables, la presencia de oxígeno residual representa un riesgo significativo de combustión y explosión. Para mitigar este peligro, la purga se realiza utilizando un gas inerte, como el nitrógeno (N₂), cuya función es desplazar los contaminantes no deseados, incluyendo la humedad, que podría inducir corrosión o generar reacciones químicas con el gas almacenado.

Desde una perspectiva normativa, la (**NFPA 55:2023**: National Fire Protection Association, NFPA 55: Compressed Gases and Cryogenic Fluids Code, 2023.) establece que la concentración de oxígeno en sistemas que contienen hidrógeno debe mantenerse por debajo del 1%, a fin de minimizar los riesgos de ignición y garantizar la seguridad operativa. Asimismo, normativas internacionales como la (**ASME B31.3**: American Society of Mechanical Engineers, ASME B31.3: Process Piping, 2020.) y la (ISO 10156:2017: International Organization for Standardization, **ISO 10156**: Gases and gas mixtures — Determination of fire potential and oxidizing ability for the selection of cylinder valve outlets, 2017.) proporcionan directrices adicionales sobre el manejo seguro de gases en tuberías de alta presión, estableciendo requisitos específicos para la purga y el control de impurezas en sistemas presurizados.

El cumplimiento de estas normativas no solo es esencial para garantizar la integridad del sistema y la seguridad del personal operativo, sino que también contribuye a la eficiencia del proceso, reduciendo el riesgo de fallos mecánicos y optimizando el desempeño de los equipos.

Ecuaciones Fundamentales del Proceso

Para describir el comportamiento del sistema de llenado y purga de gases comprimidos, es necesario emplear ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos y la termodinámica. Estas ecuaciones permiten analizar la evolución de la presión en un cilindro durante su vaciado, las pérdidas de presión en las tuberías y accesorios, así como la tasa de descarga del gas.

Ecuación Darcy-Weisbach

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

Se utiliza en el diseño de sistemas de tuberías para determinar la pérdida de presión a lo largo de una línea. Es clave en la ingeniería de gasoductos, acueductos y sistemas de ventilación. Ayuda a optimizar el consumo de energía en el transporte de fluidos. [13], [14], [15]

Ecuación pérdida por accesorios

$$h_k = K \frac{v^2}{2g}$$

En los sistemas de transporte de fluidos a presión, las pérdidas de carga representan una disminución de la presión a lo largo del flujo debido a la interacción entre el fluido y los componentes del sistema. Estas pérdidas se dividen en pérdidas de carga distribuidas, que ocurren debido a la fricción del fluido con las paredes de la tubería a lo largo de su recorrido, y pérdidas de carga localizadas o secundarias, que se producen en elementos específicos del sistema, como válvulas, codos, reducciones, expansiones y conexiones en T.

Las pérdidas de carga localizadas surgen cuando el fluido experimenta un cambio abrupto en la dirección, velocidad o área de flujo. Estas alteraciones generan zonas de turbulencia, separación del flujo y disipación de energía en forma de calor, lo que impacta en la eficiencia del transporte del fluido y puede ocasionar caídas de presión significativas.[16]

Factores que Afectan las Pérdidas Localizadas

Las pérdidas de carga secundarias dependen de varios factores, entre ellos:

Geometría del accesorio: Los componentes con cambios bruscos en la dirección del flujo generan mayores turbulencias, incrementando la pérdida de presión.

Velocidad del fluido: A velocidades más altas, el impacto de las pérdidas localizadas es mayor debido al aumento de la energía cinética disipada.

Número de Reynolds: En flujos turbulentos, las pérdidas localizadas son más pronunciadas en comparación con flujos laminares.

Configuración del sistema: La cantidad y disposición de accesorios en una línea de tuberías influye directamente en la magnitud de las pérdidas de carga.

El desarrollo de sistemas de llenado y purga con mezclas de hidrógeno y gas natural tiene un impacto significativo en la industria de los gasoductos y el almacenamiento de hidrógeno. A medida que el hidrógeno se integra en las redes de transporte de gas natural como parte de la transición energética, es crucial evaluar el comportamiento de los materiales y equipos ante la presencia de este gas altamente difusivo y reactivo. Este proyecto permite optimizar los procedimientos de llenado y vaciado en cilindros y autoclaves, reduciendo el riesgo de fugas, fragilización del material y fallas estructurales en la infraestructura existente [17]

C. Marco legal

Las normas **ISO/TR 15916** y **ASME B31.12** son estándares clave que abordan aspectos de seguridad y diseño en sistemas de hidrógeno, particularmente en relación con la estabilidad y la seguridad de la combustión.

ISO/TR 15916 - Seguridad en el Manejo de Hidrógeno

ISO/TR 15916 es una norma internacional que proporciona directrices para el manejo seguro del hidrógeno en diversas aplicaciones. Su enfoque es la mitigación de riesgos y la protección de personas, instalaciones y el medio ambiente en sistemas de hidrógeno.[8]

ASME B31.12 - Normas de Diseño para Tuberías de Hidrógeno

La norma ASME B31.12, por otro lado, establece los requisitos de diseño y construcción para tuberías y sistemas de distribución de hidrógeno. Esta norma es parte de la serie de códigos de ASME para sistemas de tuberías de presión y está específicamente diseñada para abordar los desafíos de transporte de hidrógeno de alta presión.

La interacción del hidrógeno con los materiales de las tuberías y componentes de la infraestructura de distribución. El hidrógeno puede inducir fragilización en los aceros estructurales, reduciendo su tenacidad y resistencia mecánica, lo que conlleva un mayor riesgo de fallo estructural. Estudios han demostrado que la exposición prolongada al hidrógeno aumenta la tasa de crecimiento de grietas por fatiga y disminuye la resistencia a la fractura de los materiales, especialmente en las zonas afectadas por soldaduras. Asimismo, la propagación de grietas subcríticas en un ambiente rico en hidrógeno representa un desafío para la durabilidad y seguridad de la infraestructura. Estas problemáticas han sido abordadas en normativas técnicas como ASME B31.12 (2019), que establece requisitos específicos para el diseño y operación de tuberías de hidrógeno, incluyendo factores de seguridad adicionales para mitigar los efectos adversos sobre los materiales.

A pesar de estas limitaciones, el blending de hidrógeno con gas natural sigue siendo una estrategia viable para avanzar en la descarbonización del sector energético. La implementación de tecnologías de monitoreo avanzadas, el desarrollo de materiales más resistentes a la fragilización por hidrógeno y la optimización de la infraestructura permitirán mejorar la seguridad y eficiencia del proceso. A largo plazo, la inyección controlada de hidrógeno en las redes de distribución puede facilitar la transición hacia un sistema energético basado en hidrógeno puro, contribuyendo de

manera significativa a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la descarbonización de la industria y el transporte [9], [10]

Normas-API 571 (2020)

La norma API 571 (2020) describe los mecanismos de daño que afectan los equipos fijos en la industria de refinación, y dedica especial atención a los daños relacionados con el hidrógeno. Específicamente, aborda fenómenos como la fragilización por hidrógeno, donde el gas penetra en los materiales metálicos, reduciendo su ductilidad y provocando grietas; el ataque de hidrógeno a alta temperatura (HTHA), que ocurre cuando el hidrógeno reacciona con el carbono del acero formando metano, debilitando la estructura interna; y la fisuración inducida por hidrógeno (HIC), que genera grietas internas en aceros expuestos a hidrógeno y sulfuro de hidrógeno (H₂S). La norma también proporciona recomendaciones sobre los materiales más resistentes a estos mecanismos, como los aceros inoxidable austeníticos y aleaciones de níquel, y sugiere estrategias de inspección y monitoreo para prevenir fallas, garantizando la integridad de los equipos en contacto con hidrógeno.[18]

Norma- ASTM A370-24

La norma ASTM A370-24 establece los métodos de ensayo mecánicos para productos de acero, aceros inoxidable y aleaciones relacionadas. Define procedimientos estándar para pruebas de tensión, flexión, dureza (Brinell, Rockwell, portátil) e impacto, asegurando resultados reproducibles y comparables. Es crucial para evaluar la conformidad de los materiales según sus especificaciones. Aunque no trata específicamente sobre hidrógeno, sus ensayos ayudan a determinar la resistencia y ductilidad de materiales que podrían estar expuestos a hidrógeno, facilitando la selección de aceros resistentes a la fragilización por hidrógeno.[19]

Norma API 5L (2018)

La norma API 5L (2018) especifica los requisitos para la fabricación de tuberías de acero al carbono, tanto sin costura como soldadas, utilizadas en sistemas de transporte de petróleo, gas natural y otros fluidos. Define dos niveles de especificación de producto (PSL 1 y PSL 2), donde PSL 2 incluye requisitos más estrictos de composición química, propiedades mecánicas, tenacidad y pruebas no destructivas.

En el contexto del hidrógeno, esta norma es clave porque el transporte seguro de mezclas de gas natural e hidrógeno requiere tuberías con alta resistencia mecánica y buena tolerancia a la fragilización por hidrógeno. Las tuberías certificadas bajo API 5L PSL 2 suelen tener mejor control

sobre la composición química y tratamientos térmicos, reduciendo la posibilidad de fisuración inducida por hidrógeno (HIC) y fragilización. [20]

NORMA- ASME B31.12-2019

La norma ASME B31.12-2019, titulada "Hydrogen Piping and Pipelines", establece los requisitos para el diseño, fabricación, instalación, inspección y mantenimiento de sistemas de tuberías que manejan hidrógeno en estado gaseoso y líquido. Esta norma es parte del Código para Tuberías a Presión B31 de la ASME y se centra en aplicaciones industriales, plantas de energía, industrias de gases químicos y sectores de energía limpia.

La estructura de la ASME B31.12-2019 se divide en varias partes:

- **Parte GR — Requisitos Generales:** Incluye definiciones y requisitos relacionados con materiales, soldadura, tratamiento térmico, conformado, pruebas, inspección, operación y mantenimiento.
- **Parte IP — Tuberías Industriales:** Aborda componentes, diseño, fabricación, montaje, erección, inspección, examen y pruebas de tuberías en entornos industriales.
- **Parte PL — Tuberías de Transporte:** Establece requisitos para componentes, diseño, instalación y pruebas de tuberías destinadas al transporte de hidrógeno.

El papel de esta norma en relación con el hidrógeno es fundamental, ya que aborda los desafíos únicos asociados con el manejo de este gas, como la fragilización de materiales y las propiedades específicas del hidrógeno que pueden afectar la integridad de las tuberías. Al seguir las directrices de la ASME B31.12-2019, se busca garantizar la seguridad y eficiencia en sistemas que transportan hidrógeno, promoviendo prácticas seguras y confiables en la industria.[21]

Norma - ASTM E8/E8M-22

La norma **ASTM E8/E8M-22** establece los métodos estándar para realizar pruebas de tracción en materiales metálicos a temperatura ambiente. Su objetivo es determinar propiedades mecánicas clave como la resistencia a la tracción, el límite elástico, la elongación y la reducción de área, proporcionando parámetros esenciales para evaluar la ductilidad y resistencia de los metales.

En el contexto del hidrógeno, esta norma es crucial porque los materiales expuestos al hidrógeno tienden a sufrir fragilización por hidrógeno, reduciendo su capacidad de deformarse antes de fracturarse. Las pruebas de tracción según ASTM E8/E8M-22 permiten identificar estas

pérdidas de ductilidad, facilitando la selección de materiales más resistentes a la exposición al hidrógeno, como ciertos aceros inoxidable austeníticos o aleaciones de níquel.[22]

Norma- ASTM E23-23a

La norma **ASTM E23-23a** establece los métodos de ensayo para la prueba de impacto en barra entallada en materiales metálicos, utilizando los ensayos Charpy y Izod. Su objetivo principal es evaluar la tenacidad de los materiales al someterlos a un impacto repentino, determinando la energía absorbida durante la fractura.

Define las especificaciones de las probetas (con entalla en V o U), los procedimientos de prueba, las configuraciones opcionales y las máquinas de ensayo, además de incluir métodos para verificar y calibrar los equipos. Esta norma es vital para identificar si un material es propenso a la fractura frágil, algo crítico en sistemas expuestos a hidrógeno, donde la fragilización por hidrógeno puede comprometer la integridad de los metales.[23]

Norma- ASTM E45-18a

La norma **ASTM E45-18^a**. Establece métodos para determinar el contenido de inclusiones no metálicas en aceros forjados. Define procedimientos macroscópicos (macroataque, fractura, método escalonado y partículas magnéticas) y métodos microscópicos para clasificar las inclusiones según su morfología, no por su composición química.

Es crucial para la evaluación de aceros destinados a aplicaciones donde la limpieza del material influye directamente en la resistencia y durabilidad, como en sistemas de transporte de hidrógeno. El hidrógeno puede interactuar con inclusiones no metálicas (como sulfuros o óxidos), favoreciendo la **fragilización por hidrógeno** y la formación de grietas internas. Al usar esta norma, se garantiza que el acero seleccionado tenga bajo contenido de inclusiones, mejorando su resistencia ante la exposición al hidrógeno y reduciendo el riesgo de fallas. [24]

Norma- ASTM E407-23

La norma **ASTM E407-23** establece los procedimientos para el **microataque** (microetching) de metales y aleaciones, con el fin de revelar sus microestructuras para el análisis metalográfico. Define qué soluciones químicas deben usarse según el tipo de metal o aleación, proporcionando instrucciones detalladas sobre la preparación, aplicación y seguridad en el manejo de los reactivos.

Es especialmente útil para identificar fases, límites de grano, inclusiones y otros aspectos críticos de la estructura interna de los materiales, lo que resulta vital al evaluar metales expuestos

a condiciones extremas, como el hidrógeno. En sistemas que transportan hidrógeno, esta norma ayuda a detectar posibles defectos estructurales o micro fisuras que podrían ser puntos de inicio para la fragilización por hidrógeno.

La norma es publicada por ASTM International, bajo la supervisión del Comité E04 sobre Metalografía, y más específicamente por el Subcomité E04.01 sobre Preparación de Muestras. La versión más reciente fue aprobada el 1 de noviembre de 2023 y publicada en el mismo mes. [25]

Norma- ASTM G142-98

La norma **ASTM G142-98** (Reaprobada en 2022) establece un método de prueba para determinar la susceptibilidad de los metales a la fragilización por hidrógeno en entornos gaseosos de hidrógeno a alta presión, alta temperatura, o ambas. El objetivo principal es evaluar cómo cambian las propiedades mecánicas —como la resistencia a la tracción, la elongación y la reducción de área— cuando los materiales se someten a estas condiciones.

El procedimiento consiste en someter especímenes de metal a una prueba de tracción dentro de una cámara que contiene hidrógeno gaseoso, comparando los resultados obtenidos con los de una prueba de control en un entorno no fragilizante. Esta comparación ayuda a identificar la pérdida de ductilidad o la aparición de grietas inducidas por el hidrógeno, determinando así la resistencia o susceptibilidad del material a la fragilización. [26]

Norma- ASTM G148-97

La norma **ASTM G148-97** establece una práctica estándar para la evaluación de la absorción, permeación y transporte de hidrógeno en metales mediante una técnica electroquímica desarrollada por Devanathan y Stachurski.

El propósito principal de esta norma es medir cómo los metales absorben y transportan hidrógeno, determinando propiedades clave como la difusividad efectiva del hidrógeno en el material. Además, permite distinguir entre trampas de hidrógeno reversibles (donde el hidrógeno queda atrapado temporalmente) e irreversibles (donde el hidrógeno queda fijado permanentemente en la microestructura).

