

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Laura Daniela Flórez Malagón

Hacia la descarbonización 2050: Evaluación de las consecuencias físicas del transporte de mezcla
H₂-NG en infraestructuras de gas natural mediante simulación.

Trabajo de Grado para optar por el Título de Ingeniero Químico

Modalidad

Pasantía de investigación

Director

Gustavo Emilio Ramírez Caballero

Doctor en Materials Science and Engineering

Codirectora

Carolina Ardila Suárez

PhD en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG**Dedicatoria**

A mis papás, Toño e Inés, porque este logro también les pertenece, por ser mis compañeros de vida, mi apoyo incondicional, mi refugio, por creer en mí, incluso cuando yo dudaba y por darme las herramientas para superar cada reto de este camino.

A mis hermanos, Camilo y Diego, que a pesar de la distancia siempre estuvieron presentes, acompañándome con su cariño, confianza y amor.

A mis sobrinos, Juanjo, Juanquis, Majo y Salo, que son mi motor e inspiración, por transmitir alegría y recordarme, con cada sonrisa, el sentido de mi vida.

A mí misma, a Dani, por haber tenido el valor de salir de casa y de su zona de confort, que, con duda e incertidumbre, se mantuvo perseverante hasta culminar lo que un día comenzó; en el camino aprendió nuevos idiomas, viajó, conoció personas maravillosas y descubrió que era capaz de mucho más de lo que alguna vez imaginó.

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG**Agradecimientos**

Al universo, por alinear todo a mi favor y hacer posible cada uno de los logros alcanzados durante este camino.

A mi director, Dr. Gustavo, por confiar en mí para desarrollar este proyecto y enseñarme que, con empatía, calma y voluntad se logran las cosas.

A mi directora, Dra. Carolina, por la cálida acogida en Sherbrooke, Canadá, por su constante orientación y por sus valiosas contribuciones a mi formación profesional.

Al Prof. César por abrirme las puertas de la propuesta educ comunicativa Paidópolis, confiar en mí y brindarme un espacio donde fortalecí habilidades como el liderazgo, la responsabilidad y el compromiso de trabajar con amor.

A las señoras Marleny, Nancy y Gladys, por abrirme las puertas de su hogar y tratarme como parte de la familia.

A cada uno de mis profesores, compañeros de clase y a todas las personas que, de una u otra manera hicieron parte de este proceso, por compartir sus conocimientos, experiencias, consejos y aprendizajes que enriquecieron mi crecimiento personal y profesional.

A Caroline, mi roomie, por ser mi fiel compañía, cómplice de aventuras y anécdotas.

A mis amigos de la universidad, Danna, Fabián, Jhonatan y Zamir, por ser mi familia lejos de casa, por escucharme y dejarme ser.

Finalmente, a mi familia, por su amor, comprensión e infinita paciencia, los amo con todo mi ser.

Tabla de contenido

Introducción	15
1. Objetivos	19
1.1 Objetivo general.....	19
1.2 Objetivos específicos	19
2. Marco conceptual.....	20
3. Estado del arte	24
4. Metodología.....	26
Etapa 4.1: Caracterización del sistema y definición de escenarios.....	27
Etapa 4.2: Cuantificación de consecuencias físicas	27
Etapa 4.3: Evaluación de riesgo y validación normativa	28
Etapa 4.4: Consolidación y escritura de memorias.....	28
5. Resultados.....	29
5.1 Resultados del modelado de consecuencias físicas: dispersión de la nube inflamable a (plume dispersion)	31
5.2 Resultados del modelado de consecuencias físicas: llama de chorro (jet flame)	34
5.3 Resultados del modelado de consecuencias físicas: Sobrepresión sin confinamiento (Overpressure Unconfined).....	41
5.4 Resultados métricas de riesgo.	47
6. Conclusiones.....	50
7. Recomendaciones	52

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Referencias bibliográficas..... 53

Apéndices..... 61

Lista de tablas

Tabla 1. Límites de inflamabilidad superior e inferior calculados.	30
Tabla 2. Coordenadas seleccionadas para simular en HyRAM+.	35
Tabla 3. Frecuencia de fallas de componentes en la tubería de distribución y servicio para un escenario de fuga media (19.06mm)(Joshi et al., 2025)	49

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de metodología dividido por etapas.....	26
Figura 2. Diagrama de tuberías e instrumentación de la estación reguladora (Gobierno de Alberta, 2021). Imagen tomada de (Joshi et al., 2025).....	29
Figura 3. Posible red de tuberías de distribución en Sherwood Park, Edmonton, Canadá. Imagen tomada de (Joshi et al., 2025).	30
Figura 4. Cambio de fracción molar de hidrógeno a 30 °C y resultados de distancias de la dispersión de la nube inflamable.....	32
Figura 5. Distancias máximas vertical y horizontal por combustible en condiciones de verano e invierno.	33
Figura 6. Flujo de calor en el Punto 1.....	36
Figura 7. Flujo de calor en el Punto 3.....	37
Figura 8. Flujo de calor en el Punto 10.....	38
Figura 9. Visualización 3D- posición espacial de los puntos respecto a la fuente.	39
Figura 10. Masa inflamable por combustible y variación estacional.	40
Figura 11. Punto 1. Trabajador cercano (10, 1.5, 0) evalúa el riesgo a una distancia de operación mínima.	42
Figura 12. Punto 2. alcance LFL: (30, 1.5, 2) verifica consecuencias en el borde de la nube inflamable.	43
Figura 13. Punto 3. Seguridad pública: (50, 1.5, 5) indica que a esa distancia la sobrepresión ya no es letal.	44
Figura 14. Sobrepresiones máximas (kPa) en los tres puntos espaciales.	45

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Figura 15. Comparación de impulso por combustible frente a umbrales de daño fisiológico

(verano, 30 °C)..... 46

Figura 16. Comparación de impulso por combustible frente a umbrales de daño fisiológico

(invierno, -15 °C)..... 47

Figura 17. Diagrama de barras (escala logarítmica en Y) que muestra tres métricas QRA para

cuatro escenarios: H₂ verano, H₂ invierno, CH₄ verano y CH₄ invierno..... 48

Lista de apéndices

Apéndice A. Resultados de simulación de dispersión de la nube inflamable.	61
Apéndice B. Resultados de simulación de llama de chorro	66
Apéndice C. Resultados de la simulación de sobrepresión e impulso sin confinamiento	70
Apéndice D. Resultados de simulación de evaluación cuantitativa del riesgo.	74
Apéndice E. Criterios internacionales de riesgo individual	80
Apéndice F. Otros	82

Glosario

Acrónimo	Término completo	Definición	Fuente
AIR	Average Individual Risk	El Riesgo Individual Promedio, expresa el número medio de muertes por individuo expuesto. Se basa en el número de horas que pasa el ocupante medio en la instalación.	(Groth et al., s/f)
ALARP	As Low as Reasonably Practicable	Se utiliza como criterio para la toma de decisiones en materia de seguridad, exigiendo que los responsables de la seguridad laboral y pública reduzcan los riesgos hasta niveles tan bajos como sea razonablemente posible.	(Jones-Lee & Aven, 2011)
API 521	American Petroleum Institute Standard 521	Guía para el diseño de sistemas de alivio de presión y despresurización; su aplicación a mezclas H ₂ -NG presenta retos específicos.	(Liu et al., 2023)
BST	Baker-Strehlow-Tang	Modelo basado en un continuo de curvas de explosión escaladas numéricamente para diferentes velocidades de propagación de la llama (número de Mach). Utiliza parámetros de reactividad, confinamiento y congestión para determinar la velocidad de llama relativa y, subsecuentemente, la intensidad del evento explosivo.	(Binda et al., 2017)
CSA Z662	Canadian Standards Association Z662	Norma canadiense para diseño, construcción y operación de sistemas de tuberías; actualizada para mezclas de hidrógeno.	(Blackwell et al., 2024)
CSCChE	Canadian Society for Chemical Engineering	La Sociedad Canadiense de Ingeniería Química es una asociación profesional nacional sin ánimo de lucro que une a estudiantes de ingeniería química y profesionales que trabajan en la industria, el mundo académico y el gobierno.	(CSCChE, s/f)
CFD	Computational Fluid Dynamics	Dinámica de fluidos computacional (CFD) es un análisis de los fenómenos físicos involucrados en el flujo de fluidos y la conducción de calor mediante cálculo numérico por computadora y visualización gráfica.	(Wei, 2017)
FAR	Fatal Accident Rate	El FAR es el número esperado de muertes en un grupo, por cada 100 millones de horas expuestas.	(Groth et al., s/f)
H₂-NG	Hydrogen-Natural Gas blend	Mezcla de hidrógeno y gas natural inyectada en redes de tuberías como estrategia de transición energética baja en carbono.	(Blackwell et al., 2024)
HyRAM+	Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models	Software de código abierto que integra modelos validados experimentalmente para evaluar riesgos cuantitativos de fugas, dispersión e incendios en sistemas de combustibles alternativos (hidrógeno, gas natural, propano).	(Groth et al., 2025)

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Acrónimo	Término completo		Definición	Fuente
IEA	International Energy Agency		La Agencia Internacional de Energía es un organismo que promueve la cooperación entre sus países miembros para orientar y coordinar políticas energéticas, con el propósito de garantizar un suministro de energía seguro, asequible y sostenible para la población.	(<i>Agencia Internacional de la Energía. En Wikipedia, la enciclopedia libre</i> , 2026)
Índice IW	Número o índice de Wobbe		Tiene en cuenta el aporte energético del gas y su gravedad específica. Es uno de los indicadores más utilizados internacionalmente para comparar la intercambiabilidad de gases combustibles.	(CREG, 2008)
LFL	Lower Flammability Limit		El Límite Inferior de Inflamabilidad (LFL), también conocido como Límite Inferior de Explosividad (LEL), corresponde a la menor concentración de combustible en el aire, expresada como porcentaje en volumen, a partir de la cual una mezcla puede inflamarse. Por debajo de este valor, la mezcla contiene una cantidad insuficiente de combustible para sostener la combustión.	(D. Crowl & Louvar, 1990)
MATLAB	Matrix Laboratory		Entorno de cálculo empleado en aplicaciones científicas y de ingeniería para realizar análisis de datos, procesamiento de señales e imágenes, desarrollo de sistemas de control, telecomunicaciones, robótica y otras tareas de modelado computacional.	(The MathWorks Inc., s/f)
MIACC	Major Industrial Accidents Council of Canada		El Consejo Canadiense de Accidentes Industriales Mayores organización sin fines de lucro creada en 1987 tras el desastre de Bhopal. Su propósito es reunir a gobiernos, industria y expertos para reducir el riesgo de accidentes graves por sustancias peligrosas.	(Major Industrial Accidents Council of Canada, 1995)
NFPA 2	National Fire Protection Association Standard 2		Código que establece medidas esenciales de seguridad para la producción, instalación, almacenamiento, transporte, uso y manejo del hidrógeno, tanto en estado gaseoso comprimido (GH ₂) como en forma líquida criogénica (LH ₂).	(National Fire Protection Association, 2026a)
59A NFPA	National Fire Protection Association Standard 59A		Norma que define los requisitos mínimos de seguridad, protección contra incendios y condiciones asociadas para la ubicación, diseño, construcción, operación, mantenimiento y protección de instalaciones destinadas al gas natural licuado (GNL).	(National Fire Protection Association, 2026b)
PHAST	Process Hazard Analysis Software Tools		Herramienta de análisis de riesgos más completa del mundo para todas las etapas de diseño y operación.	(DNV, 2013)
PLL	Potential Loss of Life		El PLL expresa el número esperado de muertes por sistema-año.	(Groth et al., s/f)

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Acrónimo	Término completo		Definición	Fuente
QRA	Quantitative Assessment	Risk	Evaluación Cuantitativa de Riesgos es un enfoque riguroso que utiliza modelos fuente, modelos de dispersión y modelos de efectos para calcular estimaciones de riesgo para cada escenario posible.	(D. Crowl & Louvar, 1990)
SAFETI			Software avanzado de Análisis Cuantitativo de Riesgos (QRA) desarrollado por DNV. Se utiliza principalmente en industrias de alto riesgo (petróleo, gas, química) para evaluar, gestionar y mitigar peligros derivados de posibles accidentes, como fugas de materiales peligrosos, incendios o explosiones.	(DNV, s/f-a)
TNO multienenergía	Netherlands Organization for Applied Scientific Research		Modelo más realista que reconoce que no todo el gas que se dispersa contribuye a la explosión de forma igual.	(Binda et al., 2017)
TNT equivalente	-	Trinitrotolueno	Modelo simplificado de consecuencias que asume equivalencia entre la energía de combustión del gas inflamable y una masa de TNT, considerando sus efectos de explosión.	(Binda et al., 2017)
UFL	Upper Limit	Flammability	Límite Superior de Inflamabilidad (también llamado UEL, Upper Explosion Limit). Es la concentración máxima de combustible en el aire por encima de la cual la mezcla es demasiado rica en combustible para sostener la combustión.	(D. Crowl & Louvar, 1990)
VCE	Vapor Cloud Explosion		Las explosiones de nubes (VCE) son explosiones que ocurren debido a la liberación de vapor inflamable sobre un gran volumen y son más comúnmente deflagraciones.	(Binda et al., 2017)

Resumen

Título: Hacia la descarbonización 2050: Evaluación de las consecuencias físicas del transporte de mezclas H₂-NG en infraestructuras de gas natural mediante simulación*