La técnica consiste en colocar una membrana metálica entre dos celdas: una de carga (donde se introduce el hidrógeno) y otra de oxidación (donde se mide la cantidad de hidrógeno que atraviesa el metal). Esto permite calcular la tasa de flujo de hidrógeno a través del material y evaluar su capacidad de resistir la fragilización.

Esta norma es especialmente relevante para la industria que trabaja con hidrógeno, ya que ayuda a identificar materiales más resistentes a la fragilización por hidrógeno, un problema crítico en tuberías, tanques y equipos sometidos a ambientes ricos en hidrógeno.[27]

VI. METODOLOGÍA

A. Tipo de investigación

El estudio es de tipo experimental y simulativo, enfocado en la evaluación de mezclas de hidrógeno y gas natural en sistemas de combustión y transferencia térmica hidráulica en tuberías.

B. Enfoque metodológico

Se adoptará un enfoque para medir los resultados, con énfasis en la modelación y análisis de variables térmicas e hidráulicas.

C. Población

Industria energética y de combustibles, Gobiernos y agencias de políticas ambientales, Generación energética.

D. Diseño Metodológico

1) Enfoque del Estudio

Tipo de investigación: El estudio es de tipo experimental y simulativo, enfocado en la evaluación de mezclas de hidrógeno y gas natural en sistemas de combustión y transferencia térmica en tuberías.

Enfoque metodológico: Se adoptará un enfoque cuantitativo para medir los resultados, con énfasis en la modelación y análisis de variables térmicas y de eficiencia de combustión.

2) Objetivos de la Metodología

- Realizar una revisión de la literatura relacionada.
- Al revisar literatura, se pueden recopilar datos sobre prácticas seguras y eficientes en el manejo térmico y operacional de sistemas de hidrógeno y gas natural. Ayuda a conocer herramientas, estándares, y enfoques teóricos y experimentales utilizados en proyectos similares. Esto asegura que el modelo y los indicadores clave de desempeño (KPIs).

- Desarrollar un modelo térmico cero dimensional que contemple los procesos de carga, descarga, venteo, y otros, para los cilindros y las pruebas adicionales del banco de exposición de autoclaves en el proyecto de integridad de hidrógeno.
- Analizar los resultados del modelo térmico transitorio para garantizar la seguridad en las condiciones operativas del sistema.
- Desarrollar indicadores clave de desempeño (KPIs) basados en los resultados obtenidos, considerando las condiciones operativas típicas de un gasoducto bajo condiciones normales de operación.
- Establecer y analizar Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) que evalúen la eficiencia térmica, emisiones, estabilidad de combustión y otros aspectos de desempeño.

E. Fase 1: Análisis de Información Previa

1) Recolección de Información

- Investigación sobre la fragilización de metales por hidrógeno, normativas de seguridad (ISO/TR 15916, ASME B31.12) y propiedades térmicas de los combustibles.
- Revisión de estudios previos y recopilación de datos sobre los efectos del hidrógeno en la eficiencia térmica y estabilidad de combustión.

2) Revisión de Literatura

- Búsqueda de artículos y documentos técnicos sobre simulación térmica y comportamiento de mezclas de gases.
- Comparación de metodologías y resultados en investigaciones similares para establecer una base de referencia.

F. Fase 2: Diseño y Desarrollo del Modelo Térmico

1) Selección de Herramientas y Configuración del Software

- Definición de las herramientas de modelado y simulación con software DWSIM
- Configuración de parámetros iniciales de simulación, como flujo de gas, temperatura, presión y composición de la mezcla.

2) Creación del Modelo

- Construcción de un esquema detallado de tuberías, materiales y nodos de temperatura.
- Determinación de las proporciones de mezcla de hidrógeno y gas natural que serán probadas.

3) Ejecución de Simulaciones Preliminares

- Realización de simulaciones iniciales para ajustar el modelo y verificar la consistencia de los datos.

G. Fase 3. Establecimiento de KPIs y Métricas de Desempeño

1) Definición de KPIs

- Establecer KPIs como eficiencia térmica, emisiones (CO₂, NO_x), estabilidad de combustión, y costos operativos.
- Definir umbrales para cada KPI según referencias de estudios y normativas aplicables.

2) Búsqueda de KPIs Adicionales:

- Investigación de otros indicadores relevantes en sistemas de combustión de hidrógeno y gas natural, incluyendo durabilidad de materiales y eficiencia de transferencia térmica.

3) Planteamiento de Métricas y Documentación

- Definir métricas y sistemas de monitoreo para cada KPI.

H. Fase 4: Ejecución del Modelo y Análisis de Resultados

1) Simulación Completa de los Escenarios de Mezcla

- Ejecución de simulaciones con diferentes proporciones de hidrógeno y gas natural.
- Documentación de los perfiles de temperatura, flujo.

2) Análisis Comparativo

- Evaluar el impacto de las variables térmicas en la eficiencia y estabilidad del sistema.

3) Generación de Reportes y Recomendaciones

- Preparar un reporte de los resultados de cada escenario, destacando los KPIs más relevantes.
- Proporcionar recomendaciones para la optimización del sistema en función de los hallazgos del modelo.

I. Fase 5. Validación y Optimización

1) Validación de Resultados

- Comparar los resultados de la simulación con datos experimentales o valores de referencia en la literatura.
- Ajuste de parámetros en el modelo para reducir discrepancias y aumentar la precisión.

2) Propuestas de Optimización

- Establecer lineamientos de optimización de eficiencia térmica y reducción de emisiones.

3) Presentación Final:

- Elaboración de un informe final con los resultados y conclusiones del estudio.
- Recomendaciones para aplicaciones prácticas del modelo y posibles mejoras en el diseño del sistema de tuberías.

J. Actividades por desarrollar

1) Análisis de Información Previa

- Recolección y revisión de informes técnicos y estudios previos en proyectos similares.
- Identificación de las propiedades térmicas y de combustión del hidrógeno y gas natural.
- Resumen de datos clave sobre la fragilización por hidrógeno y su impacto en los materiales.
- Validación de datos de entrada para asegurar precisión en el modelado térmico.

2) Revisión de Literatura

- Identificación de artículos científicos y normas relevantes (por ejemplo, ISO/TR 15916, ASME B31.12).

- Síntesis de metodologías utilizadas en estudios de simulación térmica de hidrógeno y gas natural.
- Análisis comparativo de modelos térmicos en literatura y sus aplicaciones.
- Recopilación de referencias sobre normativas de seguridad en sistemas de hidrógeno.

3) Elaboración del Modelo Térmico

- Definición de los parámetros de entrada para el modelo, como flujo, temperatura y mezcla de combustibles.
- Selección de software y configuración de herramientas de simulación (DWSIM).
- Desarrollo del esquema de tuberías, materiales y puntos de medición en el modelo.

4) Análisis de Resultados

- Comparación de los resultados del modelo con los datos de referencia de literatura.
- Análisis de los perfiles de temperatura y flujo de hidrógeno y gas natural.
- Evaluación de la estabilidad térmica del sistema en distintas proporciones de mezcla.
- Generación de recomendaciones para ajustes en el modelo.

K. Establecimiento y Evaluación de KPIs

1) Establecer KPIs específicos

Identificación y definición de KPIs iniciales para el rendimiento del sistema, como eficiencia térmica, emisiones y estabilidad de combustión.

- **Búsqueda y evaluación de otros KPIs relevantes:**

Investigación sobre KPIs adicionales en sistemas de combustión de hidrógeno y gas natural.

- **Planteamiento de métricas:**

Creación de métricas específicas para medir y monitorear el desempeño de los KPIs, adaptadas al contexto experimental.

- **Establecimiento de documentación de KPIs:**

Configuración de un sistema de informes periódicos para el seguimiento de KPIs y su impacto en la optimización del modelo térmico.

VII. RESULTADOS

El **diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)** representa la distribución del sistema de suministro de gases, identificando los cilindros de almacenamiento y su disposición en cumplimiento con normativas de seguridad. Se han implementado válvulas de control y seguridad para prevenir sobrepresiones, así como válvulas check para evitar el retroceso de gases en la línea. El diagrama P&ID fue desarrollado conforme a las normativas y regulaciones aplicables, priorizando la seguridad operativa y la eficiencia del sistema. Se estableció que los cilindros debían ubicarse fuera de las instalaciones para minimizar riesgos asociados a la manipulación de gases presurizados.

La elaboración del P&ID se llevó a cabo mediante reuniones técnicas con la Universidad Unisangil y la empresa Promigas, asegurando el cumplimiento de los requisitos de diseño, seguridad y control del proceso. Se integraron estratégicamente válvulas de control, reguladores de presión y sensores de flujo para garantizar un monitoreo preciso y una operación confiable del sistema.

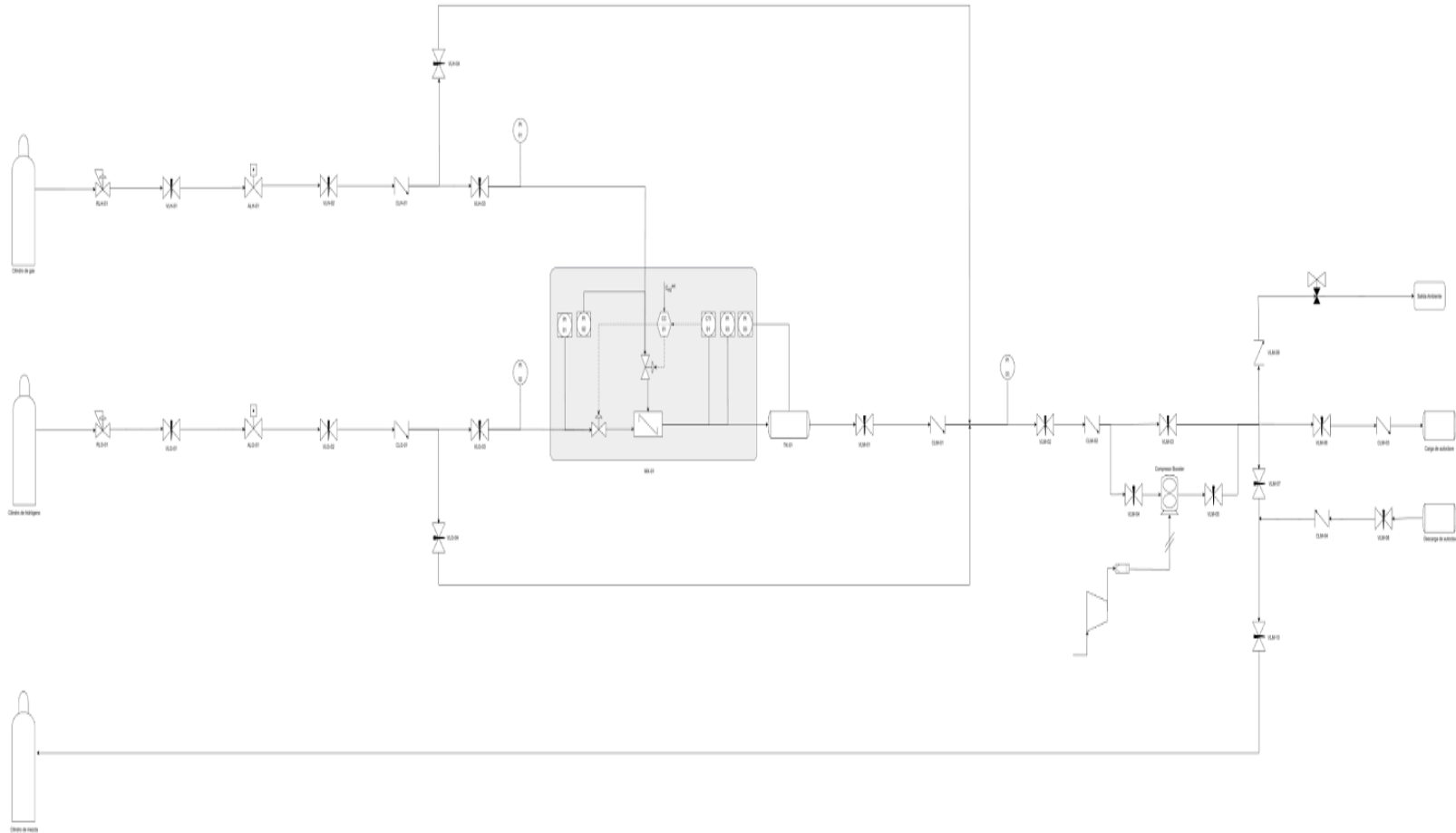


Fig. 3. Plano P&ND.

A. Procedimiento de Operación del Sistema de Suministro de Gas para Autoclaves

El sistema de suministro de gases comprimidos hacia las autoclaves comprende tres procesos fundamentales: purga, llenado y venteo. A continuación, se detallan los procedimientos operativos de cada etapa, incluyendo las trayectorias de flujo y la configuración de válvulas necesarias para garantizar la seguridad y eficiencia del proceso.

Proceso de Purga

La purga es un proceso esencial para eliminar el oxígeno residual en la línea y evitar la formación de mezclas inflamables dentro del rango de explosividad del gas a utilizar. En este contexto, se deben considerar los límites de explosividad, definidos por el Límite Inferior de Explosividad (LEL, Lower Explosion Limit) y el Límite Superior de Explosividad (UEL, Upper Explosion Limit), los cuales representan la concentración mínima y máxima en la que un gas puede generar una mezcla inflamable en presencia de oxígeno y una fuente de ignición.

El hidrógeno presenta un desafío significativo debido a sus propiedades fisicoquímicas. Su amplio rango de explosividad, con un LEL del 4 % y un UEL del 75 % en volumen en aire, le permite formar mezclas inflamables en una gran variedad de concentraciones. Además, su baja energía de ignición, de solo 0.017 mJ, lo hace altamente susceptible a fuentes de ignición, en contraste con otros gases como el metano, que requiere 0.28 mJ. Sumado a esto, su alta velocidad de difusión en el aire puede provocar que alcance concentraciones peligrosas en poco tiempo si no se controlan adecuadamente las ventilaciones y procesos de purga.

Purga de la línea Sistema de Gas Natural

En esta configuración, el recorrido del N₂ se muestra en azul, mientras que las válvulas cerradas se indican en rojo. Antes de iniciar el proceso de llenado, se realiza una purga de la línea de bypass del mezclador y hasta el venteo utilizando nitrógeno (N₂). Este procedimiento asegura la eliminación de residuos de gases presentes en el sistema, minimizando riesgos de contaminación cruzada o generación de mezclas peligrosas.

Ruta del N₂ durante la purga del gas natural:

Cilindro de nitrógeno → Regulador de línea de gas natural (RLG01) → Válvula de línea de gas natural (VLG01) → Acople de usuario (AUG01) → Válvula de línea de gas natural (VLG02) → Check de línea de gas natural (CLG01) → Válvula de línea de gas natural (VLG04) → Válvula de línea del mezclador (VLM02) → Check de línea del mezclador (CLM02) → Válvula de línea del mezclador (VLM03) → Válvula de línea del mezclador (VLM09) → Salida a ambiente.