Autores: Carolina Ardila Suárez, Gustavo Ramírez, Laura Daniela Flórez Malagón**

Palabras clave: PI

Descripción: El hidrógeno se considera un vector energético clave para la descarbonización del sistema energético en el horizonte de 2050, pero su integración en infraestructuras existentes de gas natural enfrenta desafíos críticos de seguridad sin resolver: fragilización del acero, amplios rangos de inflamabilidad, y ausencia de estándares cuantitativos para mezclas. Aunque el límite del 20 % de volumen de hidrógeno en mezclas con gas natural es frecuentemente citado en la literatura, las consecuencias físicas de escenarios de fuga, en términos de dispersión, radiación térmica y sobrepresión, permanecen insuficientemente cuantificadas. Esta investigación aporta evidencia cuantitativa sobre los riesgos físicos asociados a mezclas de H₂-NG en tuberías de gas natural en operación. Se evalúan cuatro combustibles (metano puro, hidrógeno puro, y mezclas al 10 % y 20 % de H₂) bajo condiciones realistas: fugas de 20 mm a 1 MPa y 288 K, evaluadas bajo variaciones estacionales (-15 °C en invierno, 30 °C en verano). Se utiliza la herramienta HyRAM+ v6.1 para calcular modelos de consecuencias físicas y análisis de riesgos cuantitativos. Los resultados muestran que: (1) la dispersión horizontal aumenta aproximadamente 30 cm cuando se adiciona hidrógeno a la mezcla, requiriendo mayores distancias de separación; (2) la radiación térmica genera quemaduras de primer y segundo grado en proximidad inmediata a la fuga, mientras que las explosiones sugerían daños estructurales de tamaño bajo a medio en las proximidades; (3) el riesgo individual promedio (AIR) para metano e hidrógeno puros permanece dentro de criterios de aceptabilidad establecidos por la Canadian Society for Chemical Engineering. Este trabajo proporciona la validación cuantitativa que los ingenieros requieren para actualizar estándares de seguridad específicos para mezclas y determinar distancias operacionales seguras. La transición hacia sistemas energéticos basados en hidrógeno requiere reducir la incertidumbre técnica asociada a su implementación en redes existentes; en ese sentido, el presente contribuye a un paso esencial para garantizar la integración segura y un apoyo en la red colombiana de gas natural.¹

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Gustavo Emilio Ramírez Caballero. Doctor en Materials Science and Engineering. Codirector: Carolina Ardila Suárez. PhD en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Towards decarbonization 2050: Evaluation of the physical consequences of blended H₂-NG transport in natural gas infrastructures through simulation*

Authors: Carolina Ardila Suárez, Gustavo Ramírez, Laura Daniela Flórez Malagón**

Keywords: Hydrogen-natural gas blends, Quantitative risk assessment, HyRAM+, Natural gas pipeline, plume dispersion, jet flame, overpressure, individual risk

Description: Hydrogen is considered a key energy carrier for the decarbonization of the energy system by 2050, but its integration into existing natural gas infrastructures faces critical unresolved safety challenges: steel embrittlement, wide flammability ranges, and absence of quantitative standards for blends. Although the 20% volume limit of hydrogen in mixtures with natural gas is frequently cited in the literature, the physical consequences of leakage scenarios, in terms of dispersion, thermal radiation and overpressure, remain insufficiently quantified. This research provides quantitative evidence on the physical risks associated with H₂-NG blends in natural gas pipelines in operation. Four fuels (pure methane, pure hydrogen, and mixtures of 10% and 20% H₂) are evaluated under realistic conditions: leaks of 20 mm at 1 MPa and 288 K, evaluated under seasonal variations (−15 °C in winter, 30 °C in summer). The HyRAM+ v6.1 tool is used to calculate physical consequence models and quantitative risk analysis. The results show that: (1) horizontal dispersion increases approximately 30 cm when hydrogen is added to the mixture, requiring greater separation distances; (2) thermal radiation generates first- and second-degree burns in immediate proximity to the leak, while explosions suggested low to medium structural damage in the vicinity; (3) the average individual risk (AIR) for pure methane and hydrogen remains within acceptability criteria set by the Canadian Society for Chemical Engineering. This work provides the quantitative validation that engineers need to update specific safety standards for mixtures and determine safe operational distances. The transition to hydrogen-based energy systems requires reducing the technical uncertainty associated with its implementation in existing grids; In this sense, this document contributes to an essential step to guarantee the safe integration and support of the Colombian natural gas network.²

* Degree Work

**Faculty of Physical and Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Gustavo Emilio Ramírez Caballero. PhD in Materials Science and Engineering. Co-director: Carolina Ardila Suárez. PhD in Chemical Engineering.

Introducción

El avance hacia una matriz energética más sostenible requiere disminuir de forma sustancial las emisiones de carbono. En ese contexto, el hidrógeno ha surgido como un vector clave para alcanzar los objetivos de descarbonización para 2050. Actualmente, se producen alrededor de 75 Mt de hidrógeno anualmente para uso industrial, y se proyecta que la demanda global de hidrógeno aumente siete veces, alcanzando los 520 Mt para 2070 en una trayectoria de emisiones netas cero (IEA, 2020). Sin embargo, transportar hidrógeno a gran escala requiere infraestructura, y se ha propuesto la reutilización de gasoductos existentes para mezclas de hidrógeno y gas natural como la vía de transición más rentable, y de esta manera, evitar la necesidad de construir redes completamente nuevas.

A pesar de este potencial, la integración del hidrógeno en los oleoductos existentes plantea desafíos físicos y de seguridad que no se comprenden del todo. El hidrógeno difiere fundamentalmente del metano: tiene una densidad de una octava parte de la del CH₄ (Martin et al., 2024), mayor difusividad, un rango de inflamabilidad más amplio (4–75% frente a 5,3–15% para CH₄), y se estima que fuga a una tasa de 1.3–3 veces la del metano en condiciones equivalentes (Swain & Swain, 1992). Estas propiedades se traducen directamente en una mayor dispersión al entrar en fuga, acumulación más rápida en espacios cerrados y mayor potencial explosivo, especialmente en proporciones de mezcla más altas (Schiro et al., 2020). A nivel de material, la fragilización por hidrógeno afecta a la ductilidad, resistencia a la fractura y propiedades de fatiga de los aceros de oleoductos, y las tuberías existentes contienen pequeños defectos que pueden crecer bajo exposición al hidrógeno, aumentando el riesgo de fallo (Wang et al., 2022). La integración también implica incompatibilidades termodinámicas en densidad masiva, valor

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

calorífico, índice de Wobbe (IW) y comportamiento de presión entre hidrógeno y gas natural (Koutalidis et al., 2025), lo que complica la operación de la tubería junto con la detección de fugas (Khan et al. 2021).

La evidencia actual sugiere que mezclar hasta un 30% de hidrógeno es generalmente seguro para la integridad estructural de los oleoductos (Rosa et al., 2025), pero las regulaciones en la mayoría de las jurisdicciones limitan la mezcla al 20%, un umbral establecido sin un análisis cuantitativo sistemático de las consecuencias físicas de las mezclas intermedias. Asimismo, una evaluación cuantitativa de riesgos realizada en el Reino Unido encontró un aumento en la frecuencia y gravedad de incendios y explosiones con uso de hidrógeno puro, recomendando la instalación de dispositivos de flujo excesivo y ventilaciones que no cierren como medidas de mitigación (Martin et al., 2024).

Más recientemente, Joshi et al. (2025) desarrollaron un análisis de riesgos para mezclas hidrógeno-gas natural (H₂-NG) en la red de distribución de Sherwood Park, en Edmonton, Canadá. El estudio se planteó como un caso prospectivo y simulado, orientado a analizar el comportamiento de mezclas con 20 %, 40 % y 100% de H₂. Para ello, los autores emplearon PHAST y SAFETI v9.0, desarrollado por Det Norske Veritas (DNV, s/f-a) para el cálculo de la evaluación cuantitativa de riesgos (Quantitative Risk Assessment, QRA). En particular, PHAST se usó para evaluar la cobertura de fugas de tuberías sobre el suelo y componentes en las estaciones reguladoras mediante el complemento de dinámica de fluidos computacional (CFD) y SAFETI por su parte, permitió estimar tanto el riesgo individual como el riesgo societal en las instalaciones residenciales, comerciales y recreativas. Cabe resaltar que ambas herramientas son software propietario y requieren licencias comerciales de alto costo, lo que puede limitar su accesibilidad. El costo

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

aproximado de las licencias es de 59,8 millones de pesos colombianos para PHAST y 10,6 millones de pesos colombianos para SAFETI (DNV, s/f-b; Veracity, s/f).

Adicionalmente, las frecuencias de fuga se obtuvieron del software HyRAM+ v5.1.1. Los resultados indican que el riesgo individual aumenta 21,2 % cuando la mezcla contiene 20 % de H₂, y que las distancias de separación establecidas por la norma CSA Z662 podrían ser insuficientes para mezclas con mayor contenido de hidrógeno, por lo que se requerirían incrementos entre 22 % y 46 %.

Aunque dicho análisis se centró en redes urbanas de distribución de baja presión, aún permanece una brecha en la caracterización de consecuencias físicas como dispersión, radiación térmica y sobrepresión bajo condiciones de mayor presión, relevantes para infraestructuras existentes de tuberías de acero.

Este estudio aborda esa brecha. Utilizando HyRAM+ v6.1 (producto de Sandia National Laboratories) una plataforma de evaluación cuantitativa de riesgos de código abierto basada en modelos de orden reducido que proporcionan estimaciones realistas y defendibles. Este trabajo evalúa las consecuencias físicas de fugas de mezcla H₂-NG bajo condiciones de operación realistas: un tamaño de fuga de 20 mm a 1 MPa y 288 K, seleccionado dentro de los rangos de operación válidos de HyRAM+ para los combustibles evaluados. Se analizan cuatro composiciones de combustibles: metano puro, hidrógeno puro y mezclas al 10% y 20% H₂. Con el fin de simular condiciones realistas se seleccionan variaciones de temperatura estacionales (−15°C en invierno, 30°C en verano). Se realiza una evaluación cuantitativa de riesgos utilizando el Riesgo Individual Medio (AIR) para metano e hidrógeno puros, ya que HyRAM+ actualmente no soporta QRA para mezclas; AIR se selecciona como la métrica principal de riesgo debido a su comparabilidad directa con los criterios de aceptabilidad establecidos en la literatura. Los

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

resultados proporcionan los parámetros cuantitativos distancias de daño térmico, sobrepresión y valores individuales de riesgo que los ingenieros y reguladores necesitan para actualizar los estándares de seguridad y definir distancias operacionales seguras para la mezcla de hidrógeno en la infraestructura existente de los oleoductos. Con base en ello, el presente trabajo responde a la pregunta: ¿en qué medida la adición de hidrógeno (10% y 20% mol) en redes urbanas de gas natural a 1 MPa altera el perfil de riesgo físico, específicamente la dispersión horizontal, la radiación térmica y la sobrepresión por explosión en comparación con el metano puro, y cómo impactan las variaciones estacionales de temperatura en la determinación de distancias operacionales seguras?

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar cuantitativamente las consecuencias físicas y el riesgo individual asociados a fugas de mezclas de gas natural-hidrógeno (10% y 20% mol) en infraestructura urbana de distribución, mediante el software HyRAM+.

1.2 Objetivos específicos

1. Definir escenarios de fuga representativos (composición, condiciones ambientales estacionales, componentes, ocupantes, modelos) para la infraestructura urbana de gas natural.
2. Cuantificar las distancias de afectación por radiación térmica, sobrepresión y dispersión de nube inflamable para cada escenario y composición, comparando con el caso base de gas natural puro.
3. Calcular el riesgo individual en las zonas aledañas y evaluar su aceptabilidad según criterios reconocidos (CSCChE, ALARP, MIACC).

2. Marco conceptual

Las mezclas hidrógeno-gas natural H₂-NG se proponen como una alternativa de transición para descarbonizar sistemas de transporte energético existentes, ya que permiten aprovechar redes de gas natural y reducir costos frente a la construcción de infraestructura dedicada exclusivamente al hidrógeno. Con todo, su incorporación exige revisar propiedades fisicoquímicas, compatibilidad de materiales, comportamiento de fugas y criterios de seguridad operacional (M. Li et al., 2024; Thawani et al., 2023).

Desde el punto de vista del transporte, la menor densidad del hidrógeno reduce la capacidad volumétrica y modifica las pérdidas de presión, mientras que su alta difusividad favorece la dispersión rápida en caso de fuga. Estas características alteran los perfiles de concentración y pueden incrementar la probabilidad de formación de atmósferas inflamables, especialmente cuando existe ventilación limitada o hay geometrías que favorecen acumulación local (Alkhatib et al., 2022).

Cuando ocurre una fuga, las mezclas H₂-NG pueden formar nubes inflamables cuya extensión depende de la composición, presión, temperatura, geometría del escape y ventilación. En espacios confinados o con ventilación deficiente, la acumulación puede ser más crítica; en espacios abiertos, la flotabilidad y la dilución atmosférica condicionan el alcance horizontal y vertical de la nube inflamable (Remacha et al., 2025; Serikova & Murthy, 2025; Zhao & Guo, 2025).

Para estimar los límites de inflamabilidad de las mezclas se emplea la regla de Le Chatelier, que permite aproximar el LFL y el UFL a partir de los límites de cada componente. En paralelo, la integridad de las tuberías debe considerar la fragilización por hidrógeno, fenómeno en el cual el hidrógeno H₂ se difunde y absorbe en la microestructura metálica, favoreciendo pérdida de

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

ductilidad, formación de grietas y falla bajo esfuerzos elevados (Briottet et al., 2012; Chen & Mao, 2017; Lutostansky et al., 2013; Stalheim et al., 2010; T. Zhang et al., 2017).