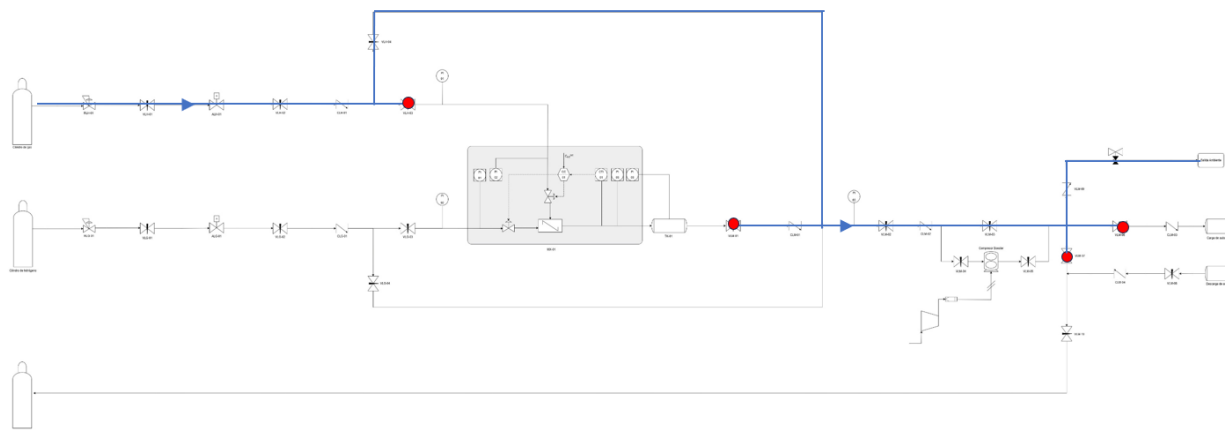


Fig. 4. Ruta del N₂ durante la purga del gas natural.

Configuración de válvulas cerradas:

- VLG03 (válvula de gas natural en bypass)
- VLM01 (válvula de aislamiento del mezclador)
- VLM07 (válvula de control de flujo hacia el compresor)
- VLM05 (válvula de entrada a la autoclave)

Proceso de Purga del Sistema de Hidrógeno

En esta configuración, el recorrido del N₂ se muestra en azul, mientras que las válvulas cerradas se indican en rojo. De manera análoga a la purga del sistema de gas natural, se efectúa la purga de la línea de bypass del mezclador con nitrógeno (N₂) para garantizar la remoción de residuos de hidrógeno.

Ruta del N₂ durante la purga del hidrógeno:

Cilindro de nitrógeno → Regulador de línea de hidrógeno (RLH01) → Válvula de línea de hidrógeno (VLH01) → Acople de usuario (AUH01) → Válvula de línea de hidrógeno (VLH02) → Check de línea de hidrógeno (CLH01) → Válvula de línea de hidrógeno (VLH04) → Válvula de línea del mezclador (VLM02) → Check de línea del mezclador (CLM02) → Válvula de línea del mezclador (VLM03) → Válvula de línea del mezclador (VLM09) → Salida a ambiente.

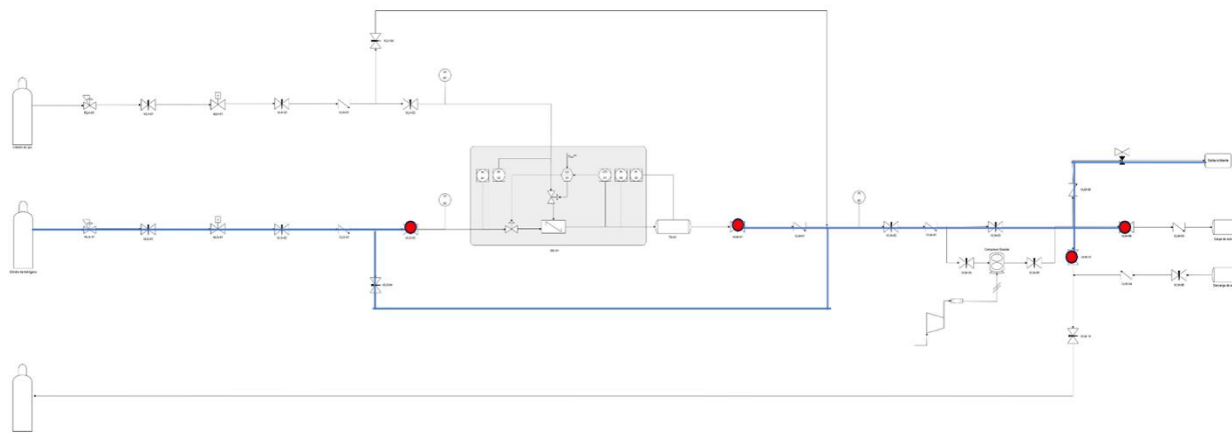


Fig. 5. Ruta del N₂ durante la purga del hidrogeno

Configuración de válvulas cerradas:

- **VLH03** (válvula de hidrógeno en bypass)
- **VLM01** (válvula de aislamiento del mezclador)
- **VLM07** (válvula de control de flujo hacia el compresor)
- **VLM05** (válvula de entrada a la autoclave)

Ruta del N₂ durante la purga del sistema de llenado cilindro de mezcla

Se lleva a cabo la purga del sistema de recolección de mezcla con el propósito de eliminar el aire residual presente en el tubing, asegurando así un llenado seguro y libre de contaminantes en el cilindro de mezcla.

Cilindro N₂ → (VLH02) → Check de línea de hidrógeno (CLH01) → Válvula de línea de hidrógeno (VLH03) → Mezclador (MIX) → Tanque de almacenamiento (TK01) → Válvula de línea del mezclador (VLM01) → Check de línea del mezclador (CLM01) → Válvula de línea del mezclador (VLM02) → Check de línea del mezclador (CLM02) → Válvula de línea del mezclador (VLM03) → Válvula de línea del mezclador (VLM07) → Válvula de línea del mezclador (VLM10) → Cilindro mezclador.

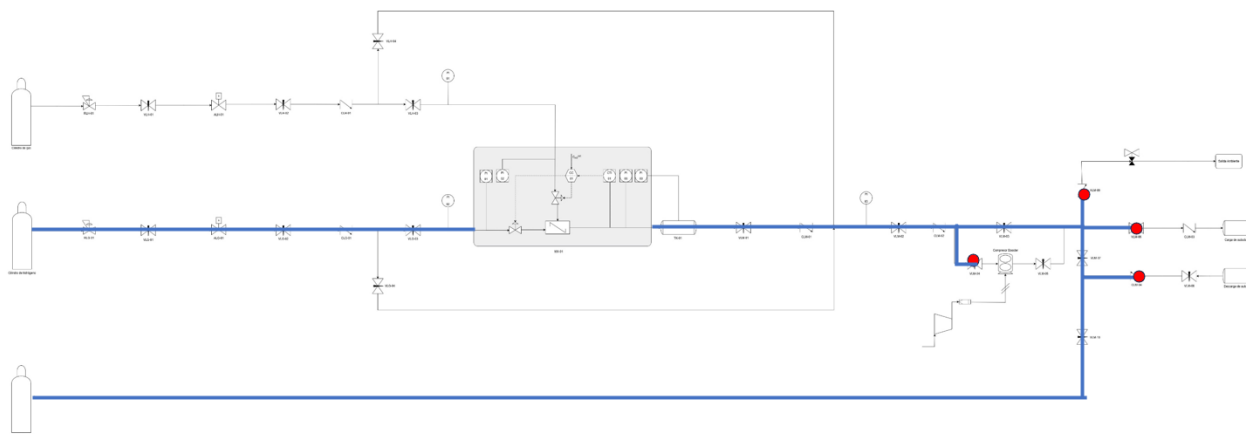


Fig. 6. Ruta del N₂ durante la purga del sistema de llenado cilindro de mezcla

Válvulas cerradas:

- **VLG04** (Válvula de línea de gas natural)
- **VLM04** (Válvula de línea del mezclador)
- **VLM09** (Válvula de línea del mezclador)
- **VLM06** (Válvula de línea del mezclador)
- **CLM04** (Check de línea del mezclador)

Con estos dos procedimientos se aseguran todas las líneas del banco para una operación segura. La purga se realiza en los siguientes casos:

- Antes del primer arranque del banco: Para eliminar cualquier residuo de aire u otros gases en la línea y asegurar que el sistema inicie en condiciones seguras.
- Después de realizar mantenimiento: Cualquier intervención en las tuberías o componentes del sistema puede introducir aire u otros contaminantes que deben ser eliminados antes de reiniciar la operación.
- Luego de la detección y reparación de fugas: Para verificar que no haya quedado aire en la línea y evitar la formación de mezclas explosivas en caso de que el gas vuelva a ingresar al sistema.
- Cambio de gas en la línea: Si se requiere utilizar un gas diferente, es necesario purgar la línea para evitar reacciones no deseadas o contaminación cruzada.
- Antes de abrir equipos a la atmósfera: Si se va a intervenir algún componente que ha estado en contacto con gas a alta presión, la purga permite reducir la concentración de gas en la línea, minimizando riesgos al ambiente y al personal.

- Después de un paro prolongado del sistema: Durante períodos de inactividad, puede acumularse aire en la tubería debido a pequeños ingresos de gas o fluctuaciones de presión, lo que hace necesaria una purga antes de reanudar la operación.

Proceso de Llenado del Sistema con Hidrógeno

En esta configuración, el recorrido del H₂ se muestra en azul, mientras que las válvulas cerradas se indican en rojo. Una vez completada la purga, se procede con el llenado de las autoclaves mediante la inyección controlada de hidrógeno. El hidrógeno fluye a través del sistema hasta el mezclador, desde donde se dirige al tanque de almacenamiento. Posteriormente, el gas es comprimido y enviado a las autoclaves hasta alcanzar la presión de operación requerida.

Ruta del H₂ durante el llenado:

Cilindro de hidrógeno → Regulador de línea de hidrógeno (RLH01) → Válvula de línea de hidrógeno (VLH01) → Acople de línea de hidrógeno (ALH01) → Válvula de línea de hidrógeno (VLH02) → Check de línea de hidrógeno (CLH01) → Válvula de línea de hidrógeno (VLH03) → Mezclador (MIX) → Tanque de almacenamiento (TK01) → Válvula de línea del mezclador (VLM01) → Check de línea del mezclador (CLM01) → Válvula de línea del mezclador (VLM02) → Check de línea del mezclador (CLM02) → Válvula de línea del mezclador (VLM01) → Compresor booster (BOOSTER) → Válvula de línea del mezclador (VLM06) → Válvula de línea del mezclador (VLM05) → Check de línea del mezclador (CLM03) → Autoclave.

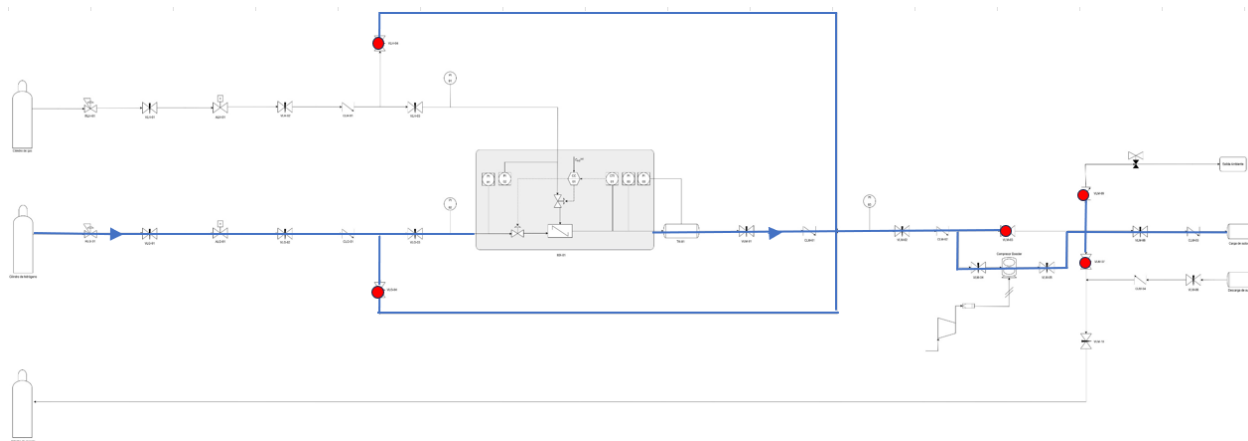


Fig. 7. Ruta del H₂ durante el llenado

Configuración de válvulas cerradas:

- **VLH01** (válvula de aislamiento de la línea de hidrógeno)

- **VLM03** (válvula de salida de la purga del mezclador)
- **VLM09** (válvula de purga general del sistema)
- **VLM07** (válvula de control de flujo al compresor)

El procedimiento de venteo inicial es una etapa fundamental en la operación del sistema, ya que permite eliminar residuos de la mezcla de gases previamente utilizada en la línea antes de conectar la autoclave. Este venteo inicial tiene como propósito arrastrar cualquier remanente de gas que pueda quedar en la tubería, asegurando que la nueva carga de gas sea lo más pura posible y evitando la contaminación de la mezcla actual con residuos de la mezcla anterior. Una vez que se ha completado el venteo y se ha verificado que la línea está en condiciones óptimas, se procede a conectar el sistema a la autoclave, asegurando una transferencia controlada del gas sin riesgos de contaminación ni acumulación de gases potencialmente peligrosos.

Proceso de Llenado del Sistema con Gas Natural

En esta configuración, el recorrido del gas natural se muestra en azul, mientras que las válvulas cerradas se indican en rojo. De manera similar al llenado con hidrógeno, el gas natural se dirige a través del sistema hasta el mezclador y el tanque de almacenamiento. Una vez completada la mezcla, el gas es comprimido y enviado a las autoclaves bajo condiciones controladas.

Ruta del CH₄ durante el llenado:

Cilindro de gas natural → Regulador de línea de gas natural (RLG01) → Válvula de línea de gas natural (VLG01) → Acople de línea de gas natural (ALG01) → Válvula de línea de gas natural (VLG02) → Check de línea de gas natural (CLG01) → Válvula de línea de gas natural (VLG03) → Mezclador (MIX) → Tanque de almacenamiento (TK01) → Válvula de línea del mezclador (VLM01) → Check de línea del mezclador (CLM01) → Válvula de línea del mezclador (VLM02) → Check de línea del mezclador (CLM02) → Válvula de línea del mezclador (VLM01) → Compresor booster (BOOSTER) → Válvula de línea del mezclador (VLM06) → Válvula de línea del mezclador (VLM05) → Check de línea del mezclador (CLM03) → Autoclave.