Las consecuencias físicas de una fuga dependen del tipo de ignición. La ignición inmediata conduce principalmente a incendios de chorro y exposición térmica, mientras que la ignición retardada permite la formación de una nube inflamable capaz de generar sobrepresión. Para explosiones hidrógeno/aire o H₂-NG/ aire se han usado métodos como TNT equivalente, TNO Multi-Energy y Baker–Strehlow–Tang; en contraste, su aplicación a hidrógeno requiere precaución debido a la sensibilidad del fenómeno a la turbulencia, el confinamiento y la composición de la mezcla (Froeling et al., 2021; Hu et al., 2023; Turner & Sari, 2012).

Las condiciones atmosféricas también son relevantes para la dispersión. La estabilidad atmosférica del modelo de dispersión de HyRAM+ asume un entorno neutro y calmo. En la versión de interfaz gráfica (GUI) para Windows, la velocidad del viento está predeterminada en 0 m/s. (Groth et al., 2025). Por otra parte, la trayectoria y dilución del gas en HyRAM+ están gobernadas por el Número de Froude Densimétrico, que define si la fuga está dominada por el momento inicial (impulso) o por las fuerzas boyantes (Houf & Schefer, 2008).

En escenarios de ignición retardada, es decir, segundos después, la masa inflamable contenida entre el LFL y el UFL es un parámetro determinante: a mayor masa disponible para combustión, mayor potencial de sobrepresión y zona de daño. Por ello, las mezclas con mayor fracción de hidrógeno pueden modificar la severidad esperada, incluso cuando los cambios de composición parezcan moderados (Portarapillo & Di Benedetto, 2021; X. Zhang et al., 2024).

Para fines de este proyecto, se utiliza la consecuencia física de la dispersión de la nube inflamable o dispersión del penacho (plume dispersion) que corresponde al comportamiento de

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

una nube de material resultante de una liberación continua de gas o vapor hacia la atmósfera (D. Crowl & Louvar, 1990); en el contexto de fugas accidentales, una fuga de hidrógeno a alta presión forma un chorro turbulento de gran impulso que arrastra aire del entorno, lo que provoca que la concentración del combustible disminuya a medida que se mezcla con el ambiente (Houf & Schefer, 2007). La siguiente consecuencia es una llama de chorro (jet flame), que es el resultado de la combustión de una sustancia inflamable liberada continuamente en una dirección específica y con un alto momento inicial, que se enciende inmediatamente en la fuente. A diferencia de una explosión, representa un peligro de incendio estacionario y direccional (Binda et al., 2017; Groth et al., 2012).

La evaluación de daño térmico utiliza umbrales de flujo de calor que permiten interpretar el efecto sobre personas e infraestructura. Valores cercanos a 1,6 kW/m² suelen considerarse tolerables para exposiciones prolongadas; alrededor de 4,7–5,0 kW/m² se asocian con dolor severo y quemaduras de segundo grado en tiempos de exposición del orden de decenas de segundos; y niveles superiores, como 9,0 kW/m², 12,5–15,0 kW/m² y 25,0 kW/m², se relacionan progresivamente con mayor probabilidad de lesiones graves, letalidad o contacto directo con la llama (D. Crowl & Louvar, 1990; Groth et al., 2016; Groth, Hecht, et al., 2023; J. Lachance et al., 2009).

En este contexto, se entiende por masa inflamable la cantidad total de combustible que se encuentra dentro de los límites de inflamabilidad (inferior y superior) y es capaz de arder o explotar si encuentra una fuente de ignición retardada (Grothjosi et al., 2021).

En relación con lo anterior, la sobrepresión se define técnicamente como la presión máxima por encima de la presión atmosférica ambiental. Es el indicador principal de daño inmediato a estructuras y personas (Binda et al., 2017; Groth, Zumwalt, et al., 2023). Mientras que el impulso,

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

físicamente, es la integral de la sobrepresión con respecto al tiempo durante la fase positiva de la explosión (TNO, 1992). Representa el área bajo la curva del diagrama presión-tiempo y cuantifica la energía acumulada que impacta sobre un objetivo (Binda et al., 2017).

La evaluación cuantitativa de riesgos integra frecuencia y consecuencia para estimar métricas como AIR, FAR y PLL. En estudios de seguridad de hidrógeno, el AIR permite comparar la probabilidad anual de fatalidad con criterios de aceptabilidad para trabajadores y público; de forma general, los límites para terceros suelen ser más estrictos que los aplicados a personal ocupacionalmente expuesto (Groth et al., 2012; J. Lachance et al., 2009). La métrica principal utilizada para evaluar la seguridad de la infraestructura es el Riesgo Individual (AIR), se entiende como la probabilidad anual de que una persona promedio, presente de forma permanente y sin protección en una ubicación específica, fallezca debido a un accidente derivado de una actividad peligrosa (Jonkman et al., 2003).

3. Estado del arte

Para lograr la transición energética de forma costo-efectiva, se ha propuesto el aprovechamiento de la infraestructura de gas natural existente mediante mezclas H₂-NG evitando la construcción de nuevas redes. A nivel internacional, proyectos como HyDeploy en Reino Unido y GRHYD en Francia han validado la viabilidad operativa de mezclas de hasta el 20% en volumen, sentando las bases técnicas para una transición gradual y segura (Martin et al., 2024).

A pesar de su potencial, el hidrógeno presenta desafíos fundamentales debido a su baja densidad (una octava parte de la del metano), alta difusividad y un rango de inflamabilidad significativamente más amplio. Estudios como los de Martin et al. (2024) han evidenciado que el uso de hidrógeno puro aumenta la frecuencia y severidad de incendios y explosiones, recomendando sistemas de mitigación específicos. Coincidiendo con investigaciones sobre integridad estructural como las Rosa et al. (2025) sugieren que mezclas de hasta el 30% son compatibles con la infraestructura existente, aunque subrayan la urgencia de realizar evaluaciones cuantitativas de las consecuencias físicas de fugas accidentales antes de escalar su implementación.

En el ámbito de la caracterización de fenómenos físicos, H. Li et al. (2022) demostraron que las zonas inflamables de mezclas al 10–20% de H₂ desaparecen rápidamente con ventilación adecuada, lo que sugiere un comportamiento manejable en espacios abiertos. Respecto a las llamas de chorro, Kong et al., (2024) reportaron que la longitud de llama en mezclas H₂-NG disminuye aproximadamente un 5% al incrementar la fracción de hidrógeno de 0% a 20%, y hasta un 25% con hidrógeno puro, fenómeno atribuido al aumento de la difusividad molecular y la intensidad turbulenta de la llama. Estos hallazgos, aunque relevantes, han sido obtenidos predominantemente en condiciones de laboratorio o baja presión, limitando su aplicabilidad directa a la infraestructura de transporte.

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

En el ámbito regulatorio, el estudio más exhaustivo hasta la fecha fue realizado por Joshi et al. (2025) en la red de distribución de Sherwood Park, Edmonton (Canadá). Dicho análisis se enfocó en redes de distribución de baja presión. Se identificaron vacíos que convergen en una pregunta central que la literatura no ha respondido de forma integrada: si bien se dispone de caracterizaciones para los combustibles puros y de evaluaciones de riesgo en redes de baja presión, se desconoce en qué medida la adición de hidrógeno al 10% y 20% mol en redes urbanas de gas natural a dichas condiciones altera el perfil de riesgo físico, específicamente la dispersión horizontal, la radiación térmica y la sobrepresión por explosión en comparación con el metano puro, y cómo las variaciones estacionales de temperatura condicionan la determinación de distancias operacionales seguras.

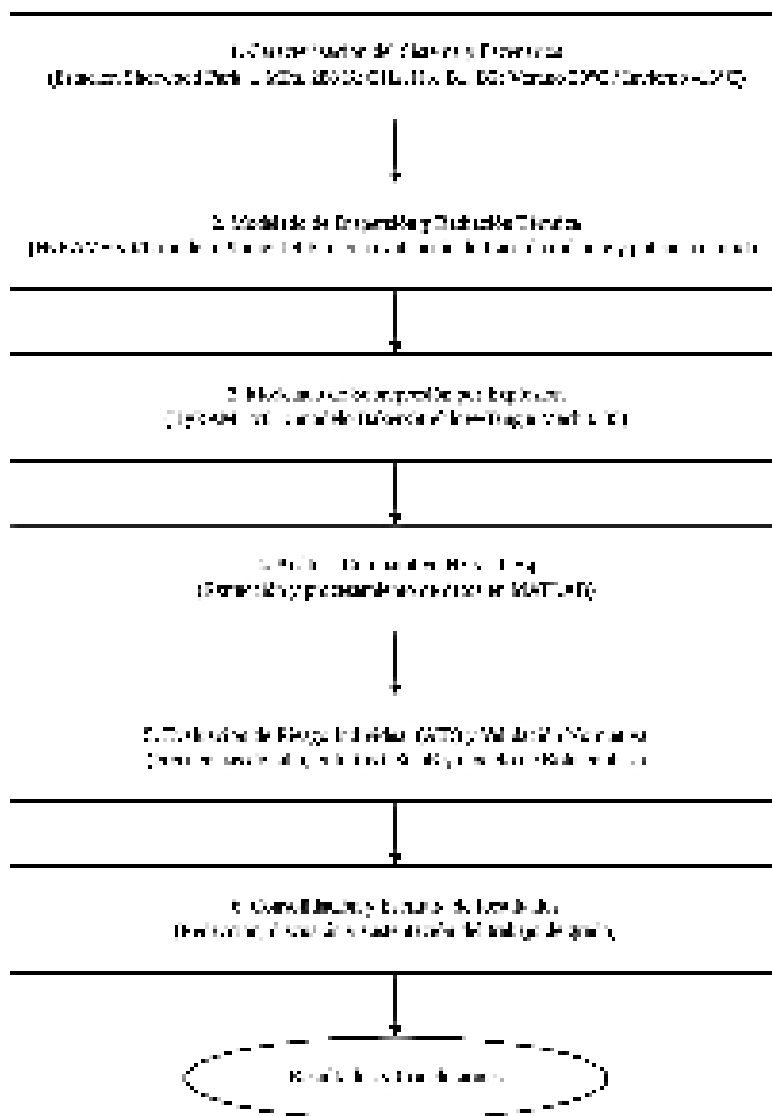
Este vacío es particularmente crítico dado que las normas vigentes como la CSA Z662 fueron calibradas para gas natural convencional y no contemplan el comportamiento diferencial de las mezclas H₂-NG bajo las condiciones de presión y temperatura propias de la infraestructura de transporte urbana existente.

4. Metodología

La presente investigación se desarrolló mediante un estudio de caso prospectivo y simulado, utilizando el software HyRAM+ v6.1 para la evaluación cuantitativa de riesgos (QRA) y el modelado de consecuencias físicas de mezclas H₂-NG (ver Figura 1).

Figura 1.

Diagrama de metodología dividido por etapas.



DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Etapá 4.1: Caracterización del sistema y definición de escenarios

- Definición técnica del sistema de referencia basado en la estación reguladora de Sherwood Park: tubería de 404 m, diámetro de 2 pulgadas y componentes específicos (10 válvulas, 19 juntas, 4 bridas).
- Establecimiento de parámetros operativos: presión fija de 1 MPa y temperatura de fluido de 288 K en fase gaseosa.
- Configuración de los combustibles: metano puro, hidrógeno puro, y mezclas B1 (10% H₂) y B2 (20% H₂).
- Definición de condiciones ambientales extremas para el análisis estacional: verano (30 °C) e invierno (−15 °C).

Etapá 4.2: Cuantificación de consecuencias físicas

- Modelado de Dispersión (Plume dispersion): Aplicación del modelo de tobera nocional de Yücel-Otugen para fugas de 20 mm, calculando los límites de inflamabilidad (LFL/UFL) de las mezclas mediante la regla de Le Chatelier.
- Análisis Térmico (Jet Flame): Simulación de radiación térmica utilizando el modelo BST a Mach 35, evaluando la fracción radiante y potencia emitida para determinar distancias de quemaduras de primer y segundo grado.
- Análisis de Sobrepresión (Overpressure Unconfined): Simulación de explosiones no confinadas mediante el modelo Baker-Strehlow-Tang (Mach 0.35) para identificar daños estructurales potenciales.
- Análisis Comparativo: Extracción de datos en MATLAB para comparar el impacto incremental del hidrógeno frente al metano base.

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Etapla 4.3: Evaluación de riesgo y validación normativa

- Configuración de frecuencias de falla por componente mediante distribuciones log normales y probabilidades de ignición inmediata/retardada.
- Cálculo de la métrica de Riesgo Individual Promedio (AIR) para los escenarios puros (CH₄ y H₂).
- Benchmarking Normativo: Comparación de los niveles de AIR obtenidos con los criterios de la *Canadian Society for Chemical Engineering (CSCHE)* y el modelo de riesgo público de Bohnenblust.
- Evaluación de las distancias de separación actuales frente a los resultados de las simulaciones para proponer ajustes de seguridad.

Etapla 4.4: Consolidación y escritura de memorias

- Redacción del resumen (abstract) y consolidación de la discusión.
- Escritura de la introducción, metodología, resultados y conclusiones integrando la búsqueda bibliográfica transversal realizada durante todo el proyecto.
- Trámites administrativos, entrega del libro al comité y sustentación pública del trabajo de grado.