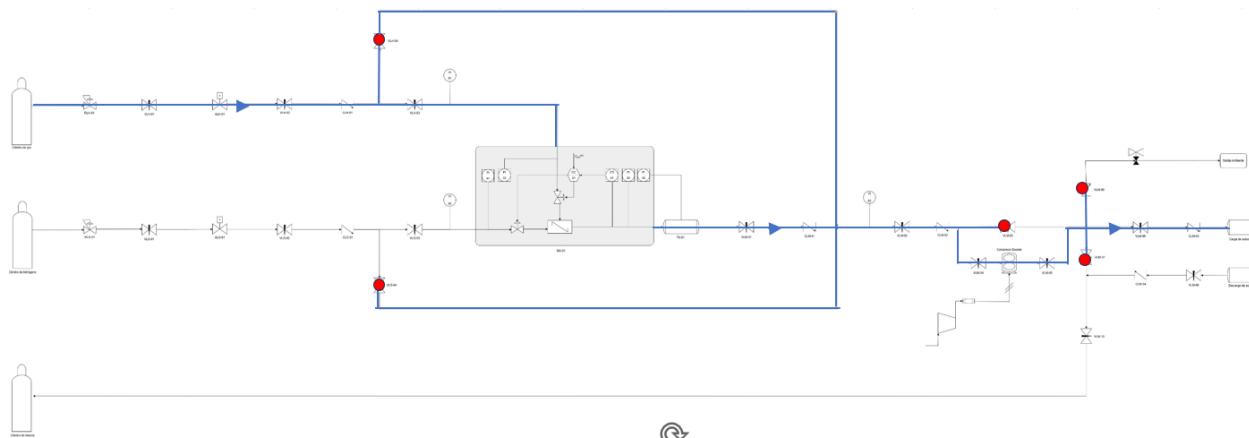


Fig. 8. Ruta del CH₄ durante el llenado

Configuración de válvulas cerradas:

- **VLH01** (válvula de aislamiento de la línea de hidrógeno)
- **VLM03** (válvula de salida de la purga del mezclador)
- **VLM09** (válvula de purga general del sistema)
- **VLM07** (válvula de control de flujo al compresor)

Proceso de Recuperación y Reciclaje de Mezcla de Gases desde Autoclaves

Para optimizar el uso de los gases y garantizar la seguridad operativa, se ha implementado un sistema de descarga controlada de las autoclaves hacia un cilindro de almacenamiento de mezcla. Este método permite la reutilización del gas residual tras los ensayos, minimizando pérdidas y reduciendo riesgos asociados a la liberación incontrolada de gases inflamables. El sistema está diseñado para permitir la transferencia del gas contenido en la autoclave hacia un cilindro de mezcla, evitando su venteo directo a la atmósfera. Este proceso se lleva a cabo de manera controlada a través de un conjunto de válvulas y reguladores de presión que garantizan un descenso progresivo de la presión en la autoclave sin generar sobrepresiones en la línea de almacenamiento.

Beneficios del Sistema de Recuperación

- Reducción de desperdicio de gases: Permite aprovechar la mezcla en lugar de desecharla, disminuyendo costos operativos.
- Mayor seguridad operativa: Evita el venteo directo de mezclas inflamables, reduciendo el riesgo de acumulaciones peligrosas en el área de trabajo.

- Optimización del proceso: Permite una gestión eficiente de los gases, manteniendo la estabilidad de la mezcla utilizada en pruebas sucesivas.
- Cumplimiento normativo y ambiental: Disminuye emisiones innecesarias y optimiza el uso de recursos energéticos.

Ruta de vaciado de autoclave mezcla:

Autoclave → Válvula de línea del mezclador (VLM08) → Check de línea del mezclador (CLM04) → Válvula de línea del mezclador (VLM10) → Cilindro de mezcla.

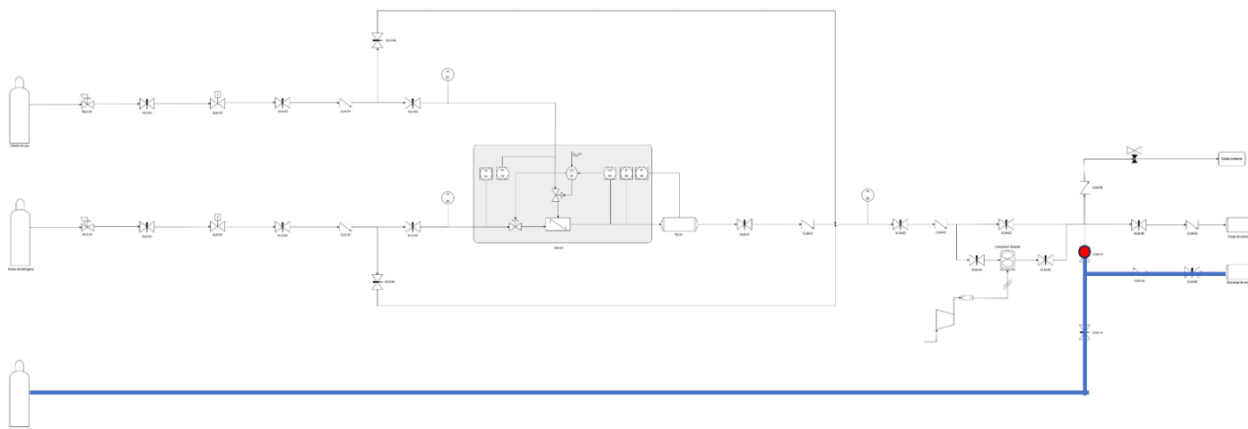


Fig. 9. Ruta de vaciado de autoclave mezcla

Configuración de válvulas cerradas:

- Válvula de línea del mezclador (VLM07) para evitar el retroceso del gas.

Estos indicadores funcionan como una guía operativa para el correcto uso del sistema de llenado de autoclaves y el proceso de purga, proporcionando instrucciones basadas en el diagrama P&ID. A partir de esta información, los operadores pueden determinar qué válvulas deben permanecer abiertas o cerradas en cada etapa del proceso, asegurando un funcionamiento seguro y eficiente del sistema.

Regulación de Presión y Mezcla de Gases en el Sistema de Suministro

Para garantizar un control seguro y eficiente del suministro de gases hacia el sistema de mezcla y posterior distribución, se implementarán medidas específicas de regulación de presión y seguridad en la red de tubing

Regulación de Presión y Seguridad en la Línea de Suministro

Debido a que los cilindros de gas comprimido operan a presiones elevadas, se instalarán dos válvulas reguladoras de presión en puntos estratégicos del sistema:

- Primera válvula reguladora: Se ubicará a la salida del cilindro comprimido, con el objetivo de reducir la presión inicial a un valor adecuado para el sistema de distribución y evitar sobrepresiones en la línea de conducción.
- Segunda válvula reguladora: Se instalará en la entrada del laboratorio, con la función de estabilizar la presión de los gases antes de su ingreso al sistema de mezcla.

Esta configuración permitirá que, cuando el sistema no esté en operación, la línea no permanezca presurizada con la presión total del cilindro, lo que minimizará el riesgo de fallos en la tubería y reducirá la carga mecánica sobre los accesorios y conexiones.

Mezclador de Gases KM 30 – WITT

Se implementará el mezclador de gases modelo KM 30 de la marca WITT, un equipo diseñado para la mezcla precisa de distintos gases industriales, permitiendo un control ajustable de las proporciones de los componentes. Aunque no está específicamente optimizado para la mezcla de gas natural e hidrógeno, su diseño modular lo hace adaptable a este tipo de aplicaciones, siempre que se respeten sus parámetros operativos.

Características Técnicas del Mezclador KM 30

- Presión máxima de operación: 20 bar
- Gases admitidos: Compatible con múltiples gases industriales, incluyendo CH₄ y H₂
- Rango de ajuste de mezcla: Configurable según los requerimientos del sistema
- Regulación de flujo: Equipada con válvulas de control para ajustar la proporción de gases
- Seguridad: Incorpora válvulas check para evitar retrocesos de gas en la línea
- Compatibilidad: Integrable con sistemas de monitoreo de flujo y presión

Funcionamiento y Aplicación

El mezclador KM 30 permite regular y controlar la proporción de gases antes de su distribución al compresor y las autoclaves. El gas natural y el hidrógeno ingresan al equipo a través de líneas independientes, donde se ajusta su caudal según los valores establecidos en el sistema de control. Posteriormente, la mezcla homogénea es enviada a la siguiente etapa del proceso.

Para garantizar un funcionamiento seguro, es fundamental que la presión de entrada no supere los 20 bar, por lo que se instalará una válvula reguladora de presión en la entrada del

laboratorio. Esta medida evitará sobrepresiones que puedan comprometer la integridad del mezclador y asegurarán una operación estable y eficiente. Además, la diferencia entre la presión de entrada de los dos gases no debe ser mayor a 3 bares, con el fin de evitar fluctuaciones en el sistema que puedan afectar la homogeneidad de la mezcla y generar variaciones en el caudal de salida.

El KM 30 se integra dentro de un sistema más amplio de control de gases, que incluye sensores de presión, válvulas de seguridad y mecanismos de purga para evitar acumulaciones residuales de gases en la línea. Su implementación garantiza una mezcla confiable y segura para los procesos en el laboratorio.[28]

Pruebas de Exposición y Permeación en Materiales

En el estudio de la interacción entre el hidrógeno y los materiales estructurales utilizados en sistemas de alta presión, se realizan dos pruebas fundamentales: **la prueba de exposición y la prueba de permeación**. Ambas permiten evaluar el comportamiento de los materiales en presencia de hidrógeno, identificando posibles efectos como la fragilización y la alteración de sus propiedades mecánicas. Cabe destacar que el tamaño de las autoclaves utilizadas en cada prueba es diferente, siendo los de permeación de menor tamaño. Asimismo, las condiciones de presión y temperatura pueden variar dependiendo del objetivo del ensayo y la aplicación del material en estudio.

Prueba de Permeación

La prueba de permeación tiene como objetivo caracterizar la difusión del hidrógeno a través del material en condiciones controladas. Para ello, se utiliza una autoclave en el que se instala una “tapa” fabricada con el material de prueba. Durante el ensayo, se introduce hidrógeno a una presión específica y se mide su comportamiento en función del tiempo mediante técnicas electroquímicas.

Los principales parámetros evaluados en esta prueba incluyen:

Difusividad del hidrógeno: Determina la velocidad a la que el gas atraviesa el material.

Permeabilidad: Evalúa la cantidad de hidrógeno que logra atravesar la muestra en una unidad de tiempo.

Concentración del hidrógeno en el acero: Permite analizar la acumulación del gas en el material y su impacto en la microestructura.

Esta prueba es crucial para la selección de materiales en aplicaciones donde la exposición prolongada al hidrógeno podría comprometer la integridad estructural del sistema.

Prueba de Exposición

La prueba de exposición busca evaluar el comportamiento de los materiales en una atmósfera controlada con hidrógeno, sometiéndolos a condiciones específicas de presión y temperatura. En este ensayo, las probetas son colocadas en un ambiente con hidrógeno y expuestas durante un tiempo determinado para evaluar posibles alteraciones en sus propiedades mecánicas.

Tras la exposición, las muestras son sometidas a diferentes ensayos destructivos y no destructivos, tales como:

- Ensayo de impacto: Determina la tenacidad del material después de la exposición.
- Ensayo de tensión: Evalúa cambios en la resistencia mecánica y ductilidad.
- Metalografía: Analiza la microestructura del material en busca de posibles efectos de fragilización.

Estos ensayos permiten evaluar la compatibilidad del material con atmósferas ricas en hidrógeno y determinar su idoneidad para aplicaciones en sistemas de transporte, almacenamiento y manipulación de gases a alta presión.

Estimación de Costos en la Operación del Laboratorio

La evaluación de costos en la operación del laboratorio es un aspecto fundamental para garantizar su sostenibilidad económica y la correcta planificación de recursos. Para ello, se deben considerar todos los aspectos involucrados en el funcionamiento del laboratorio, incluyendo servicios, insumos, personal y costos administrativos. En este análisis, se diferencian dos grandes categorías: costos directos (asociados a la ejecución de pruebas y servicios específicos) y costos indirectos (relacionados con la infraestructura y el mantenimiento general de la operación).

Se especifica que los rubros han sido identificados, pero aún no se dispone de una estimación precisa de sus costos.

B. Costos Directos

Los costos directos corresponden a aquellos que pueden atribuirse directamente a la ejecución de las pruebas realizadas en el laboratorio.

1) Materia Prima e Insumos

Para la correcta realización de los ensayos, se requiere de insumos específicos, los cuales incluyen:

- Gases utilizados en las pruebas, como hidrógeno, nitrógeno y gas natural.
- Cilindros de almacenamiento y distribución de gases.
- Probetas y muestras de materiales de prueba.
- Reactivos y soluciones químicas para análisis de permeación y exposición.

2) Equipamiento y Mantenimiento

El uso de equipos especializados en la manipulación de gases y en la ejecución de ensayos experimentales requiere de mantenimiento continuo para su correcto funcionamiento. Los costos asociados incluyen:

- Equipos como autoclaves, mezcladores de gases y compresores.
- Sensores, manómetros y medidores de flujo.
- Costos de calibración y mantenimiento preventivo.

3) Mano de Obra Directa

El personal técnico especializado es un factor clave en la ejecución de los ensayos. Los costos relacionados incluyen:

- Salarios de técnicos y operarios especializados en manipulación de gases y ensayos de materiales.
- Costos de capacitación técnica periódica.
- Honorarios de especialistas en análisis de materiales.

4) Consumo de Energía y Recursos

El funcionamiento del laboratorio conlleva un consumo energético significativo, por lo que se consideran los siguientes costos:

- Consumo eléctrico asociado al funcionamiento de los equipos.
- Uso de agua en sistemas de enfriamiento o acondicionamiento de muestras.
- Costos de gas y combustibles utilizados en los sistemas auxiliares.

5) Manejo de Residuos y Desechos

El manejo adecuado de los residuos generados durante los ensayos es fundamental para el cumplimiento de normativas ambientales. Entre los costos asociados se incluyen:

- Disposición segura de gases residuales.
- Tratamiento de residuos químicos o físicos generados en las pruebas.
- Costos asociados al cumplimiento de normativas ambientales y de seguridad industrial.

C. Costos Indirectos

Los costos indirectos corresponden a aquellos gastos que, si bien no están directamente asociados a un ensayo específico, son esenciales para la operación del laboratorio.

1) Gastos Administrativos

La gestión del laboratorio requiere de un soporte administrativo que permita su operatividad eficiente. Entre los costos administrativos se incluyen:

- Salarios del personal administrativo.
- Licencias de software de gestión y monitoreo de ensayos.
- Auditorías contables y financieras.
- Seguros y permisos operativos.

2) Infraestructura y Servicios Generales

El mantenimiento y operación del laboratorio requieren de costos asociados a:

- Arrendamiento o depreciación de las instalaciones.
- Mantenimiento de infraestructura, limpieza y seguridad.
- Servicios básicos como agua, electricidad, internet y telefonía.

3) Control de Calidad y Certificaciones

Para garantizar la fiabilidad de los ensayos, el laboratorio debe cumplir con estándares normativos. Entre los costos en esta categoría se incluyen:

- Certificaciones y cumplimiento de normativas internacionales (ISO, ASTM, entre otras).
- Auditorías internas y externas para garantizar la trazabilidad de los resultados.
- Capacitaciones en seguridad y calidad del personal.

4) *Logística y Transporte*

El transporte de materiales y gases es un aspecto clave en la operación del laboratorio, por lo que se deben considerar:

- Costo de transporte y distribución de cilindros de gas.
- Almacenamiento de muestras y repuestos.
- Costos de embalaje y envío de resultados a clientes o socios de investigación.

5) *Innovación y Desarrollo*

La actualización de los métodos de ensayo y la implementación de mejoras tecnológicas conllevan costos asociados a:

- Investigación de nuevos métodos de caracterización de materiales.
- Adquisición de nuevas tecnologías y actualización de equipos.
- Implementación de mejoras en seguridad y monitoreo de procesos.

6) *Cumplimiento Legal y Regulatorio*

El laboratorio debe cumplir con normativas nacionales e internacionales, lo que implica costos relacionados con:

- Cumplimiento de regulaciones ambientales y de seguridad.
- Trámites para permisos y licencias operativas.
- Consultorías especializadas en normativas y estándares del sector.

D. Resultados de los Cálculos de Masa de Gas para el Llenado del Sistema de Tubing y Autoclaves

Se ha determinado la cantidad de gas necesaria para llenar el sistema de tubing y las autoclaves de permeación y exposición. Para estos cálculos, se ha considerado una condición inicial de presión de 20 bares (2.000.000 pascales), establecida como límite operativo por motivos de seguridad y conforme a las especificaciones técnicas del mezclador, que define esta como su presión máxima admisible. Estas especificaciones de presión corresponden a las condiciones previas a la entrada del compresor (booster).