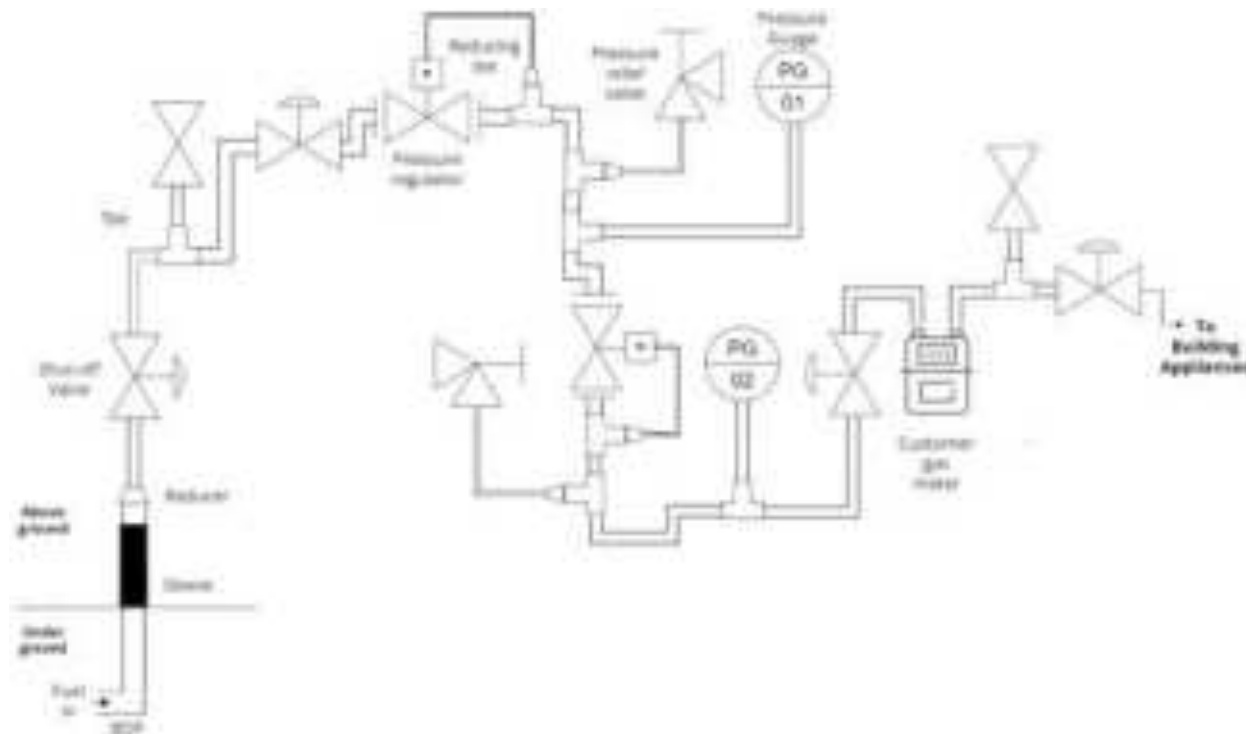
DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

5. Resultados

Al caracterizar el sistema usando los datos del estudio de Joshi et al., (2025) donde presenta una evaluación cuantitativa de riesgos (QRA) un enfoque para sistemas de distribución de gas urbano aguas abajo de las puertas de la ciudad, que abarca áreas residenciales, comerciales y áreas recreativas como se muestra en la Figura 1 el diagrama del instrumentación y tuberías (PI&D) y en la Figura 2 la vista satelital.

Figura 2.

Diagrama de tuberías e instrumentación de la estación reguladora (Gobierno de Alberta, 2021). Imagen tomada de (Joshi et al., 2025)



DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG**Figura 3.**

Posible red de tuberías de distribución en Sherwood Park, Edmonton, Canadá. Imagen tomada de (Joshi et al., 2025).



Tras la caracterización, se realizó el cálculo de los límites de inflamabilidad, es decir, se utilizó el LFL como referencia para los contornos de dispersión debido a que define la frontera física del peligro de incendio y explosión. Por ello, se obtuvo un valor de límite para los cuatro combustibles con la ecuación (1), los resultados están disponibles en la Tabla 1. Y, seguidamente, se reemplazó el contorno o LFL en el simulador HyRAM+ v6.1 en la sección de dispersión de la nube inflamable junto con el diámetro de fuga de 20 milímetros.

$$\frac{1}{LFL_{mix}} = \sum \frac{y_i}{LFL_i} \quad (\text{Ec. 1})$$

Tabla 1.

Límites de inflamabilidad superior e inferior calculados.

	LFL	UFL
H₂	0,04	0,75
CH₄	0,05	0,15
B1	0,04878	0,163043

B2	0,047619	0,178571
----	----------	----------

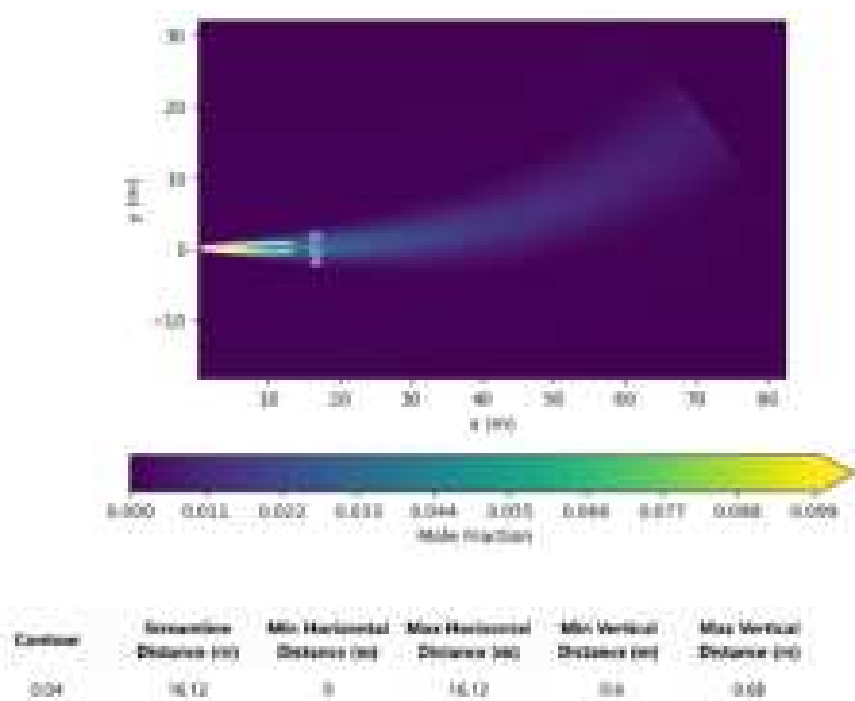
5.1 Resultados del modelado de consecuencias físicas: dispersión de la nube inflamable a (plume dispersion)

El simulador reporta como resultado una gráfica que sigue la tendencia de la Figura 4 y seis distancias para cada combustible (ver apéndice A). Como punto de partida, los contornos (LFL) suelen aparecer como líneas blancas que delimitan las zonas donde la mezcla es inflamable. Además, el gráfico utiliza una escala de colores para representar la concentración del gas en el espacio, como revela el pentágono inferior donde más morado sea menor fracción molar habrá (0.0); a medida que avanza y se acerca al amarillo aumenta su concentración (0.099).

De este modo, el simulador proporciona seis distancias que, permiten visualizar dicha extensión horizontal y vertical de la nube inflamable para las condiciones de 1MPa y 288K como se muestra en la parte inferior de Figura 4. Se puede escoger una distancia en el eje x y eje y, de esta manera se evidencia el nivel concentración de gas va a estar la nube inflamable. Por ejemplo, por debajo de los 10 metros, está en proximidad fuente de fuga y, por lo tanto, su concentración es mayor. Esto permite determinar las distancias de peligro y a ubicar infraestructura de manera segura. En escenarios boyantes, el gas se mezcla y se diluye por debajo de los niveles inflamables más cerca de la fuente en términos de desplazamiento horizontal.

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG**Figura 4.**

Cambio de fracción molar de hidrógeno a 30 °C y resultados de distancias de la dispersión de la nube inflamable.

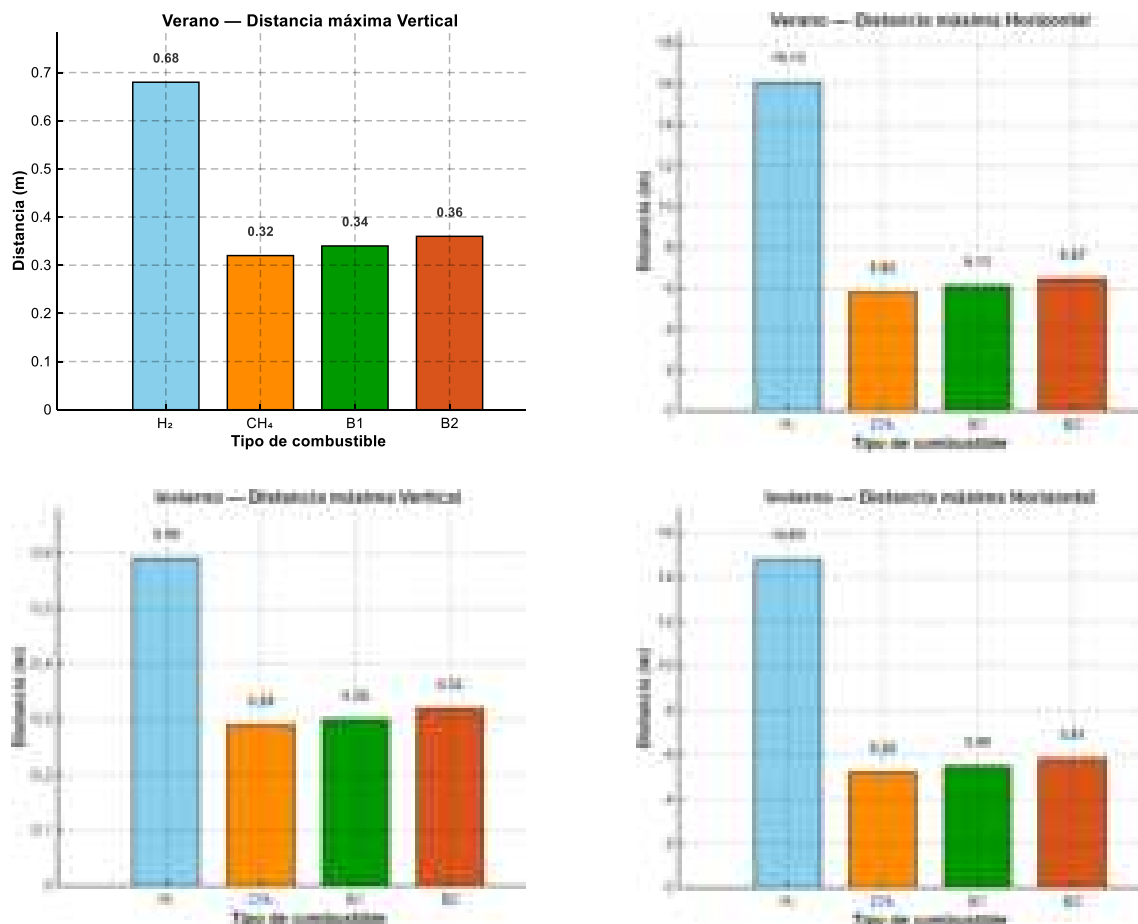


Luego, al extraer cada una de las distancias arrojadas se realizaron las gráficas de la Figura 5, se observa que en verano aumenta en un factor de 2 centímetros la distancia vertical al añadir hidrógeno, en cuanto al cambio en la distancia horizontal es alrededor de 30 centímetros. Durante el invierno el comportamiento se mantiene similar, ahora bien, la disminución de la distancia de la nube inflamable se debe principalmente al aumento de la fuerza de flotabilidad (flotabilidad) y a cambios en los parámetros adimensionales que rigen la dispersión, como el número de Froude.

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Figura 5.

Distancias máximas vertical y horizontal por combustible en condiciones de verano e invierno.



Conviene destacar que la nube inflamable asciende de forma más vertical y rápida hacia la atmósfera. Si bien, las bajas temperaturas afectan la densidad del aire y del gas liberado, pueden limitar la capacidad de la mezcla para expandirse rápidamente en la atmósfera, debido a que las variaciones en la velocidad y dirección del viento durante el invierno limitan la dilución del gas con el aire ambiental, lo que resulta en distancias de dispersión más cortas, pero con concentraciones potencialmente más altas cerca de la fuga afectando en mayor medida a los operarios y personas cercanas a la zona de fuga.

Los resultados de este estudio evidencian una tendencia coherente con las investigaciones de Sandia National Laboratories (SNL), al mostrar que la incorporación de hidrógeno al metano

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

prolonga la permanencia de la zona inflamable. Este comportamiento se atribuye a que las mezclas presentan un Límite Inferior de Inflamabilidad (LFL) menor que el del metano puro, lo que implica que se requiere una mayor dilución con aire para reducir la concentración por debajo de los niveles de inflamabilidad.

Por otro lado, las condiciones de estabilidad atmosférica típicas del invierno (Clase F de Pasquill) (Whaley & Lee, 1982) maximizan la distancia horizontal de las nubes inflamables de mezclas debido a la turbulencia ambiental está fuertemente suprimida. Esto significa que no existe suficientes "remolinos" de aire para romper la nube de gas y mezclarla con aire fresco de manera rápida.

Esta misma tendencia se observa en el riesgo terrestre del hidrógeno puro, ya que puede intensificar en verano bajo vientos moderados, ya que el momento (momentum) del viento puede contrarrestar esta flotabilidad, obligando a la nube inflamable a permanecer más cerca del suelo. Ahora bien, el modelo físico de HyRAM+ generalmente no tiene en cuenta el viento; esto se considera una suposición conservadora porque, en la mayoría de los casos, el viento tiende a dispersar el hidrógeno y reducir las concentraciones promedio en lugar de extender el rango inflamable (Ehrhart et al., 2023).