Estos valores son cruciales para la planificación y el control de la carga de gas, asegurando que el sistema funcione dentro de los márgenes seguros y evitando sobrepresiones que podrían

comprometer la integridad de los equipos. Además, la correcta estimación de la masa de gas involucrada permite gestionar eficientemente los recursos y evaluar los costos asociados al proceso.

Se desarrolló una herramienta en Excel que permite calcular la masa de gas requerida tanto para el tubing como para el llenado de cada autoclave de permeación y exposición. Esta herramienta opera a partir de datos de entrada como el volumen de las autoclaves, la temperatura, la presión, la longitud del tubing y otros parámetros relevantes. Los cálculos se realizan utilizando las ecuaciones de estado mostradas, considerando tanto el comportamiento ideal como el real del gas a través del factor de compresibilidad (Z) para mayor precisión en las estimaciones.

Ecuación Gas real

$$n = \frac{PV}{ZRT}$$

Ecuación Gas ideal

$$n = \frac{PV}{RT}$$

Datos		unidades
Diámetro interno	0,0044	m
Longitud tubing	70	m
Presión tubing	2000000	pa
Presión cilindro	1,50E+07	pa
Constante de gas	8,314	
Temperatura	298	K
Masa molar H2	2,016	g/mol
Masa molar N2	28,013	g/mol
Masa molar CH4	16,04	g/mol
Volumen autoclave expo	0,002	m3
Volumen autoclave expo	0,003	m3
Volumen autoclave permeación	0,002	m3
Presión de autoclave	2,4132E+07	pa
Volumen cilindro H2	0,4	m3
Volumen cilindro N2	0,4	m3
Volumen cilindro CH4	0,4	m3

Fig. 10, Datos iniciales

Cálculos Tubing		unidades
Volumen de gas	0,001064	m ³
Número mol gas	0,859205	mol
Masa gas H ₂	1,732158	g
Masa gas N ₂	24,068920	g
Masa gas CH ₄	13,781654	g

Fig. 11. Resultados cálculos de tubing

El volumen requerido para llenar el tubing de 70 metros de longitud se ha calculado como 0.001064 m³, equivalente a 1.064 litros.

La masa necesaria para completar este volumen, considerando el comportamiento de gases ideales debido a que el factor de compresibilidad (Z) es cercano a 1 a estas condiciones, es:

- Hidrógeno (H₂): 1.732 gramos
- Nitrógeno (N₂): 24.068 gramos
- Metano (CH₄): 13.781 gramos

La variación en la masa requerida entre los gases se explica por sus diferencias en masa molar. El hidrógeno, siendo el gas más liviano, requiere menor masa para alcanzar el mismo número de moles, mientras que el nitrógeno, con una masa molar más elevada, demanda una cantidad significativamente mayor de gas. El metano queda en una posición intermedia debido a su peso molecular.

1) Resultados de los Cálculos de las Autoclaves

Se han determinado los volúmenes y las condiciones de operación de las autoclaves utilizadas en las pruebas. Las autoclaves operan a una presión de 3500 psi, equivalente a 24,132,500 pascales (Pa). Los volúmenes correspondientes son:

- Autoclave de exposición: 0.002 m³
- Autoclave de exposición (segunda configuración): 0.003 m³
- Autoclave de permeación: 0.002 m³

Los cálculos realizados determinan la cantidad de moles de gas necesarios para llenar cada autoclave bajo las condiciones establecidas, utilizando la ecuación de estado de los gases ideales. Esta aproximación es válida debido a que el factor de compresibilidad Z , que representa la desviación del comportamiento de un gas real respecto al comportamiento ideal presenta valores cercanos a 1 en las condiciones de presión y temperatura consideradas. Esto indica que las fuerzas

intermoleculares y el volumen propio de las moléculas son despreciables, permitiendo asumir que el gas se comporta de manera ideal sin introducir errores significativos en los resultados.

Cálculos Autoclave		unidades
Número de mol gas Autoclave Expo	19,48036223	mol
Número de mol gas Autoclave Expo	29,22054334	mol
Número de mol gas Autoclave P	19,48036223	mol

Fig. 12. Resultados cálculos de moles en las autoclaves.

A continuación, se presenta la cantidad de masa, expresada en gramos, requerida para llenar las autoclaves con diferentes gases (hidrógeno, nitrógeno y metano) bajo una presión de 3500 psi, equivalente a 24.132.500 pascales (Pa).

Las tablas presentadas muestran la cantidad de masa, expresada en gramos, requerida para llenar la autoclave de exposición y permeación con un volumen de 0,002 m³ y 0,003 m³ para cada uno de los gases considerados (hidrógeno, nitrógeno y metano), bajo una presión de 3.500 psi (equivalente a 24.132.325 pascales) y una temperatura de 25°C.

Autoclave de exposición 0,002 m3		unidades
H2	39,27241025	g
N2	545,703387	g
CH4	312,4650101	g

Fig. 13. Resultados cálculos de gramos en las autoclaves 0,002 m3.

Autoclave de exposición 0,003 m3		unidades
H2	58,90861537	g
N2	818,5550805	g
CH4	468,6975151	g

Fig. 14. Resultados cálculos de gramos en las autoclaves 0,003m3.

Autoclave de permeación 0,002 m3		unidades
H2	39,27241025	g
N2	545,703387	g
CH4	312,4650101	g

Fig. 15. Resultados cálculos de gramos en las autoclaves.

Se ha realizado el cálculo detallado de la cantidad de moles y masa de los cilindros de 0.4 m³ para cada gas, expresada en gramos y kilogramos, contenida en cada cilindro de gas (H₂, N₂ y CH₄) bajo condiciones de presión de 15.000.000 Pa (150 bar) y temperatura de 25°C. La tabla muestra los resultados obtenidos, indicando la cantidad total de gas disponible en cada cilindro.

Gramos de gas en los cilindros						
Cilindro H ₂	2306,41	mol	4649,71	g	4,650	Kg
Cilindro N ₂	2201,57	mol	61672,55	g	61,67	Kg
Cilindro CH ₄	2018,10	mol	32370,40	g	32,37	Kg

Fig. 16. Gramos de gas en los cilindros.

A partir de estos valores, se determinó cuántas veces podría llenarse cada autoclave según su volumen y utilizando únicamente un tipo de gas. Para la autoclave de exposición y permeación con volumen de 0,002 m³, se obtuvieron las siguientes capacidades de llenado:

- H₂: 118 veces
- N₂: 113 veces
- CH₄: 103 veces

Para la autoclave de exposición con volumen de 0,003 m³:

- H₂: 78 veces
- N₂: 75 veces
- CH₄: 69 veces

Estos cálculos se basan en la carga con un solo tipo de gas, lo cual no representa el escenario real del proceso, ya que el objetivo es exponer las probetas a mezclas de gases (blending) y no a un solo componente puro. Estos resultados, sin embargo, ofrecen una referencia clara sobre la capacidad individual de cada gas y facilitan la planificación de las proporciones en las mezclas deseadas.

Basándose en las cotizaciones obtenidas, el costo del cilindro de nitrógeno es de 276.254,93 pesos colombianos, mientras que el cilindro de hidrógeno tiene un valor de 1.093.665 pesos colombianos. Al calcular el costo unitario por masa, se determina que cada gramo de nitrógeno tiene un costo de 4,4 pesos colombianos, mientras que el hidrógeno presenta un costo significativamente mayor, de 235 pesos colombianos por gramo. Esta diferencia sustancial se atribuye a los procesos más complejos asociados con la producción, almacenamiento y transporte

seguro del hidrógeno, dada su menor densidad y mayor reactividad en comparación con el nitrógeno.

concentraciones de mezclas			
H2	CH4	mezcla	unidades
0%	100%	16,04	g
2%	98%	15,75952	g
4%	96%	15,47904	g
6%	94%	15,19856	g
8%	92%	14,91808	g
10%	90%	14,6376	g
12%	88%	14,35712	g
14%	86%	14,07664	g
16%	84%	13,79616	g
18%	82%	13,51568	g
20%	80%	13,2352	g
25%	75%	12,534	g
30%	70%	11,8328	g
35%	65%	11,1316	g
40%	60%	10,4304	g
45%	55%	9,7292	g
50%	50%	9,028	g
55%	45%	8,3268	g
60%	40%	7,6256	g
65%	35%	6,9244	g
70%	30%	6,2232	g
75%	25%	5,522	g
80%	20%	4,8208	g
85%	15%	4,1196	g
90%	10%	3,4184	g
95%	5%	2,7172	g
100%	0%	2,016	g

Fig. 17. Variación de la masa de mezcla en función de la proporción H₂/CH₄.

El análisis de las masas se realiza bajo la condición de gas ideal, dado que la cantidad de masa de cada componente en la mezcla se determina multiplicando su porcentaje de participación por su respectiva masa molar. Los resultados obtenidos para distintas proporciones de hidrógeno y

metano muestran una reducción progresiva en la masa total de la mezcla a medida que aumenta la concentración de hidrógeno. Esta tendencia es consistente con la diferencia en las masas molares de ambos gases (2.016 g/mol para el hidrógeno y 16.04 g/mol para el metano). La tabla resultante proporciona una referencia clave para ajustar la carga de gas en función de la proporción deseada, optimizando la planificación y ejecución de pruebas experimentales en las autoclaves.

2) Resultados de Pérdidas de Presión en Líneas de Purga con Nitrógeno y Líneas de Autoclaves con Metano e Hidrógeno

En esta sección de análisis de presión, es fundamental diferenciar entre las dos principales fuentes de pérdida de presión en el sistema: las pérdidas por accesorios y las pérdidas por tuberías.

Las pérdidas de presión en accesorios, como válvulas, codos y conexiones, tienen una función predominante en el control del flujo, ya que generan caídas de presión significativas debido a los cambios bruscos en la dirección del fluido y a las restricciones internas. En este sentido, es esencial establecer límites operativos de presión mediante el uso de válvulas reguladoras, las cuales permiten mantener condiciones seguras y evitar sobrepresiones que puedan comprometer la integridad del sistema.

Por otro lado, las pérdidas de presión en tuberías son el resultado de la fricción del fluido con las paredes internas del conducto y suelen ser menores en comparación con las pérdidas generadas por los accesorios. No obstante, el cálculo de estas pérdidas es crucial, especialmente en sistemas de gases comprimidos, donde la variación de presión puede afectar el régimen de flujo y la eficiencia del transporte del fluido.

Para evaluar correctamente estas pérdidas, se utilizan ecuaciones como la de Darcy-Weisbach para pérdidas distribuidas en tuberías y el coeficiente de pérdida de carga para accesorios. Este análisis permite dimensionar adecuadamente el sistema, prever posibles restricciones en el flujo y garantizar que la presión disponible en el punto de destino sea suficiente para el correcto funcionamiento de los equipos aguas abajo.

Se trabajó con una velocidad de descarga elevada para evaluar el comportamiento del gas dentro del sistema y analizar las pérdidas por fricción a lo largo de la tubería y accesorios. Este enfoque permitió llevar el sistema a un escenario crítico, donde las condiciones extremas de flujo evidenciaron los efectos de la caída de presión, la disipación de energía y el impacto de la fricción en la estabilidad operativa.

El gas almacenado en el cilindro se encuentra presurizado a 15.000.000 Pa (150 bar) y, antes de ingresar al sistema, su presión es regulada hasta 2.000.000 Pa (20 bar) mediante una válvula reductora de presión. Esta regulación es necesaria, ya que 2.000.000 Pa representa la presión máxima permitida en el mezclador, garantizando así una operación segura y estable dentro de los límites de diseño del sistema.

En el desarrollo del análisis de pérdidas de presión en el sistema de distribución de gases, se establecieron las siguientes condiciones iniciales y parámetros operativos. El sistema de tubing cuenta con un diámetro interno de 4.4 mm y una longitud total de 70 metros, con líneas individuales destinadas al transporte de hidrógeno, gas natural y nitrógeno. Los cilindros de almacenamiento de estos gases presentan una presión inicial de 15 MPa (15.000.000 Pa) y un volumen de 0,4 m³, con una velocidad de salida del gas de 20 m/s.

Para evaluar las pérdidas de presión en el sistema, se consideraron tanto las pérdidas distribuidas como las localizadas. El factor de fricción del tubing, suministrado por el fabricante, es de 0.015. En cuanto a las pérdidas localizadas, se emplearon coeficientes de pérdida de carga (K) para los accesorios presentes en la instalación, proporcionados por el fabricante. En particular, las válvulas de aguja de ángulo recto presentan un coeficiente K de 5, mientras que los codos a 90° de radio corto tienen un coeficiente K de 0.90. Estos parámetros fueron incorporados en los cálculos para determinar la caída de presión a lo largo del sistema y su impacto en la eficiencia del transporte de los gases involucrados.

En este análisis se evalúan las pérdidas de presión a lo largo de las tuberías y accesorios para diferentes secciones del sistema: línea de purga con nitrógeno, líneas de autoclaves con metano e hidrógeno. El objetivo es garantizar que las condiciones finales de presión sean suficientes para la operación segura y eficiente de las autoclaves.

Ecuación de flujo masico transitorio

$$\dot{m}(t) = -\frac{k}{V}m(t)$$

Datos de entrada		unidades
Presión tubing	2,00E+06	Pa
Presión cilindro	1,50E+07	Pa
Masa molar	0,01604	Kg/mol
R- constante gas universal	8,31	
Temperatura	298	k
Diámetro interno	4,4	mm
Gama – Factor isentrópico	1,31	
R- constante gas especifico	518,3	J/kg*k
K-valvula	5	6
K-codos	0,9	10
Velocidad	20	m/s
Longitud	70	m
Gravedad	9,81	m/s ²
Factor de fricción	0,015	
Diámetro interno	0,0044	m
Tiempo	10	S
volumen de cilindro	0,4	m ³

Fig. 18. Datos de entrada línea de metano.

Cálculos		
Densidad de CH4	12,94816054	kg/m3
hf-tuberia	4865	m
hk-valve	611,6207951	m
hf-codos	183,4862385	m
hf+hk-v+hf-c	5660	m
ΔPerdida de presión	718976	pa
Pérdidas de presión	104	psi
Presión de salida ant mix	1281023,959	pa
Área de salida	1,52053E-05	m ²
K	0,0014114642	
P(t)	14479930,62	pa
	2100,140178	psi
M(t)	37,49980414	kg
mpunto	-1,323240791	

Fig. 19. Calculos línea de metano.

La tabla muestra los resultados de los cálculos realizados para el flujo de metano (CH_4) a través de la tubería y sus accesorios. La densidad del metano se determinó en $12,9 \text{ kg/m}^3$.

Masa en función del tiempo para la descarga del cilindro

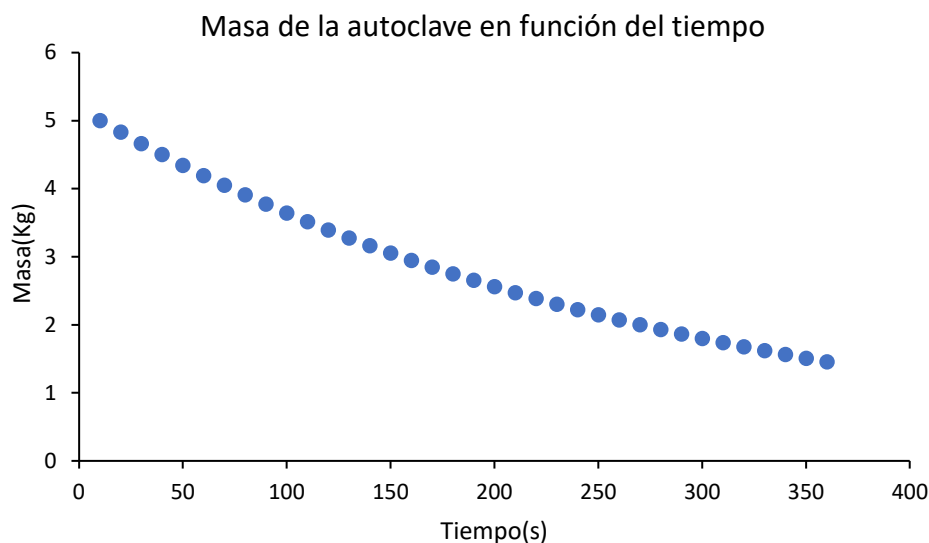


Fig. 20. Masa en función de tiempo de cilindro de metano.