5.2 Resultados del modelado de consecuencias físicas: llama de chorro (jet flame)

De acuerdo con lo planeado, cuantificar el impacto físico de una liberación accidental de los cuatro combustibles, se continuó con el modelado de llama de chorro donde se seleccionaron tres distancias de daño para simular en diferentes áreas de fuga, criterios de daño y presiones como sugiere la Tabla 3. En el caso de 2 metros en el eje y para representar la altura de la cabeza de un trabajador alto y debido a que el simulador no admite decimales.

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Dado que el hidrógeno es más ligero que el aire, tiende a elevarse, por lo que medir a 2 m es una aproximación realista y prudente para capturar la nube (Groth et al., 2023). A modo de referencia se tuvo en cuenta el valor exacto del LFL 4% fracción molar del hidrógeno para una fuga del 20% del área en este rango de presión (0.10-1.72 MPa) es 31.2 metros lo cual, permite situar un receptor justo en el borde de la zona inflamable según la Tabla 3-3 (ver apéndice F) (J. Lachance et al., 2009).

Tabla 2.

Coordenadas seleccionadas para simular en HyRAM+.

Punto	X (Axial)	Y (Altura)	Z (Lateral)	Justificación
1	5	2	0	Zona de impacto inmediato: Evaluación de fatalidad para un operador en la base del equipo.
3	20	2	0	Transición de daño: Evaluación del modelo probit de impacto en la cabeza (<i>Head Impact</i>).
10	100	2	0	Control de riesgo despreciable: Demuestra el alcance nulo del evento.

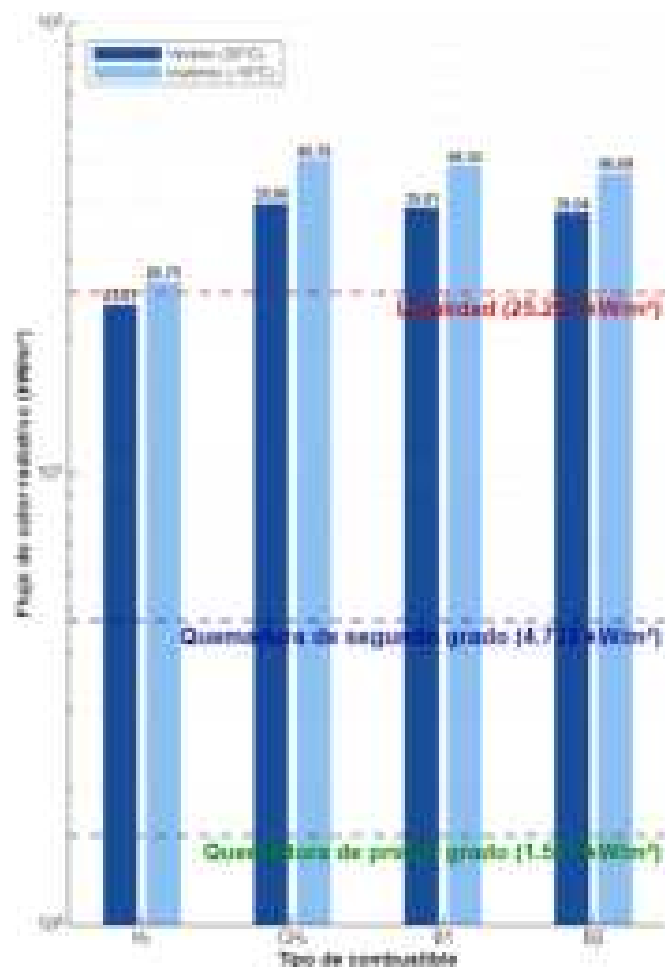
Con los puntos definidos se tuvo la información necesaria para ejecutar las simulaciones, los resultados de la simulación (ver apéndice B) se ingresaron en un código de Matlab el cual muestra el flujo de calor radiactivo para cada combustible.

En primer lugar, en la Figura 6 se nota que, el hidrógeno está en límite de letalidad mientras que el metano y las mezclas sobrepasan dicho umbral; el valor mayor de flujo de calor radiactivo corresponde al metano con 39.9 kW/m² en verano y 49.78 kW/ m² en invierno, en general, habría una fatalidad total para todos los casos en la zona de impacto. Este comportamiento, se mantiene similar hasta los 10m en el eje x, con el fin de entender mejor se realizó la gráfica espacial donde se ve la ubicación de los tres puntos (ver Figura 9).

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Figura 6.

Flujo de calor en el Punto 1.



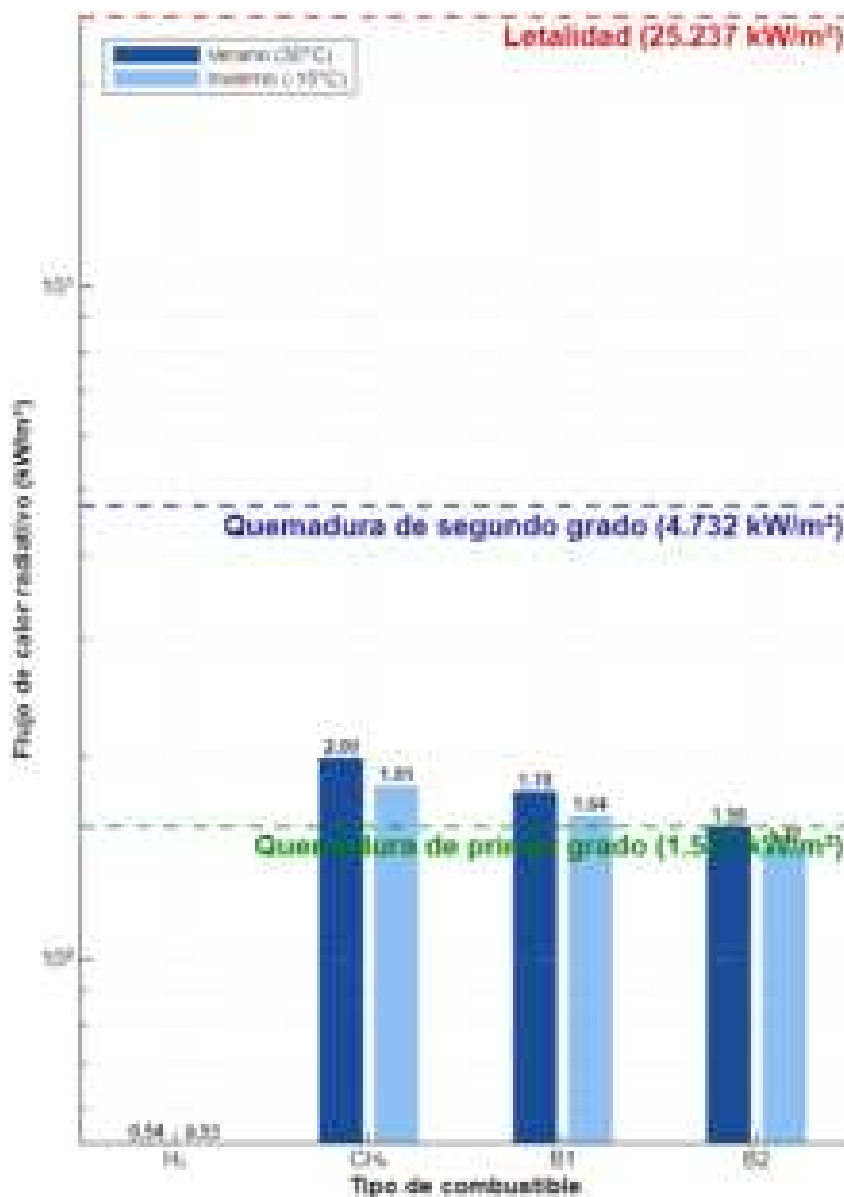
En la Figura 7, el metano sigue siendo mayor en comparación con el flujo de hidrógeno que es considerablemente menor al umbral estándar 1.6 kW/m^2 . Lo que significa que a 20 metros no esperaría un daño térmico significativo para las personas con el hidrógeno. En el caso de las mezclas provocaría quemaduras de primer grado en el punto 3. En cuanto a la Figura 8, los flujos de calor de magnitud $0.01\text{-}0.03 \text{ kW/m}^2$ representan un valor técnicamente despreciable o de riesgo nulo. Para dimensionar este valor, en Países Bajos la radiación máxima en junio puede llegar a ser

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

de 0.9 kW/m² (TNO, 1992). No representa ningún riesgo para las personas, la infraestructura o el equipo, y está muy por debajo de la radiación solar normal.

Figura 7.

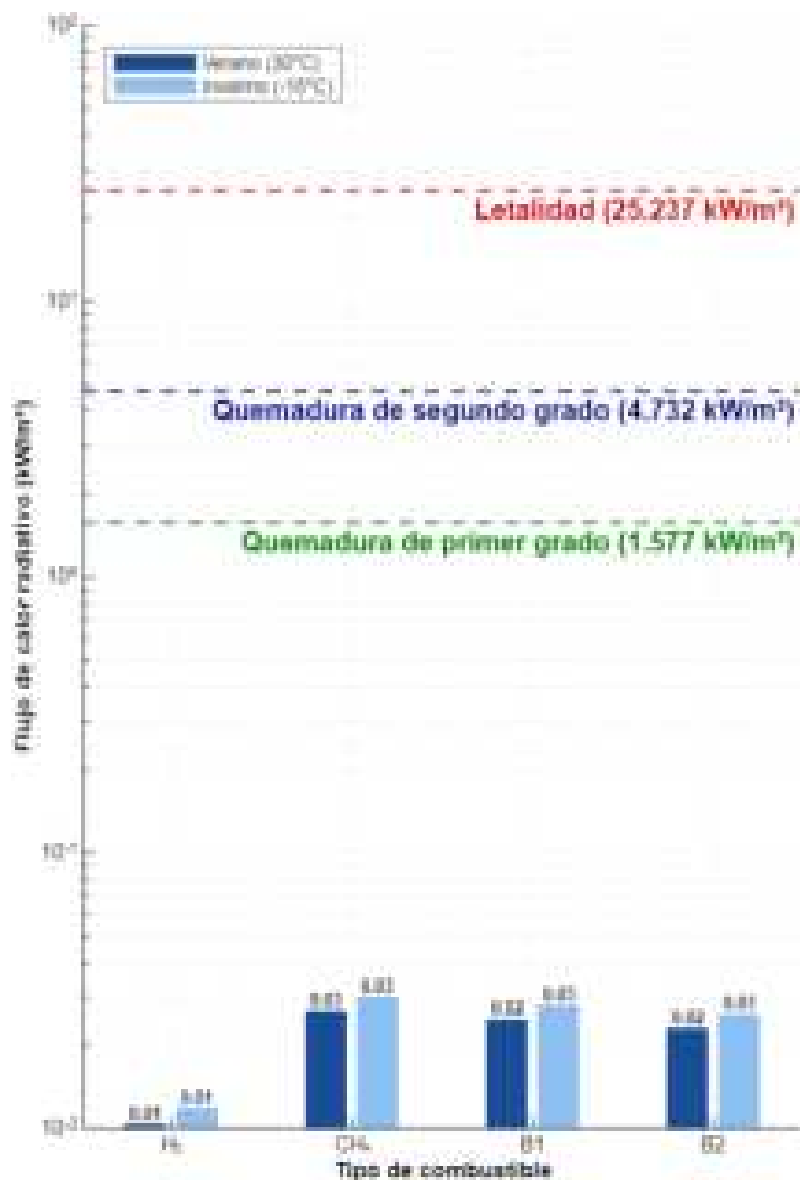
Flujo de calor en el Punto 3



DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Figura 8.

Flujo de calor en el Punto 10.



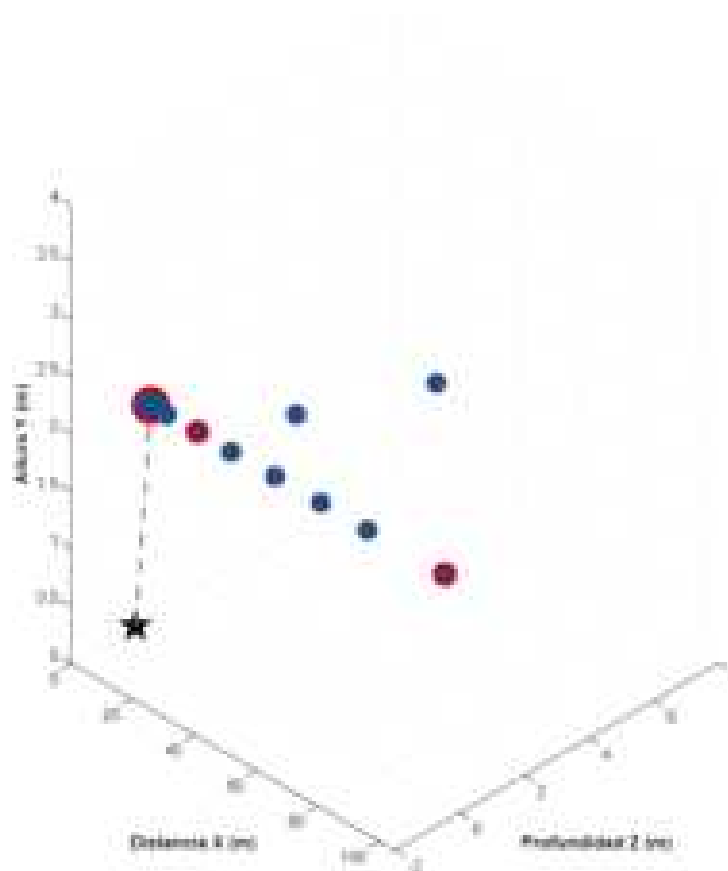
Nota. Lo que muestra el gráfico de barras: flujo de calor radiativo (kW/m²) para los puntos, comparando dos condiciones (etiquetadas "verano" e "invierno"). Las salidas de HyRAM+ están convertidas de W/m² a kW/ m². Escala Y: logarítmica, lo que enfatiza diferencias relativas en rangos grandes (valores altos y bajos). Líneas de referencia: umbrales de quemadura y letalidad.

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Estas referencias permiten una interpretación cualitativa del riesgo por punto, al añadir hidrógeno al metano aumenta la velocidad de combustión y el flujo de calor debido a la mayor reactividad del hidrógeno. Por ejemplo, las mezclas enriquecidas con hidrógeno presentan temperaturas de llama más altas y una propagación más rápida de la llama (Lei et al., 2023; Trotsenko et al., 2025).

Figura 9.

Visualización 3D- posición espacial de los puntos respecto a la fuente.



Nota. Se muestra el borde rojo de los puntos analizados según distancia.

En términos de combustión, el hidrógeno presenta mayor temperatura de llama y velocidad de combustión que el gas natural, lo cual puede modificar la intensidad térmica de los eventos de ignición como se reveló en las Figuras 6, 7, 8. Al mismo tiempo, por ser una molécula pequeña y altamente difusiva, puede interactuar con los materiales de la infraestructura de manera distinta al

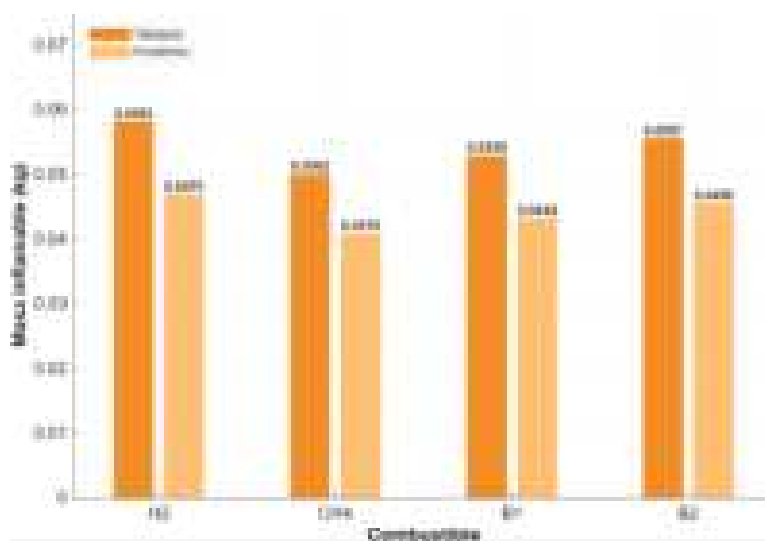
DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

metano, aspecto relevante para evaluar permeabilidad, degradación mecánica y condiciones de operación segura (Schiro et al., 2020).

El rango de inflamabilidad del hidrógeno es amplio y su energía mínima de ignición es baja; por ello, la adición de hidrógeno H₂ al gas natural tiende a ampliar el intervalo de concentraciones inflamables y a aumentar la sensibilidad frente a fuentes de ignición. Esta condición es central para interpretar escenarios de incendio de chorro, bola de fuego y explosión de nube de vapor (Amez et al., 2025; D. A. Crowl & Jo, 2007; Kwak et al., 2024; Zhao & Guo, 2025).

Figura 10.

Masa inflamable por combustible y variación estacional.



La figura 10 registra un conjunto de barras agrupadas que compara la masa inflamable (kg) para los cuatro combustibles del estudio (H₂, CH₄, B1, B2). Este parámetro actúa como puente entre la dispersión de la nube y la severidad de una posible explosión. Representa la cantidad total de combustible (en kilogramos) que se encuentra en una concentración capaz de arder o explotar si encuentra una fuente de ignición retardada.

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Dichas masas inflamables están en un rango estrecho, aproximadamente 0.041–0.058 kg, es evidente que para todos los combustibles en verano es mayor que en invierno, por ejemplo, H₂ = 0.0583 kg (verano) vs 0.0470 kg (invierno) y CH₄ = 0.0502 vs 0.0410 kg. Se observa que, el hidrógeno es mayor que las mezclas 10% y 20% de H₂ y que el metano, esto indica que la cantidad de combustible acumulado dentro de los límites de inflamabilidad aumenta con el contenido de hidrógeno en la mezcla, este comportamiento comprueba que el rango de inflamabilidad extremadamente amplio del hidrógeno domina sobre el del metano, mientras que, el hecho de que la mezcla B2 sea mayor que B1 confirma que el modelo está adquiriendo correctamente la sensibilidad del sistema al enriquecimiento con hidrógeno; incluso pequeñas adiciones de hidrógeno aumentan significativamente la masa que puede participar en un evento de ignición retardada.

5.3 Resultados del modelado de consecuencias físicas: Sobrepresión sin confinamiento (Overpressure Unconfined)

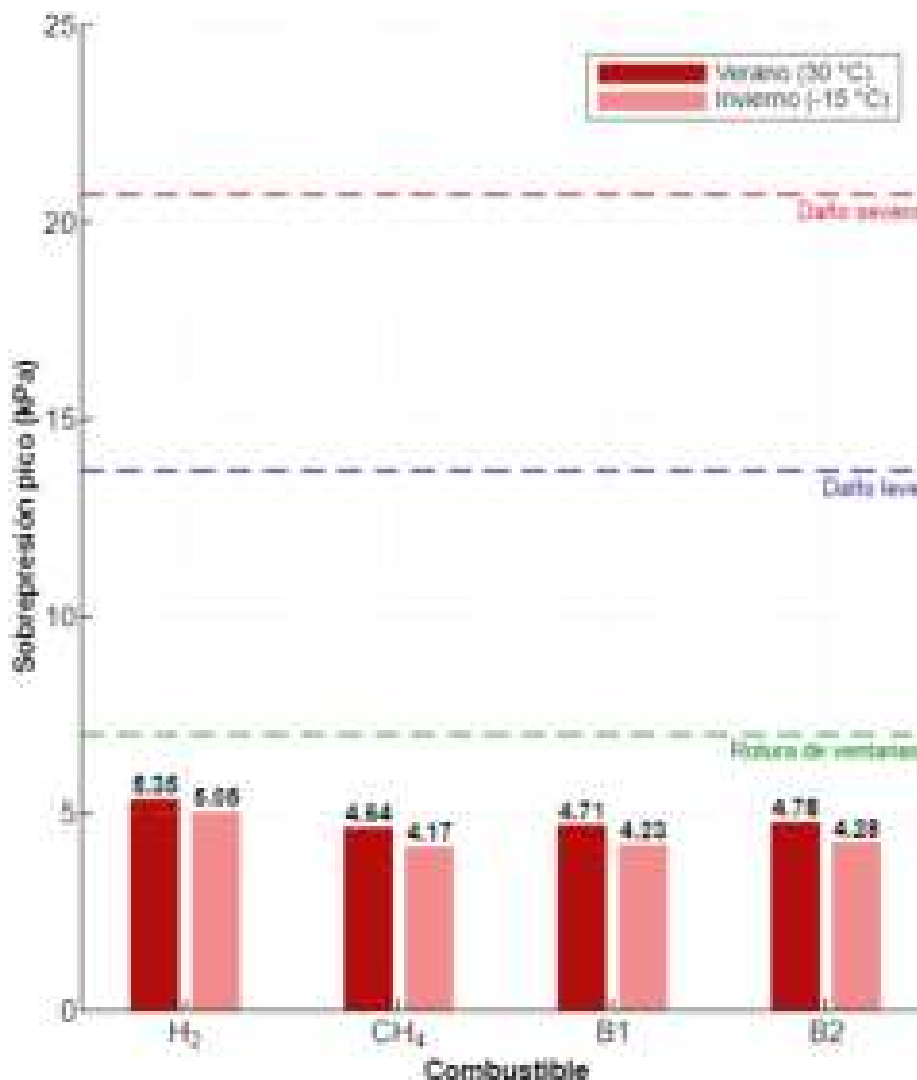
La evaluación de la sobrepresión y el impulso es fundamental para caracterizar las consecuencias de una ignición tardía (explosión de nube de vapor o VCE) tras una fuga de 20 mm con el modelo BST (Baker-Strehlow-Tang) y una velocidad de llama de 0.35 Mach, orientado a determinar si la presión generada alcanza los umbrales de daño. Como se evidencia en la Figura 11 en los tres puntos elegidos se encontraron por debajo de tal rotura de vidrios. Siendo mayor en el punto más cercano, en cuanto a las variaciones estacionales, verano muestra valores algo mayores que invierno para todos los combustibles donde la presión 5.05 kPa en verano cambia a 5.35 kPa en invierno para el hidrógeno, lo que lo ubica dentro del rango 3.4–6.9 kPa, donde las ventanas grandes y pequeñas suelen romperse; daños ocasionales a los marcos de las ventanas según estimaciones de daños para estructuras comunes basadas en la sobrepresión (D. Crawl &

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Louvar, 1990). De igual manera, está ligeramente inferior de 7-14 kPa, presión que comienza a distorsionar marcos de acero y paneles de fibrocemento (TNO, 1992).

Figura 11.

Punto 1. Trabajador cercano (10, 1.5, 0) evalúa el riesgo a una distancia de operación mínima.

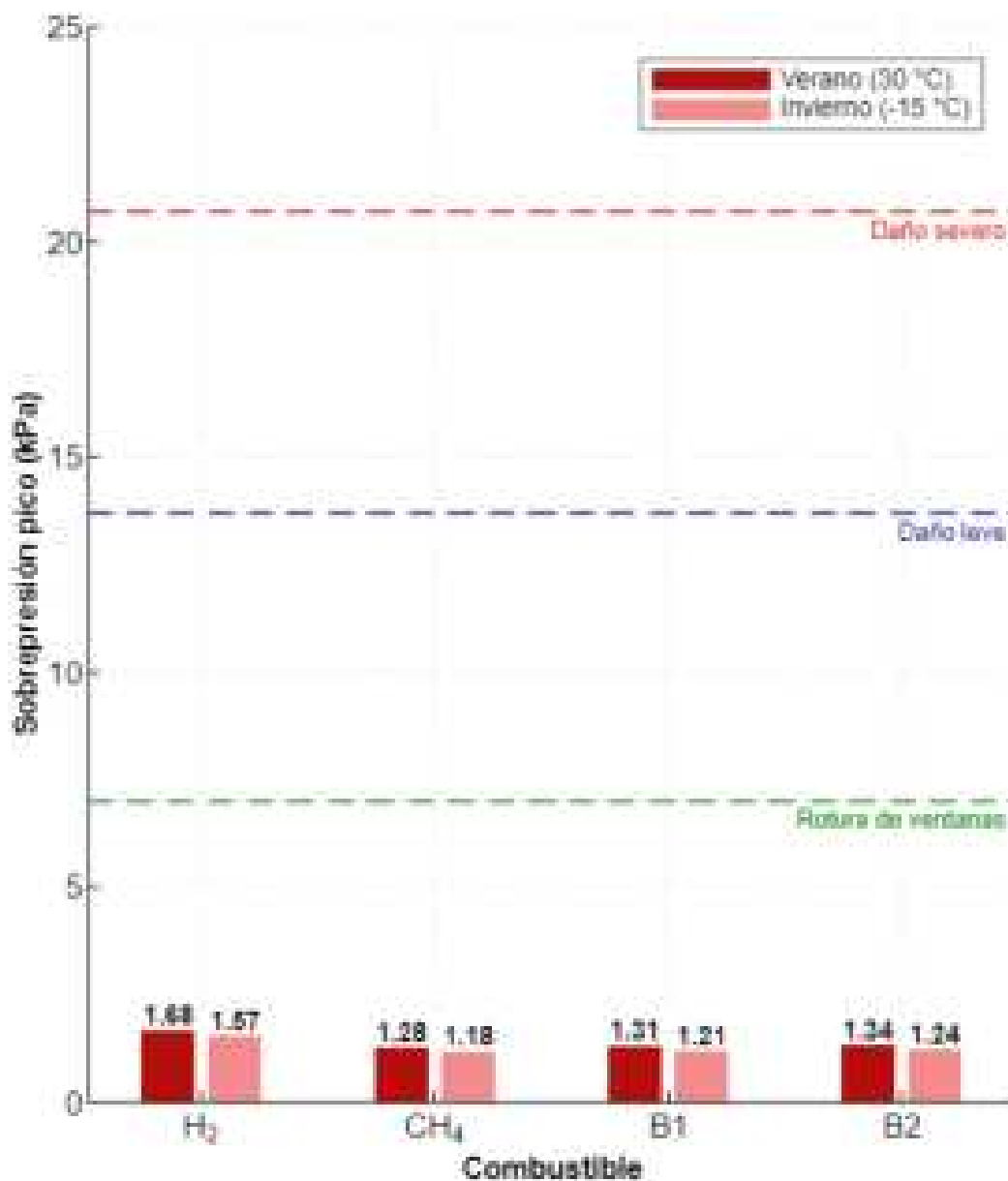


Del mismo modo, en los Puntos 2 y 3, se encuentra en un valor próximo a la presión típica para la rotura de vidrio (1.03 kPa)(D. Crowl & Louvar, 1990). Esto muestra la típica disminución de presión con la distancia desde la fuente. En contraste, el metano CH₄ y las mezcla B1 y B2 están ligeramente por debajo. Las diferencias entre combustibles son del orden de décimas de kPa.

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Figura 12.

Punto 2. alcance LFL: (30, 1.5, 2) verifica consecuencias en el borde de la nube inflamable.