Las pérdidas de carga se desglosan en tres componentes principales: 4865 m de pérdida por fricción en la tubería (hf-tubería), 611,62 m de pérdida en la válvula (hk-valve), y 183,48 m debido a los codos (hf-codos), dando una pérdida total acumulada de 5660 m. Esta resistencia genera una caída de presión total de 718976 Pa (104 psi).

Debido a esta caída, la presión de salida antes de la mezcla se calcula en 1281023,96 Pa (185,86 psi).

El análisis de flujo masico muestra que, tras 10 segundos de operación, la masa total descargada del cilindro alcanza 37,5 kg, con una tasa de flujo másico de $-1,32 \text{ kg/s}$, indicando una reducción progresiva de la masa en el cilindro. Se tiene en cuenta que estos cálculos se llevan al vaciado del cilindro a la atmosfera. ya que el gas permanece presurizado dentro del tubing y no se descarga directamente a la atmósfera, sino hacia la autoclave, la cual también se encuentra presurizada. Esto implica que la transferencia de gas no ocurre en condiciones de expansión libre, sino en un sistema donde tanto el tubing como la autoclave mantienen una presión controlada. Lo cual la descarga del cilindro será a menor proporción.

Datos de entrada		Unidades
Presión tubing	2000000	Pa
Presión cilindro	15000000	Pa
Masa molar	0,0280134	Kg/mol
R- constante gas universal	8,34	
Temperatura	298	k
Diámetro interno	4,4	mm
Gama- Factor isentrópico	1,4	
R- constante gas especifico	296,8	J/kg*k
K-valvula	5	6
K-codos	0,9	10
Velocidad	20	m/s
Longitud	70	m
Gravedad	9,81	m/s ²
Factor de fricción	0,015	
Diámetro interno	0,0044	m
Tiempo	10	S
volumen de cilindro	0,4	m ³

Fig. 21. Datos de entrada de línea de nitrógeno.

Cálculos		
Densidad de N2	22,54309304	kg/m3
hf-tuberia	4865	m
hk-valve	611,6207951	m
hf-codos	183,4862385	m
hf+hk-v+hf-c	5660	m
Δ Perdida de presión	1251756	pa
Pérdidas de Presión	182	psi
Presión de salida ant mix	748243,5245	pa
Área de salida	1,52053E-05	m ²
K	0,0008529478	
P(t)	14683530,71	pa
	2129,669927	psi
m(t)	66,40645953	kg
mpunto	-1,416031124	

Fig. 22. Resultados línea nitrógeno.

La tabla muestra los resultados detallados de los cálculos realizados para el flujo de nitrógeno (N_2) a través de la tubería y sus accesorios. La densidad del nitrógeno se determinó en $22,54 \text{ kg/m}^3$, un valor crucial para calcular la masa total de gas involucrada en el proceso.

Masa en función del tiempo para la descarga del cilindro

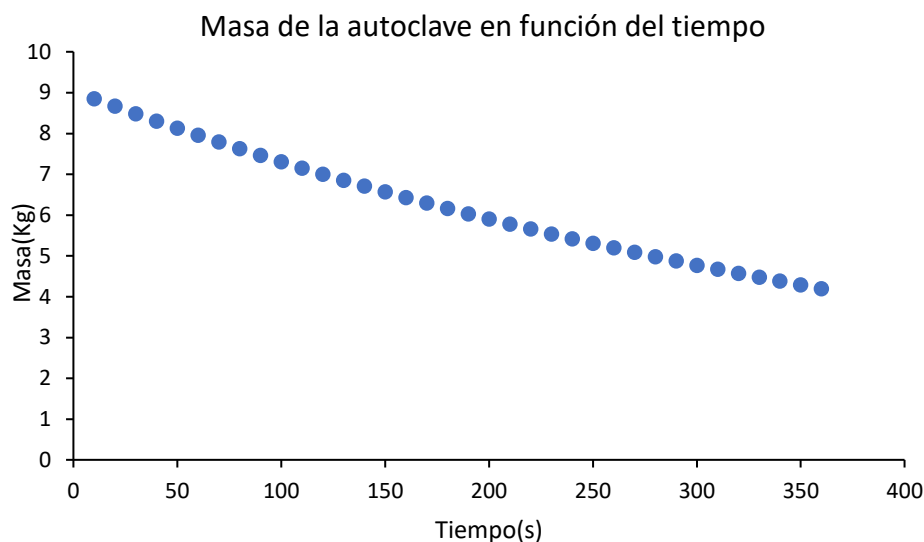


Fig. 23. Masa en función de tiempo de cilindro de nitrógeno.

Las pérdidas de carga se distribuyen en tres componentes principales: 4865 m de pérdida por fricción en la tubería (hf-tubería), 611,62 m por la válvula (hk-valve), y 183,48 m por los codos (hf-codos), dando una pérdida total acumulada de 5660 m. Esto genera una caída de presión total de $1.251.756 \text{ Pa}$ (182 psi).

Como resultado, la presión de salida antes de la mezcla quedó en $748.243,52 \text{ Pa}$ (108,54 psi).

En cuanto a la masa descargada, tras 10 segundos de purga, la masa total liberada alcanzó 66,4 kg, con una tasa de flujo másico de $-1,42 \text{ kg/s}$, mostrando una reducción constante en la masa del cilindro a medida que avanza el proceso.

Estos resultados permiten evaluar el tiempo necesario para completar la purga y ajustar la eficiencia del proceso según las condiciones deseadas.

Datos de entrada		Unidades
Presión tubing	2000000	Pa
Presión cilindro	15000000	Pa
Masa molar	0,002016	Kg/mol
R- constante gas universal	8,34	
Temperatura	298	k
Diámetro interno	4,4	mm
Gama- Factor isentrópico	1,41	
R- constante gas especifico	4124	J/kg*k
K-valvula	5	6
K-codos	0,9	10
Velocidad	20	m/s
Longitud	70	m
Gravedad	9,81	m/s ²
Factor de Fricción	0,015	
Diámetro interno	0,0044	m
Tiempo	10	S
volumen de cilindro	0,4	m ³

Fig. 24. Datos de entrada línea de Hidrogeno.

Cálculos		
Densidad de H2	1,6223263	kg/m3
hf-tuberia	4865	m
hk-valve	611,6207951	m
hf-codos	183,4862385	m
hf+hk-v+hf-c	5660	m
Δ Perdida de presión	90083	pa
Pérdidas de Presión	13	psi
Presión de salida ant mix	1909916,645	pa
Área de salida	1,52053E-05	m ²
K	0,0055051817	
P(t)	13071321,85	pa
	1895,838378	psi
m(t)	4,254461312	kg
mpunto	-0,585539565	

Fig. 25. Resultados línea de Hidrogeno.

La tabla presenta los resultados obtenidos para el flujo de hidrógeno (H_2) a través de la tubería y sus accesorios. La densidad del hidrógeno se calculó en $1,62 \text{ kg/m}^3$, reflejando su baja densidad en comparación con otros gases utilizados previamente.

Masa en función del tiempo para la descarga del cilindro

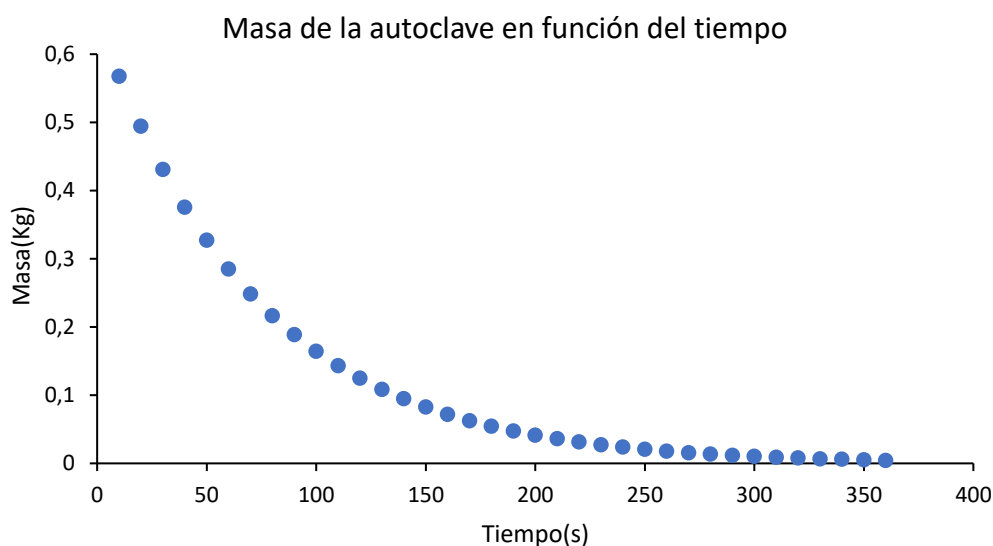


Fig. 26. Masa en función de tiempo de cilindro de hidrogen.

Las pérdidas de carga se distribuyeron en 4865 m por fricción en la tubería (hf-tubería), 611,62 m en la válvula (hk-valve), y 183,48 m en los codos (hf-codos), resultando en una pérdida total acumulada de 5660 m, similar a los casos anteriores. La pérdida de presión total alcanzó 90.083 Pa (13 psi), considerablemente menor debido a la menor densidad y viscosidad del hidrógeno.

La presión de salida antes de la mezcla quedó en 1.909.916,65 Pa (277 psi), manteniéndose más alta que en los otros gases.

Respecto a la masa descargada, tras 10 segundos de purga, se liberaron 4,25 kg de hidrógeno, con una tasa de flujo másico de $-0,586 \text{ kg/s}$, lo que evidencia que, a pesar de la velocidad de salida, la baja densidad limita la masa total expulsada.

3) Resultados software DWSIM

En esta simulación, se analiza la Compresión y Suministro de Hidrógeno y Metano para Autoclave: Descripción del Proceso y Control de Parámetros Operativos.

El diagrama representa un sistema de preparación y suministro de una mezcla de hidrógeno y metano hacia una autoclave, diseñado para operar bajo condiciones controladas de presión y flujo. El proceso inicia con la alimentación individual de ambos gases a través de líneas separadas, que convergen en el mezclador (MIX-1), donde se produce la homogenización de la mezcla. La corriente resultante es monitoreada en el punto "3", donde se registran propiedades clave como la presión, temperatura y flujo volumétrico de la mezcla antes de ingresar al compresor. El sistema cuenta con un compresor de pistón (C-1), encargado de incrementar la presión de la mezcla para alcanzar los valores operativos requeridos en la autoclave. El compresor recibe una potencia, suministrada por la fuente eléctrica E1, manteniendo una operación eficiente. Se escogió este compresor debido a su funcionamiento mediante aire comprimido en lugar de electricidad, lo que elimina el riesgo de generación de chispas y hace que sea una opción segura para la manipulación de gases inflamables como hidrógeno y metano. Esta característica permite su uso en entornos con riesgo de explosión (ATEX) sin requerir protecciones adicionales contra ignición. Posteriormente, la mezcla comprimida pasa por el punto de medición "5", donde nuevamente se monitorean sus propiedades para asegurar que se mantenga dentro de los parámetros esperados tras la compresión.

La mezcla continúa su trayectoria hacia la autoclave, donde se lleva a cabo el proceso bajo las condiciones establecidas. Finalmente, la corriente "7" sirve como indicador final de las condiciones de salida del gas, permitiendo evaluar la presión y temperatura remanentes, facilitando el control del sistema.

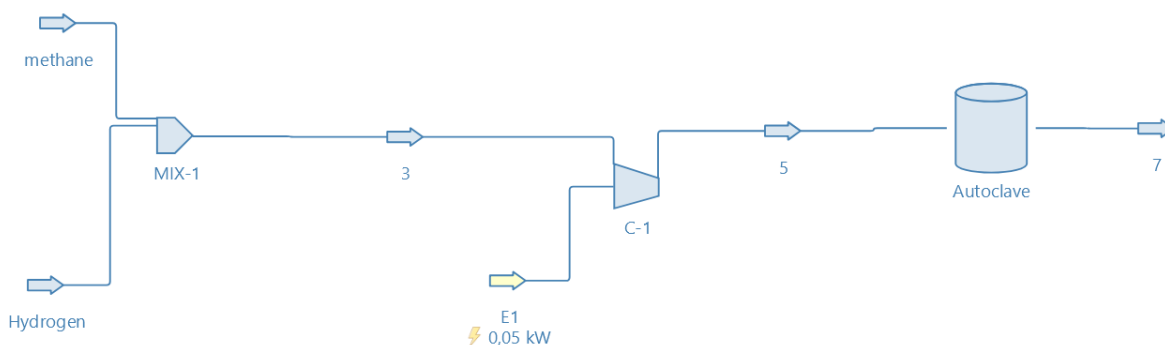


Fig. 27. Diagrama de simulación DWSIM.

Uno de los puntos clave en el sistema es la presión de operación del mezclador. La presión máxima de entrada permitida es de 20 bar (2,000,000 Pa o 290 psi), por lo que es necesario implementar una reducción de presión antes de su ingreso. Esta caída de presión es fundamental para garantizar un funcionamiento seguro y estable del mezclador, evitando sobrecargas en sus componentes y asegurando una correcta dosificación de los gases.

Datos de entrada a 5×10^{-5} m³/s,

Metano.

Especificaciones de Flash	Temperature and Pressure (TP) ▾	
Temperatura	298,15	K ▾
Presión	290,076	psi ▾
Flujo másico	0,000336899	kg/s ▾
Flujo molar	0,0210004	mol/s ▾
Flujo volumétrico	2,5E-05	m ³ /s ▾
Entalpía específica	-22,7351	kJ/kg ▾
Entropía específica	-1,59932	kJ/[kg.K] ▾
Fracción molar de fase de vapor	1	

Fig. 28. Datos de entrada de metano a 5×10^{-5} m³/s.

Hidrogeno

Especificaciones de Flash	Temperature and Pressure (TP) ▾	
Temperatura	298,15	K ▾
Presión	290,076	psi ▾
Flujo másico	4,0425E-05	kg/s ▾
Flujo molar	0,0200533	mol/s ▾
Flujo volumétrico	2,5E-05	m3/s ▾
Entalpía específica	-2,88535	kJ/kg ▾
Entropía específica	-12,3341	kJ/[kg.K] ▾
Fracción molar de fase de vapor	1	

Fig. 29. Datos de entrada de hidrogeno a 5×10^{-5} m3/s.

Datos de entrada a 5×10^{-6} m3/s,

Metano

Especificaciones de Flash	Temperature and Pressure (TP) ▾	
Temperatura	298,15	K ▾
Presión	290,076	psi ▾
Flujo másico	3,36899E-05	kg/s ▾
Flujo molar	0,00210004	mol/s ▾
Flujo volumétrico	2,5E-06	m3/s ▾
Entalpía específica	-22,7351	kJ/kg ▾
Entropía específica	-1,59932	kJ/[kg.K] ▾
Fracción molar de fase de vapor	1	

Fig. 30. Datos de entrada de metano a 5×10^{-6} m3/s.

Hidrogeno

Temperatura	298,15	K
Presión	290,076	psi
Flujo másico	4,0425E-06	kg/s
Flujo molar	0,00200533	mol/s
Flujo volumétrico	2,5E-06	m3/s
Entalpía específica	-2,88535	kJ/kg
Entropía específica	-12,3341	kJ/[kg.K]
Fracción molar de fase de vapor	1	

Fig. 31. Datos de entrada de hidrogeno a 5×10^{-6} m3/s.

Compresor

El compresor operará con una eficiencia adiabática del 75%, lo cual representa un valor inferior al estándar esperado para compresores de pistón, que suelen alcanzar eficiencias superiores al 80% debido a su diseño robusto y mejor control térmico durante la compresión. Esta diferencia implica una mayor pérdida de energía en forma de calor y un aumento en la potencia requerida para lograr la misma presión final. Razón, es para estimar de manera conservativa el incremento de temperatura generado durante el proceso de compresión.

El análisis se realizó utilizando una eficiencia adiabática reducida con el propósito de evaluar el sistema en condiciones críticas y analizar su comportamiento ante escenarios exigentes. Este enfoque permite determinar el impacto máximo del incremento de temperatura en el gas comprimido, asegurando que, incluso bajo estas condiciones extremas, el sistema continúe operando de manera segura y dentro de los parámetros de diseño. Por ello, se considera fundamental optimizar el sistema o evaluar la adquisición de un equipo con mayor eficiencia para mejorar el rendimiento global del proceso.

La simulación también permite evaluar la cantidad de energía requerida para comprimir la mezcla desde una presión inicial de 20 bar (2.000.000 Pa o aproximadamente 290 psi) hasta una presión final de 241.316 bar (24,131,600 Pa o aproximadamente 3.500 psi). Este análisis proporciona información clave para dimensionar el sistema de compresión, determinar la eficiencia energética y garantizar que el proceso cumpla con los requisitos de seguridad y desempeño establecidos y gastos energéticos del compresor.

El sistema operará considerando tiempos de llenado máximos y mínimos, establecidos en 10 minutos y 1 minuto respectivamente. El flujo másico correspondiente al tiempo máximo será de 5×10^{-6} m³/s, mientras que para el tiempo mínimo será de 5×10^{-5} m³/s. Esta configuración permitirá evaluar el comportamiento térmico del gas comprimido, analizando la variación de temperatura generada por el proceso de compresión, considerando la influencia de los diferentes regímenes de flujo y tiempos de operación sobre la eficiencia del compresor y la transferencia de calor.

El sistema fue evaluado con dos flujos volumétricos diferentes uno de 5×10^{-6} m³/s, diseñado para llenar la autoclave de 0.003 m³ en 10 minutos, y otro de 5×10^{-5} m³/s, que permite realizar el mismo llenado en solo 1 minuto

Flujo volumétrico máximo 5×10^{-5} m³/s,

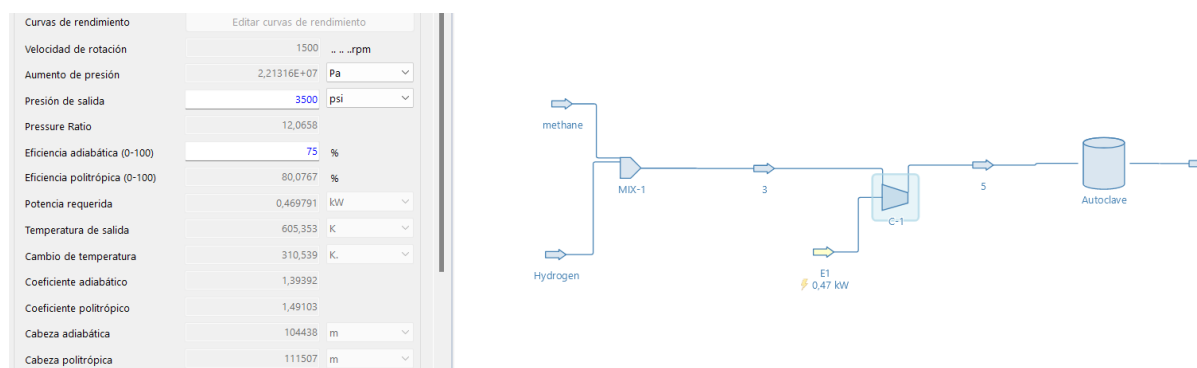


Fig. 32. Resultado del compresor a 5×10^{-5} m³/s.

El análisis del sistema de compresión muestra que el proceso opera con una eficiencia adiabática del 75%, lo que resulta en un aumento significativo de la temperatura del gas, alcanzando una temperatura de salida de 605,35 K, con un incremento de 310,53 K respecto a la temperatura de entrada. Esta condición refleja una mayor generación de calor durante la

compresión, influenciada por la eficiencia del equipo. La potencia requerida para alcanzar la presión de salida de 3500 psi es de 0,47 kW.

Flujo volumétrico mínimo 5×10^{-6} m³/s

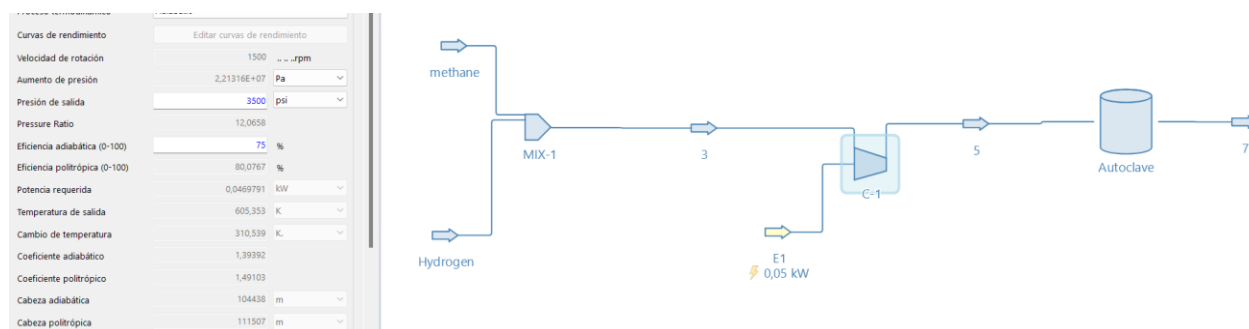


Fig. 33. Resultado del compresor a 5×10^{-6} m³/s.

La simulación realizada considera un flujo másico de $5e-6$ m³/s, correspondiente a las condiciones necesarias para llenar la autoclave de 0.003 m³ en un tiempo de 10 minutos. Se alcanzó una presión de salida de 3500 psi con una eficiencia adiabática del 75%, requiriendo una potencia de 0,05 kW. La temperatura de salida resultante fue de 605.351 K, reflejando un incremento de 310,53 K respecto a la temperatura inicial. Estos valores permiten analizar el comportamiento térmico del sistema y la respuesta del compresor bajo estas condiciones específicas de flujo, asegurando que el proceso de llenado en la autoclave opere dentro de los límites establecidos para la seguridad y el rendimiento del equipo.

El análisis comparativo entre los dos escenarios de flujo volumétrico ($5e-6$ m³/s y $5e-5$ m³/s)

Flujo Volumétrico Alto (5×10^{-5} m³/s)

Con este flujo más elevado, el tiempo de llenado del sistema se reduce drásticamente a 1 minuto, lo que genera un aumento en la velocidad de compresión y en la demanda de potencia del compresor. Sin embargo, a pesar de esta mayor exigencia energética y de la rapidez del proceso, la temperatura final del gas comprimido es 605.35 K

Flujo Volumétrico Bajo (5×10^{-6} m³/s)

En este escenario, el proceso de compresión ocurre de manera más gradual, lo que permite un control más estable y una menor demanda de potencia. La velocidad de expansión del gas dentro del sistema es reducida. A pesar de estas condiciones, la temperatura final del gas comprimido se

mantiene en 605.35 K, lo que indica que el compresor no experimenta una variación térmica significativa al operar con este flujo más bajo.

La comparación entre ambos escenarios demuestra que, aunque la velocidad de compresión varía considerablemente, la transferencia de temperatura del compresor hacia el gas permanece constante, indicando que el proceso sigue un comportamiento térmico estable. Esto sugiere que el compresor opera con una eficiencia adiabática uniforme, sin verse afectado por cambios en el flujo volumétrico. Además, la ausencia de un aumento significativo en la temperatura de salida reduce el riesgo de sobrecalentamiento, protegiendo la integridad de los materiales y asegurando una operación confiable dentro de los parámetros establecidos.

Es crucial considerar que la temperatura de autoignición del hidrógeno es de aproximadamente 858 K (585 °C). En ambos escenarios evaluados, las temperaturas de salida alcanzadas se mantienen por debajo de este umbral.

Datos de salida monitor#3

Temperatura	294,814	K	▼
Presión	290,076	psi	▼
Flujo másico	3,77324E-05	kg/s	▼
Flujo molar	0,00410537	mol/s	▼
Flujo volumétrico	5,00389E-06	m ³ /s	▼
Entalpía específica	-8,88145	kJ/kg	▼
Entropía específica	-1,14369	kJ/[kg.K]	▼

Fig. 34. Datos de salida monitor #3.

Datos de salida monitor#7

Temperatura	605,353	K
Presión	3500	psi
Flujo másico	3,77324E-05	kg/s
Flujo molar	0,00410537	mol/s
Flujo volumétrico	9,18374E-07	m ³ /s
Entalpía específica	1210,23	kJ/kg
Entropía específica	-0,620596	kJ/[kg.K]

Fig. 35. Datos de salida monitor #7.

Al comparar los resultados obtenidos en el monitor número 3 con los datos finales del sistema, se observa una transición coherente y esperada a lo largo del proceso. Inicialmente, el punto 3 refleja condiciones previas a la compresión, con una presión baja de 290,076 psi, entalpía específica negativa (-8,88145 kJ/kg), y un flujo volumétrico relativamente mayor (5,00389E-06 m³/s), lo cual es consistente con un gas menos denso y sin haber sido sometido aún a trabajo mecánico.

Tras el paso por el compresor de pistón, los resultados finales muestran una notable transformación: la presión alcanza los 3500 psi, la entalpía específica aumenta considerablemente a 1210,23 kJ/kg debido al aporte de energía durante la compresión, y el flujo volumétrico cae a 9,18374E-07 m³/s, reflejando la reducción de volumen asociada al incremento de la presión.

A pesar de estas variaciones, tanto el flujo másico (3,77324E-05 kg/s) como el flujo molar (0,00410537 mol/s) se mantienen constantes, lo que valida la conservación de la masa en el sistema. La entropía específica, por su parte, experimenta un ligero aumento de -1,14369 kJ/[kg·K] a -0,620596 kJ/[kg·K], señalando una leve irreversibilidad inherente al proceso de compresión. Finalmente, la fracción molar de fase de vapor permanece en 1, asegurando que la mezcla sigue completamente en fase gaseosa a lo largo de todo el proceso.

Estos resultados confirman que el sistema opera de acuerdo con los principios termodinámicos esperados, mostrando un comportamiento adecuado en la mezcla, la compresión y la transferencia de energía, sin pérdidas significativas de masa o cambios de fase no deseados.

KPIs para el Almacenamiento y Distribución de Hidrógeno.

El hidrógeno es un elemento clave en la transición hacia una energía más limpia debido a su alta densidad energética y versatilidad como combustible. Sin embargo, para aprovechar al máximo su potencial, es fundamental contar con sistemas eficientes de almacenamiento y distribución. El hidrógeno puede almacenarse de diferentes formas como gas comprimido, líquido o a través de transportadores químicos, cada una con sus propios desafíos técnicos y económicos.

La distribución del hidrógeno también desempeña un papel vital, utilizando tuberías, tanques de alta presión o métodos de transporte en estado líquido para garantizar que llegue de manera segura y eficiente a los usuarios finales. El rendimiento de estos sistemas se evalúa mediante Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) que miden la capacidad, eficiencia energética, costos y seguridad.

Una infraestructura sólida de hidrógeno, que combine soluciones de almacenamiento efectivas con redes de distribución confiables, es esencial para respaldar sectores como el transporte, la generación de energía y la industria, impulsando así una economía baja en carbono. [29], [30]

No	Parámetro	Unidad	SoA-2020	Objetivos- 2024	Objetivos- 2030
	Gasoducto de hidrogeno				
1	Inversion de capital total	M€/km	1,1	1	0,9
2	Presión de transmisión	bar	90	100	120
3	Fugas de H2	%	n/a	0	0

Fig. 36. KPIS.

Recomendaciones generales para infraestructuras de transporte de hidrógeno: Es necesario desarrollar indicadores clave de rendimiento (KPI) para las tuberías de H₂, tomando como referencia el volumen de transporte previsto en Europa para 2030 (capacidad de la red, dimensiones de las tuberías y costos asociados al transporte).

Indicador 1: En el caso de una tubería con un diámetro de 8 pulgadas, sin incluir el derecho de paso, se considera una construcción nueva exclusivamente para hidrógeno.

Indicador 3: Proporción de hidrógeno movilizado a través de la red.

Indicador 4: Carga útil = volumen de hidrógeno almacenado en el remolque.

Indicador 5: El riesgo de corrosión interna y externa se mantiene en niveles mínimos gracias a la selección de materiales específicamente diseñados y certificados para la exposición y transporte de hidrógeno. Estos materiales presentan alta resistencia a la fragilización por hidrógeno y cumplen con normativas internacionales

Indicador 6: Con un flujo volumétrico de entrada de $5e-6$ m³/s y un tiempo de llenado de 10 minutos (0.1667 horas), el compresor opera con una potencia de 0.05 kW. El precio de la energía eléctrica es de 1400 COP por kWh, el consumo total de energía durante el proceso de llenado es de 0.0083 kWh, resultando en un costo de 11.62 COP.

Indicadores 7: Con un flujo volumétrico de entrada de 5×10^{-5} m³/s y un tiempo de llenado de 1 minuto, el compresor opera a una potencia de 0.47 kW. El consumo energético total para este proceso es de 0.00785 kWh, resultando en un costo de 11 COP por ciclo de llenado, considerando una tarifa eléctrica de 1400 COP/kWh.

Indicador 8: Cilindro de hidrogeno presión mínima operativa: 2,090,000 Pa (303 psi).

Cambio o recarga al alcanzar esta presión para mantener el suministro estable.

Indicador 9: Cilindro de Metano presión mínima operativa: 2,710,000 Pa (393 psi)

Cambio o recarga al alcanzar esta presión para mantener el suministro estable.

Indicador 10: Cilindro de Nitrógeno presión mínima operativa: 3,255,000 Pa (472 psi).

Cambio o recarga al alcanzar esta presión para mantener el suministro estable.

Indicador 11: Costo de llenado de la autoclave de 0.002 m³

Costo total en pesos colombianos para llenar la autoclave de 0.002 m³ con nitrógeno.

Valor: 2,401 COP por llenado.

Indicador 12: Costo de llenado de la autoclave de 0.003 m³

Costo total en pesos colombianos para llenar la autoclave de 0.003 m³ con nitrógeno.

Valor: 3,600 COP por llenado.

Indicador 13: Costo de llenado de la autoclave de 0.002 m³

Costo total en pesos colombianos para llenar la autoclave de 0.002 m³ con hidrógeno.