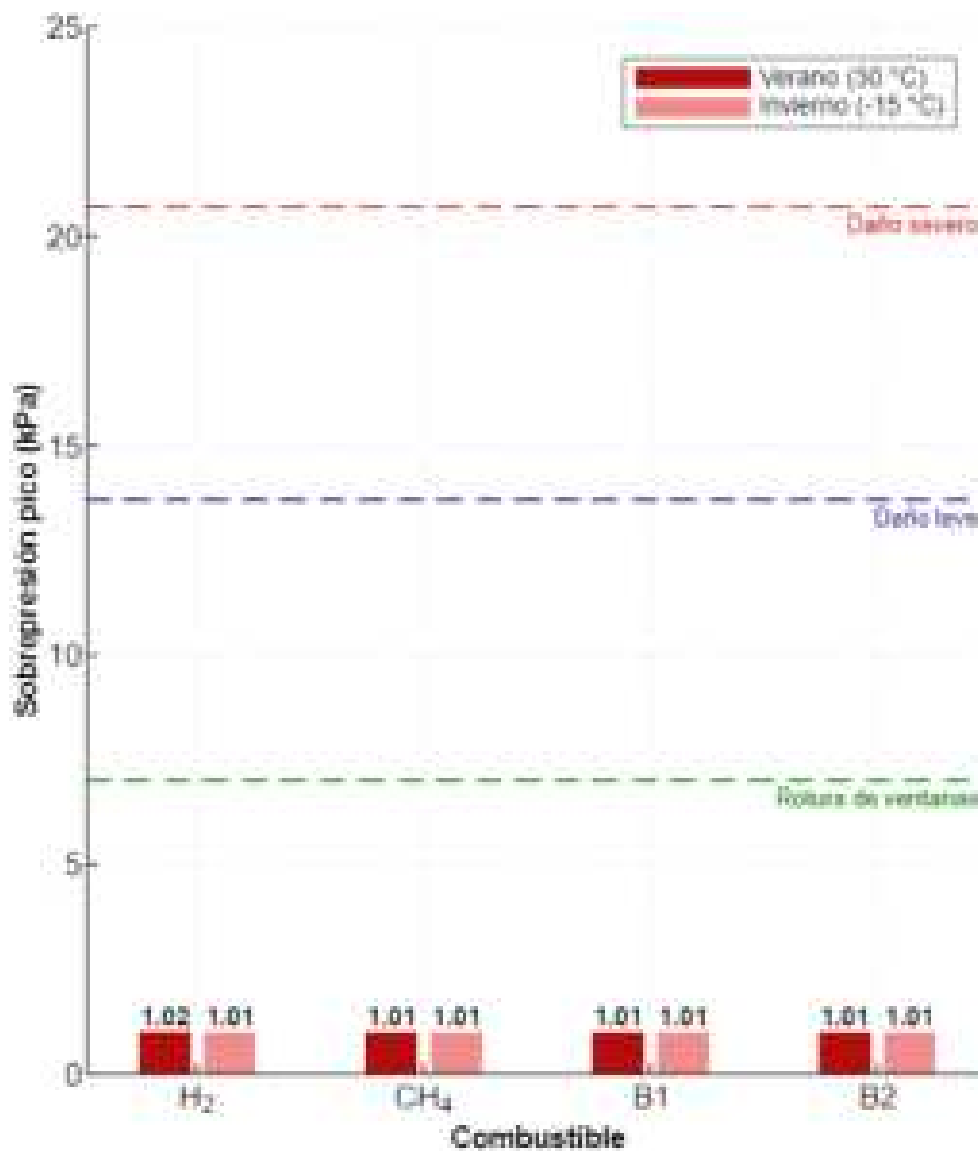


La diferencia estacional es consistente pero pequeña. En las figuras 11, 12, y 13, todos los valores están por debajo de 7 kPa, por lo tanto, no se espera riesgo inmediato de lesiones como la ruptura de tímpanos o la hemorragia pulmonar causadas principalmente por la sobrepresión pico (fuerza inmediata) según los umbrales que usa HyRAM+ (Groth et al., 2021).

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Figura 13.

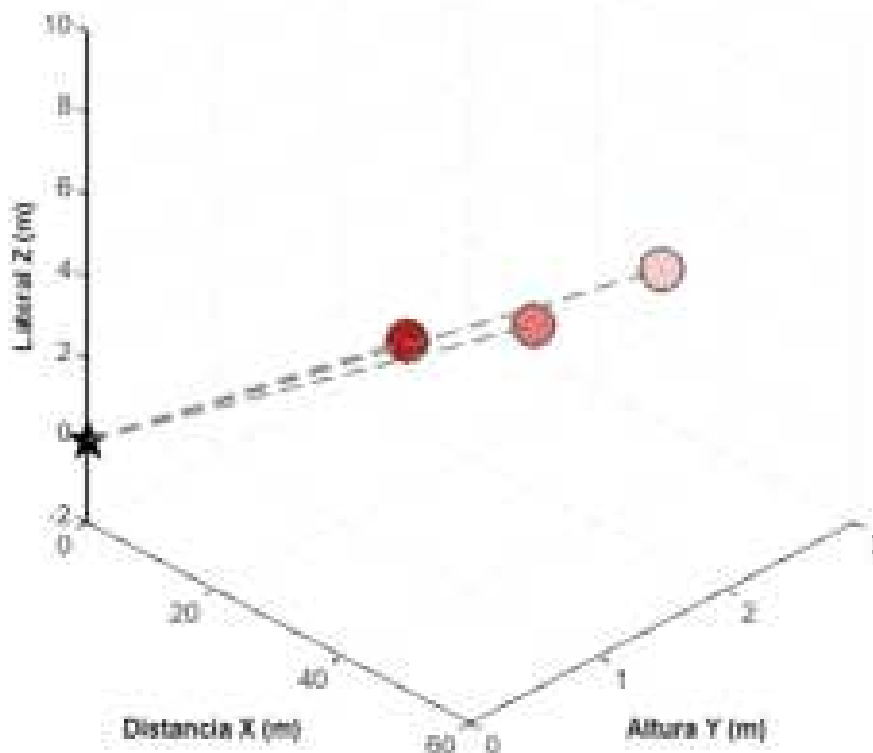
Punto 3. Seguridad pública: (50, 1.5, 5) indica que a esa distancia la sobrepresión ya no es letal.



Esto indica que, el riesgo por onda de choque (rotura de vidrio, lesiones, colapso) es bajo en los puntos evaluados, tal como el hidrógeno ligeramente más crítico que los otros combustibles, pero la diferencia no cambia la clasificación de riesgo. Para una mejor comprensión de la situación se ilustra la ubicación espacial de los puntos analizados en la Figura 14.

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG**Figura 14.**

Sobrepresiones máximas (kPa) en los tres puntos espaciales.



Nota. Los valores provienen de HyRAM convertidos a kPa

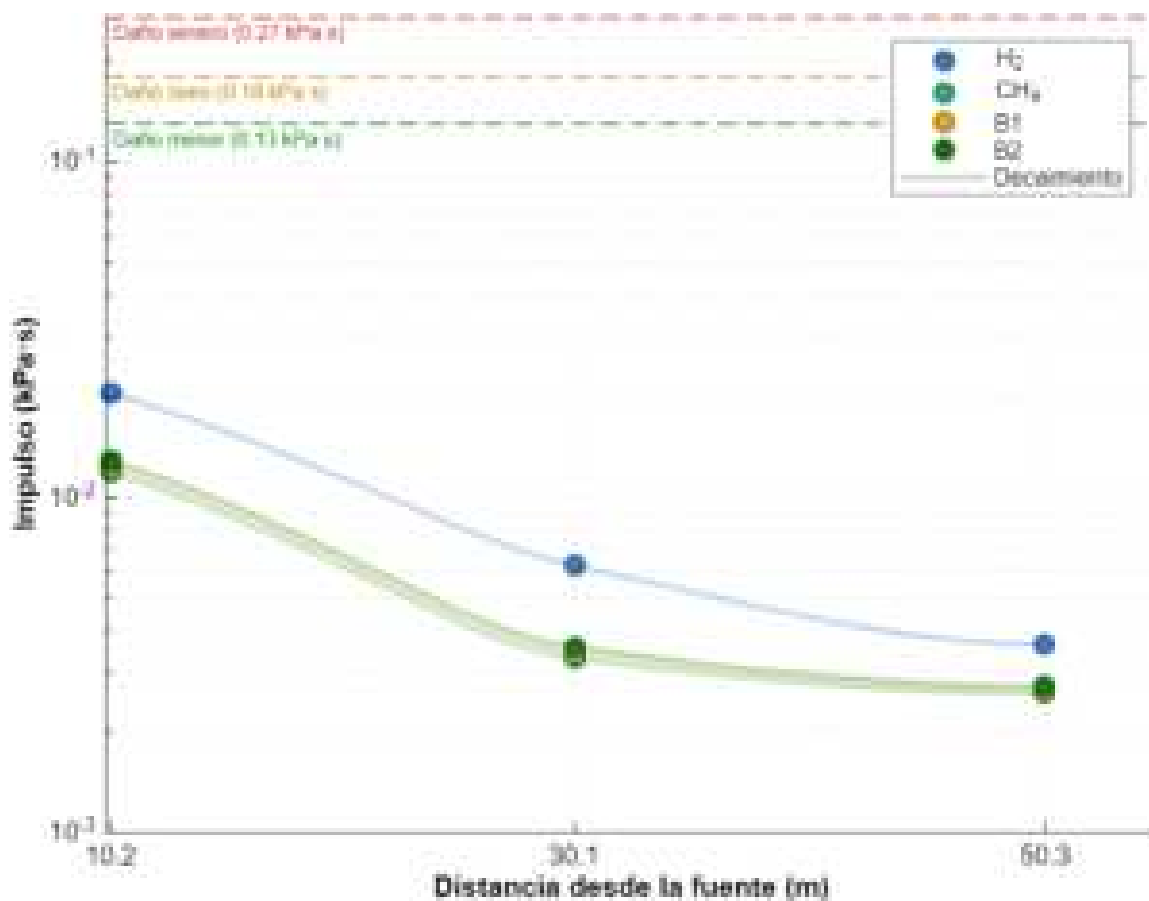
Por otra parte, el impulso que depende críticamente del colapso de edificios o el desplazamiento de personas (impacto en la cabeza) ya que las estructuras pesadas tienen inercia y necesitan que la presión actúe durante un tiempo suficiente para deformarse o moverse (Groth et al., 2025). En la Figura 15 los valores están muy por debajo del umbral de daño menor donde las estructuras civiles comienzan a sufrir daños que las hacen inhabitables, aunque no necesariamente colapsan por completo (D. Crowl & Louvar, 1990). Pese a ello, el hidrógeno sigue teniendo el valor más alto: 0.0238 kPa·s y se reduce significativamente en el Punto 2 = 0.0072

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

kPa·s y Punto 3 = 0.0040 kPa·s coherente con dispersión y decaimiento. Con respecto al metano CH₄, las mezclas B1 y B2 presenta valores inferiores y similares entre sí.

Figura 15.

Comparación de impulso por combustible frente a umbrales de daño fisiológico (verano, 30 °C).

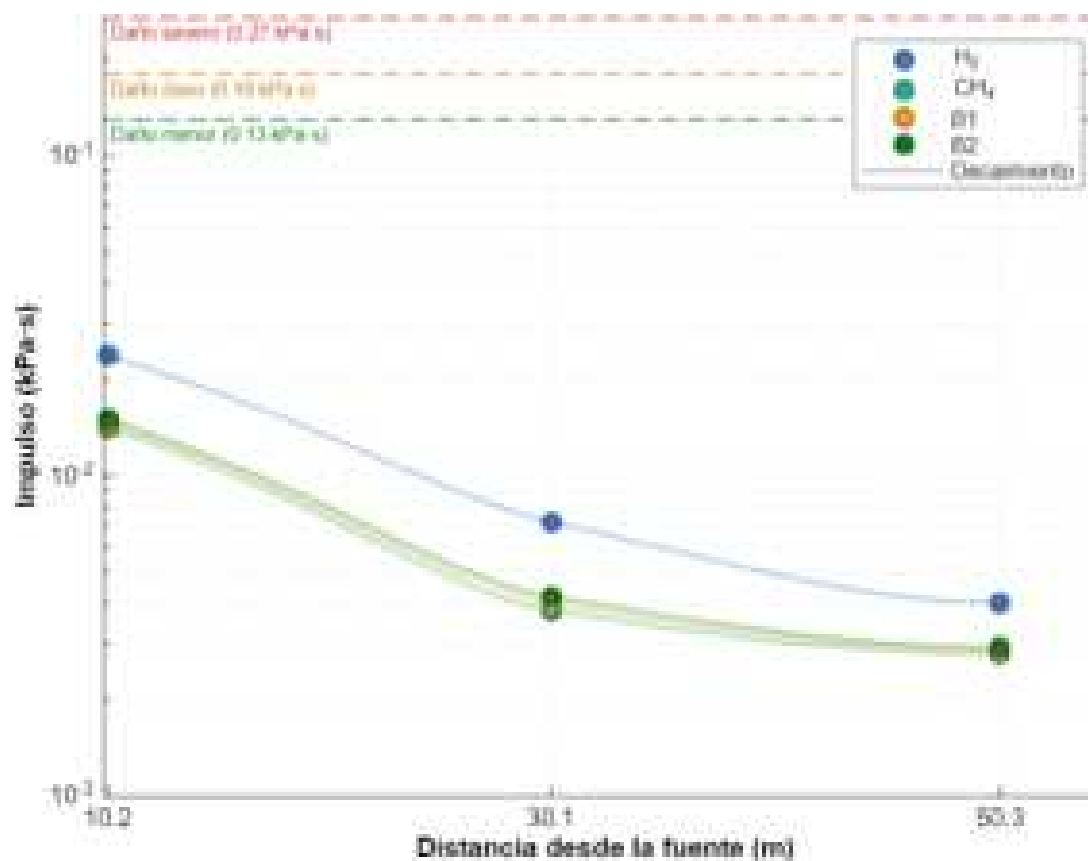


En lo que concierne a las variaciones estacionales, verano es sistemáticamente 15% más alto que invierno, mismo punto y combustible probablemente por el efecto de la temperatura ambiente ya que hay un cambio en la dinámica de dispersión y a la densidad del aire, lo cual reduce la cantidad de energía disponible para la onda de choque (ver Figura 15).