Valor: 9,226 COP por llenado.

Indicador 14: Costo de llenado de la autoclave de 0.003 m³

Costo total en pesos colombianos para llenar la autoclave de 0.003 m³ con hidrógeno.

Valor: 13,871 COP por llenado

VIII. CONCLUSIONES

El modelo térmico cero dimensional desarrollado permitió evaluar el comportamiento de los gases dentro del sistema, analizando cómo las variables clave como la temperatura y la presión evoluciona al pasar por el compresor y durante los procesos de carga, descarga y venteo. Este modelo fue crucial para identificar los cambios térmicos más relevantes y obtener resultados representativos que sirvieron de base para definir indicadores clave de desempeño (KPIs) específicos para el proyecto. Entre estos resultados destacan la eficiencia del proceso de compresión, la pérdida térmica durante el venteo y la capacidad de mantener la mezcla de hidrógeno y gas natural en condiciones seguras y operativas dentro de la autoclave.

En cuanto a los indicadores clave de desempeño (KPIs), la revisión de fuentes técnicas permitió definir parámetros estratégicos para evaluar el rendimiento del sistema. Estos indicadores fueron diseñados para cuantificar la eficiencia global del proceso, la capacidad de almacenamiento y la estabilidad operacional bajo condiciones típicas de gasoductos y bancos de pruebas de autoclaves. Los KPIs desarrollados proporcionan una herramienta esencial para evaluar no solo el desempeño técnico del sistema, sino también su viabilidad económica y operativa a largo plazo. Entre los indicadores más relevantes se incluyen la eficiencia del almacenamiento, la pérdida de gas por venteo, la relación entre la presión de operación y la capacidad de carga, y los costos asociados a la operación del sistema. La adopción de estos KPIs, fundamentados en literatura técnica y estudios previos, garantiza una evaluación objetiva y cuantificable del sistema.

La revisión de la literatura resultó fundamental para establecer las bases teóricas y metodológicas que guiaron el desarrollo del proyecto. Este análisis permitió recopilar y comparar datos sobre las mejores prácticas en el manejo térmico y operativo de sistemas que involucran hidrógeno y gas natural, considerando tanto la seguridad como la eficiencia en diversas configuraciones industriales. La integración de estándares internacionales, como los establecidos por ISO, ASME y API, junto con estudios previos sobre el comportamiento térmico y dinámico de gases comprimidos en sistemas cerrados, proporcionó una perspectiva robusta para fundamentar el diseño y la modelización del sistema.

En el marco experimental, se prevé la ejecución de pruebas de impacto y permeación en autoclaves expuestas a diferentes mezclas de hidrógeno y gas natural a distintas concentraciones. Dichas pruebas permitirán analizar la resistencia mecánica, la capacidad de los materiales para

contener el gas sin sufrir pérdidas por difusión y la evaluación de posibles fallas inducidas por la exposición prolongada al hidrógeno.

La combinación de los enfoques teóricos, normativos y experimentales asegura que el modelo térmico propuesto no solo cumpla con los estándares, sino que también permita evaluar de manera integral la resistencia, permeabilidad y desempeño de los materiales involucrados en el manejo de mezclas de hidrógeno y gas natural.

El análisis térmico transitorio, junto con la evaluación del compresor, permitió asegurar que el sistema opera bajo condiciones seguras, manteniendo la temperatura del hidrógeno por debajo de su punto de autoignición. La eficiencia adiabática del 75%, aunque inferior a los valores típicos de compresores de pistón, resulta beneficiosa para controlar la temperatura del gas, reduciendo el riesgo de combustión espontánea y preservando la integridad del sistema a lo largo de los ciclos operativos. Estos resultados proporcionan una base sólida para optimizar el proceso, equilibrando la eficiencia energética con la seguridad térmica y la durabilidad de los materiales involucrados.

Uno de los puntos críticos identificados fue la posibilidad de alcanzar la temperatura de autoignición del hidrógeno, que ocurre a 585°C (858 K). Sin embargo, los resultados mostraron que, al operar con una eficiencia adiabática del 75%, la temperatura de salida del gas se mantiene por debajo de este límite, evitando el riesgo de autoignición. Es importante destacar que los compresores de pistón suelen alcanzar eficiencias adiabáticas superiores al 80%, lo que implica una menor transferencia de calor de parte del compresor, por tal motivo, se trabajó con valores críticos, los cuales dieron resultados viables para la operación segura del banco de pruebas del laboratorio en construcción.

Se debe considerar la reducción de la presión en la tubería (tubing) al salir del cilindro mediante una válvula reguladora, ajustando la presión a 290 psi (equivalente a 2.000.000 Pa). Esto es fundamental, ya que mantener la presión original del cilindro, que alcanza 2175 psi (15.000.000 Pa), implicaría cargar todo el sistema de tubing a esta alta presión, lo que representaría un riesgo significativo para la integridad de la instalación. La reducción controlada de la presión no solo protege la tubería de posibles fallas mecánicas o rupturas, también previene fugas de gas a alta presión que podrían derivar en condiciones peligrosas. Esta práctica es parte de una estrategia de seguridad industrial, donde la gestión de presiones busca minimizar el estrés sobre los componentes, prolongar la vida útil del sistema y garantizar la operación segura durante el proceso de transporte del gas.

Este proyecto servirá como base para una segunda fase enfocada en la evaluación de riesgos operativos, utilizando metodologías como HAZOP (Hazard and Operability Analysis) o PFMEA (Process Failure Mode and Effects Analysis). Ambas herramientas son esenciales para identificar, evaluar y mitigar posibles fallos en el sistema de compresión y distribución de hidrógeno y gas natural, asegurando su operación segura y eficiente.

IX. RECOMENDACIONES

El análisis comparativo de la presión mínima requerida en los cilindros de hidrógeno, metano y nitrógeno, considerando las pérdidas específicas en cada línea, permitió establecer diferencias clave en el comportamiento de cada gas dentro del sistema.

Para garantizar una presión estable de 2.000.000 Pa (290 psi) en el tubing, el hidrógeno presentó la menor exigencia de presión mínima en el cilindro, alcanzando 2.090*.000 Pa (303 psi) tras compensar una pérdida de 13 psi. Esta baja pérdida se debe a la densidad significativamente menor del hidrógeno, lo que reduce la resistencia al flujo dentro de la tubería

El metano, con una pérdida más considerable de 103 psi (equivalente a 709,160 Pa), requiere una presión mínima en el cilindro de 2.710.000 Pa (393 psi) para mantener la presión deseada en el tubing. Esta diferencia es atribuible a su mayor densidad y viscosidad en comparación con el hidrógeno, lo que incrementa la fricción interna y, por ende, las pérdidas de carga.

el nitrógeno, con una pérdida de 182 psi (1,254,824 Pa), demanda una presión mínima en el cilindro de 3,255,000 Pa (472 psi). Su mayor pérdida de presión está directamente relacionada con su densidad intermedia y la extensión de la línea.

Estas pérdidas son determinantes para establecer la presión mínima operativa de cada cilindro, es decir, hasta qué punto el cilindro puede continuar suministrando gas de manera segura y eficiente antes de quedar fuera de servicio. Al considerar las pérdidas acumuladas en el tubing y los accesorios de la línea, se define el momento en que la presión interna del cilindro ya no es capaz de vencer dichas pérdidas y mantener la presión requerida en el sistema.

Este estudio es fundamental para evitar situaciones de presión reducida que puedan afectar la estabilidad del procedimiento, asegurando que los cilindros sean extraídos o sustituidos antes de alcanzar un estado en el que su contribución sea deficiente. Esto facilita la optimización del manejo de los cilindros, incrementando al máximo su tiempo de funcionamiento efectivo sin poner en riesgo la seguridad o la eficacia del sistema.

Se sugiere la incorporación de dos válvulas check adicionales al esquema del plano P&ID con el objetivo de optimizar el proceso de llenado de las autoclaves y minimizar el consumo innecesario de gas asociado al llenado de un tramo de tubería que no aporta al proceso. Esta modificación permitiría aislar dicho segmento.

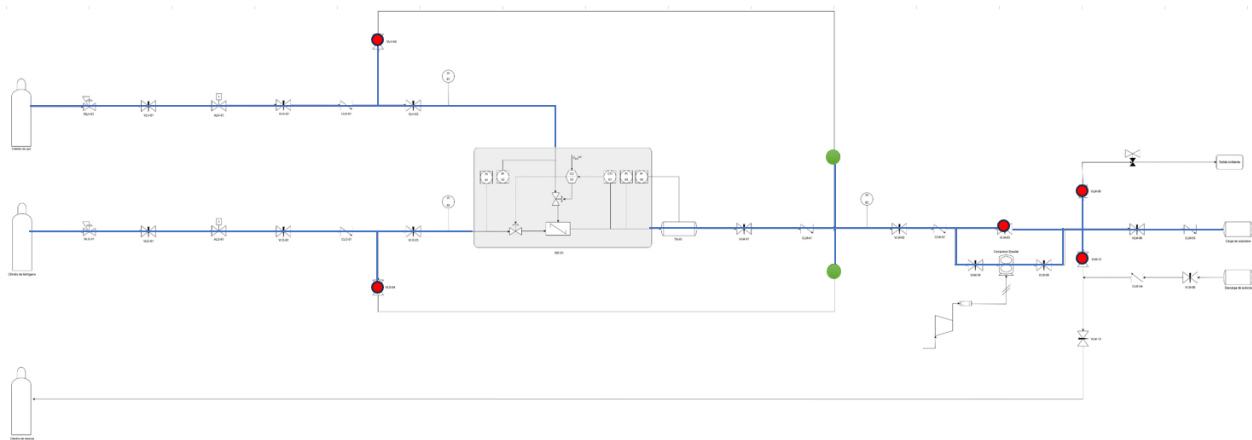


Fig. 37. Recomendación

La mejora propuesta se encuentra representada en el plano P&ID mediante elementos destacados en color verde, indicando la ubicación sugerida para la instalación de las dos válvulas check adicionales. Estas válvulas han sido incorporadas al diagrama para visualizar claramente su posición dentro del sistema y facilitar su análisis técnico.

La decisión final sobre la implementación dependerá de una evaluación por parte del personal técnico, considerando la ubicación definitiva del banco de pruebas, el costo asociado a la modificación y los aspectos de seguridad implicados. No obstante, esta recomendación se presenta como una mejora viable dentro del diseño propuesto y ha sido debidamente registrada para su análisis por parte de la CIC.

REFERENCIAS

- [1] “Minciencias | Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación.” Accessed: Oct. 29, 2024. [Online]. Available: <https://minciencias.gov.co/>
- [2] M. Farhan et al., “Performance, emissions and combustion analysis of hydrogen-enriched compressed natural gas spark ignition engine by optimized Gaussian process regression and neural network at low speed on different loads,” *Energy*, vol. 302, p. 131857, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.ENERGY.2024.131857.
- [3] F. Halter, C. Chauveau, and N. Djebaïli-Chaumeix, “Characterization of the effects of hydrogen addition in premixed methane/air flames,” 2007.
- [4] M. Sofian, M. B. Haq, D. Al Shehri, M. M. Rahman, and N. S. Muhammed, “A review on hydrogen blending in gas network: Insight into safety, corrosion, embrittlement, coatings and liners, and bibliometric analysis,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 60, pp. 867–889, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2024.02.166.
- [5] “Hidrógeno - Centro Nacional del Hidrógeno.” Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>
- [6] pidjoe, “The Future of Hydrogen.”
- [7] I. Moretti, “Hidrógeno blanco: el combustible limpio del futuro,” <https://www2.sgc.gov.co/Noticias/Paginas/Hidrogeno-blanco-el-combustible-limpio-del-futuro.aspx>.
- [8] “ISO/TR 15916:2015(en), Basic considerations for the safety of hydrogen systems.” Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:tr:15916:ed-2:v1:en>
- [9] M. A. Kappes and T. Perez, “Hydrogen blending in existing natural gas transmission pipelines: A review of hydrogen embrittlement, governing codes, and life prediction methods,” Jun. 01, 2023, De Gruyter Open Ltd. doi: 10.1515/corrrev-2022-0083.
- [10] B. Thawani, R. Hazael, and R. Critchley, “Assessing the pressure losses during hydrogen transport in the current natural gas infrastructure using numerical modelling,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 88, pp. 34463–34475, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.208.

- [11] V. Kulagin, A. Kuklina, and D. Grushevenko, “The impact of logistics and political decisions on greenhouse gas emissions in market transformation,” *Carbon Research*, vol. 4, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1007/s44246-024-00172-7.
- [12] Z. Z. b Ying Zhang a, “The Role of Energy Subsidies, Savings, and Transitions in Driving Energy Transformations Toward Net-Zero Emissions,” 2025.
- [13] B. Thawani, R. Hazael, and R. Critchley, “Assessing the pressure losses during hydrogen transport in the current natural gas infrastructure using numerical modelling,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 88, pp. 34463–34475, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.208.
- [14] J. Weisbach, “Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinen-Mechanik, 1st ed. Braunschweig, Germany: Vieweg und Sohn,” 1845.
- [15] H. Darcy, “Les fontaines publiques de la ville de Dijon, Paris, France: Dalmont,” 1856.
- [16] FESMEX Fluid Equipment Supply, “FESMEX perdidas por fricción ,” <https://www.fesmex.com.mx/article/perdidas-por-friccion-en-tuberias/#contacto>.
- [17] M. Tatsutani, M. Tovar, and A. Carr, “Techno-economic Realities of Long-Distance Hydrogen Transport A Cost Analysis of Importing Low-Carbon Hydrogen to Europe,” 2023.
- [18] American Petroleum Institute (API), “Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry,” 2020.
- [19] ASTM International, “Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products,” Mar. 01, 2024, ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/A0370-24.
- [20] API 5L (2018)-American Petroleum Institute (API), “Line Pipe,” 2018.
- [21] American Society of Mechanical Engineers (ASME), “ASME B31.12 (2019)”.
- [22] ASTM E8/E8M-22. ASTM International, “Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials,” May 01, 2022, ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/E0008_E0008M-22.
- [23] ASTM E23-23a. ASTM International, “Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials,” Mar. 01, 2023, ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/E0023-23A.

- [24] ASTM E45-18a. ASTM International., “Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel,” Nov. 01, 2023, ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/E0045-18AR23.
- [25] ASTM International. ASTM E407-23, “Practice for Microetching Metals and Alloys,” Nov. 01, 2023, ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/E0407-23.
- [26] ASTM International. ASTM G142-98(2022), “Test Method for Determination of Susceptibility of Metals to Embrittlement in Hydrogen Containing Environments at High Pressure, High Temperature, or Both,” Oct. 01, 2022, ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/G0142-98R22.
- [27] ASTM G148-97. ASTM International., “Standard Practice for Evaluation of Hydrogen Uptake, Permeation, and Transport in Metals by an Electrochemical Technique 1.” [Online]. Available: www.astm.org
- [28] Company WITT, “Mezclador para 2 o 3 definidos gases diseñado para múltiples aplicaciones industriales especialmente para aplicaciones con grandes oscilaciones de caudal del gas mixto.”
- [29] “Clean Hydrogen JU - SRIA Key Performance Indicators (KPIs),” https://www.clean-hydrogen.europa.eu/knowledge-management/strategy-map-and-key-performance-indicators/clean-hydrogen-ju-sria-key-performance-indicators-kpis_en.
- [30] Clean Hydrogen Partnership, “Clean Hydrogen JU SRIA - approved by GB - clean for publication (ID 13246486)”.