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Figura 16.

Comparación de impulso por combustible frente a umbrales de daño fisiológico (invierno, -15 °C).



Por tanto, en ninguno de los 3 puntos evaluados, para ningún combustible, en ninguna estación, el impulso de la onda de sobrepresión alcanza siquiera el umbral de lesión más leve.

5.4 Resultados métricas de riesgo.

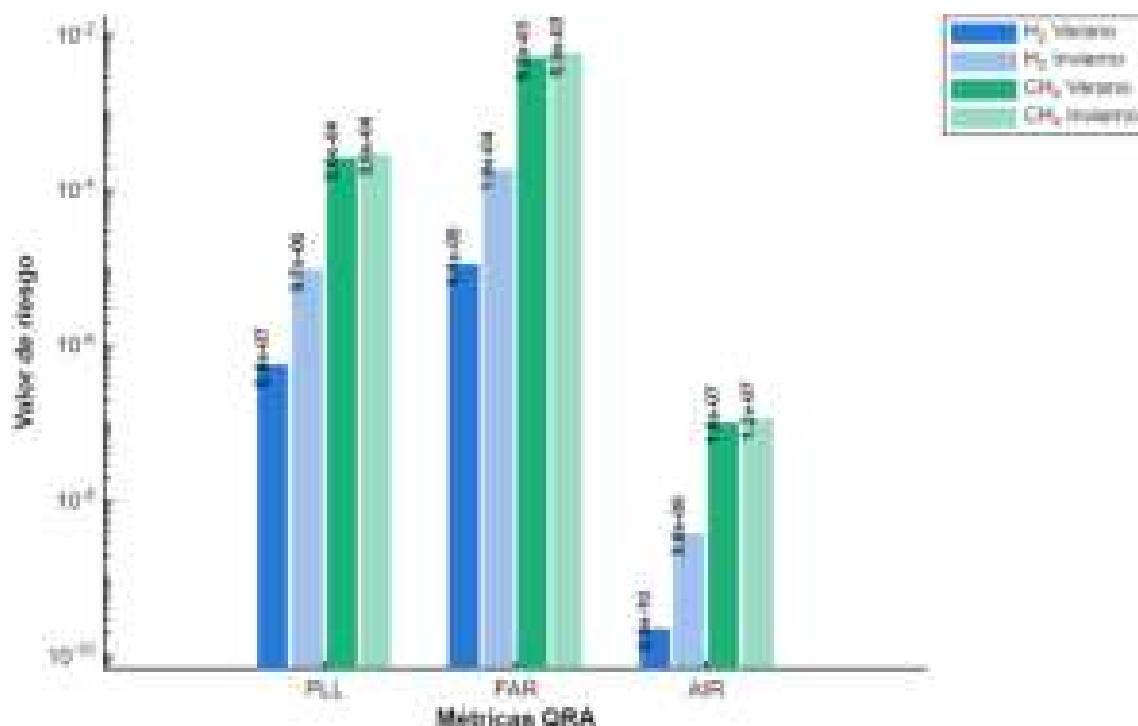
Las métricas PLL, FAR y AIR son los indicadores fundamentales que permiten traducir los datos físicos (fugas, incendios, explosiones) en niveles de riesgo humano para la toma de decisiones. El cálculo de la Pérdida de Vidas Potencial (PLL) requiere estimar la población expuesta en las cercanías de la infraestructura. Esta se determinó a partir de la densidad poblacional del área de estudio (según escala de la Figura 3) y un área de referencia de exposición, resultando en 581 personas cercanas (ver Apéndice D). En la Figura 17. las barras muestran valores

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

claramente superiores a los del hidrógeno. Tanto metano como hidrógeno son relativamente mayores en invierno que en verano debido a la capacidad de la atmósfera para diluirlos.

Figura 17.

Diagrama de barras (escala logarítmica en Y) que muestra tres métricas QRA para cuatro escenarios: H₂ verano, H₂ invierno, CH₄ verano y CH₄ invierno.



Los resultados obtenidos en este estudio muestran niveles de riesgo para el hidrógeno 2.282×10^{-10} de (verano) y 3.789×10^{-9} (invierno), valores que se sitúan significativamente por debajo del umbral de riesgo despreciable de 10^{-6} definido en diversos modelos de riesgo público, que representa el límite de riesgo ampliamente aceptable para el público en general de acuerdo con los marcos regulatorios internacionales y las guías de la IEA (Jonkman et al., 2003; J. L. Lachance, 2009).

En el caso del metano, los resultados de 1.036×10^{-7} y 1.177×10^{-7} se mantienen un orden de magnitud por debajo del estándar de aceptabilidad general (10^{-6}) y cumplen con el principio

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

ALARP que no busca eliminar todo riesgo, sino asegurar que todo recurso invertido en seguridad produzca la mayor reducción de riesgo posible, manteniendo el sistema dentro de límites sociales y legalmente tolerable (Groth et al., 2012). Dado que todos los valores analizados son inferiores a los límites intolerables de 10^{-4} (J. L. Lachance, 2009) (ver apéndice E).

Tabla 3.

Frecuencia de fallas de componentes en la tubería de distribución y servicio para un escenario de fuga media (19.06mm) (Joshi et al., 2025)

Tipo de combustible	AIR residencial (muertes/año)	AIR comercial (muertes/año)	AIR recreativo (muertes/año)
H₂	2.5E-06	5.0E-06	7.5E-06
CH₄	1.25E-07	2.5E-07	3.75E-07
B1 (20% H2 in NG)	2.5E-07	5.0E-07	7.5E-07
B2 (40% H2 in NG)	1.25E-06	2.5E-06	3.75E-06

Nota. Estas composiciones corresponden a los datos usados en el estudio de Joshi (2025).

Al comparar con el estudio base, los valores de riesgo individual se encuentran en magnitud de 10^{-6} , es decir, un nivel de riesgo ampliamente aceptable y 10^{-7} ; un nivel de riesgo insignificante o despreciable como revela la Tabla 3, para diferentes tipos de uso de la tierra. Por último, se comprueba una fiabilidad de los datos hallados en HyRAM+ ya que son consistentes para el hidrógeno, metano y mezclas al 20% de hidrógeno.

6. Conclusiones

Se concluye que la adición de hidrógeno al 10 % y 20 % mol en una red urbana de gas natural a 1 MPa altera el perfil de riesgo físico respecto al metano puro, aunque bajo las condiciones simuladas el cambio no representa un incremento crítico del riesgo individual. El efecto más evidente se presenta en la dispersión horizontal, con variaciones del orden de 30 cm al incorporar hidrógeno, mientras que la radiación térmica se mantiene como la consecuencia dominante en la proximidad inmediata a la fuga y la sobrepresión por explosión no supera los umbrales de daño considerados. Esto indica que las distancias operacionales seguras deben priorizar el control de exposición térmica y la delimitación de la nube inflamable.

En concordancia con el primer objetivo específico, se definieron las condiciones del escenario de fuga mediante la selección del sistema de referencia, los combustibles evaluados, los parámetros operativos y las variaciones estacionales. Esta caracterización permitió construir una base de simulación coherente para comparar metano, hidrógeno puro y mezclas H₂-NG bajo un mismo marco metodológico.

Dado que el riesgo individual obtenido se mantiene por debajo de los umbrales establecidos por MIACC y CSChE, los resultados respaldan la aceptabilidad de la red evaluada bajo el enfoque ALARP y evidencian la viabilidad técnica preliminar de incorporar hidrógeno en proporciones moderadas dentro de redes existentes de gas natural. No obstante, su implementación debe estar acompañada de criterios de seguridad específicos, evaluación de riesgos, actualización de protocolos operativos y verificación de compatibilidad de materiales, de modo que estos hallazgos puedan servir como base técnica para fortalecer la normativa nacional y apoyar la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia.

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Como limitación del estudio, los resultados dependen de los supuestos del modelo y de las condiciones definidas para la simulación. En particular, la ausencia de efectos meteorológicos detallados y la restricción del módulo QRA para mezclas intermedias indican la necesidad de trabajos posteriores que incorporen validación experimental, análisis con viento y evaluación probabilística específica para composiciones H₂-NG.

El uso de la herramienta de código abierto HyRAM+ garantiza que las instituciones educativas colombianas puedan realizar análisis de riesgo de alto nivel sin depender de licencias comerciales que impliquen una inversión considerable, ampliando así el acceso a la seguridad de procesos y la industria local.

7. Recomendaciones

Se recomienda emplear el código abierto en Python para analizar la influencia de la velocidad del viento y calcular métricas de riesgo específicas para las mezclas, dado que este parámetro puede modificar de forma significativa el comportamiento de una fuga. En ese sentido, se sugiere sustituir las coordenadas utilizadas por ubicaciones más precisas de puntos de interés, como edificios, cercas o posiciones reales del personal, con el fin de aumentar la confiabilidad de las simulaciones y fortalecer la interpretación de los resultados. Finalmente, se propone evaluar fracciones mayores de hidrógeno para ampliar el alcance del análisis.

Resulta conveniente la adopción de estándares internacionales tales como ASME B31.12, NFPA2 y CSAZ662 en los organismos encargados en Colombia, como el Ministerio de Minas y Energía.

Se sugiere continuar expandiendo esta línea de investigación en seguridad de procesos en la UIS. Tomando como base este estudio para futuras colaboraciones internacionales que permitan validación piloto de la integración de hidrógeno en la red colombiana de gas.

Referencias bibliográficas

Agencia Internacional de la Energía. En Wikipedia, la enciclopedia libre. (2026).

Alkhatib, I. I. I., AlHajaj, A., Almansoori, A., & Vega, L. F. (2022). Accurate Predictions of the Effect of Hydrogen Composition on the Thermodynamics and Transport Properties of Natural Gas. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 61(18), 6214–6234.

<https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.2C00363>

Amez, I., Castells, B., León, D., & Paredes, R. (2025). Study of quaternary hydrogen and biogas mixtures: An industrial safety approach. *Fuel*, 381.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133663>

Binda, M. ., Bruinen de Bruin, Y. ., & Fabbri, L. . (2017). *Accident Damage Analysis Module (ADAM) : technical guidance : software tool for consequence analysis calculations.*

Publications Office of the European Union.

Blackwell, C., Wallace, H., Khan, M., & Weinkauf, B. (2024). DEVELOPMENT OF PIPELINE STANDARDS FOR THE DELIVERY OF HYDROGEN AND HYDROGEN BLENDS. *Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference IPC*, 5. <https://doi.org/10.1115/IPC2024-133242>

Briottet, L., Moro, I., & Lemoine, P. (2012). Quantifying the hydrogen embrittlement of pipeline steels for safety considerations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(22), 17616–17623. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2012.05.143>

Chen, H., & Mao, Z. (2017). The study on the results of hydrogen pipeline leakage accident of different factors. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 64(1), 12002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/64/1/012002>

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

CREG. (2008). *CIRCULACIÓN: M I E M BROS DE LA COM ISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS*

PRELIM INAR ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DEL GAS NATURAL EN EL PUNTO DE

ENTRADA DEL SISTEMA NACIONAL DE TRANSPORTE DE GAS-NÚMERO DE W O B B E-1.

ANTECEDENTES.

Crowl, D. A., & Jo, Y.-D. (2007). The hazards and risks of hydrogen. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 20(2), 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2007.02.002>

Crowl, D., & Louvar, J. F. (1990). *Chemical Process Safety_ Fundamentals with Applications Fourth.*

CSCHE. (s/f). *Chemical Institute of Canada.* s.f.

DNV. (s/f-a). *SAFETI.*

DNV. (s/f-b). *Safeti.*

DNV. (2013). *Phast; the industry hazard analysis software tool.*

Ehrhart, B. D., Hecht, E. S., & Schroeder, B. B. (2023). *SANDIA REPORT Technical Justifications for Liquid Hydrogen Exposure Distances.* <https://classic.ntis.gov/help/order-methods/>

Froeling, H., Dröge, M., Nane, G., & Wijk, A. (2021). Quantitative risk analysis of a hazardous jet fire event for hydrogen transport in natural gas transmission pipelines. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.248>

Groth, K. M., Hecht, E. S., Reynolds, J. T., Blaylock, M. L., & Carrier, E. E. (s/f). *SANDIA REPORT Hydrogen Risk Assessment Models (HyRAM) Version 3.0 Technical Reference Manual.*

Recuperado <https://classic.ntis.gov/help/order-methods>

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Groth, K. M., Hecht, E. S., Reynolds, J. T., Blaylock, M. L., Carrier, E. E., & Ehrhart, B. D. (2021).

SANDIA REPORT Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+)

Version 4.0 Technical Reference Manual. <https://classic.ntis.gov/help/order-methods>

Groth, K. M., Hecht, E. S., Reynolds, J. T., Blaylock, M. L., Carrier, E. E., & Ehrhart, B. D. (2023).

SANDIA REPORT Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+)

Version 5.1 Technical Reference Manual. <https://classic.ntis.gov/help/order-methods>

Groth, K. M., Hecht, E. S., Reynolds, J. T., Blaylock, M. L., Carrier, E. E., Ehrhart, B. D., &

Schroeder, B. B. (2025). *SANDIA REPORT Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk*

Assessment Models (HyRAM+) Version 6.0 Technical Reference Manual.

<https://classic.ntis.gov/help/order-methods>

Groth, K. M., Lachance, J. L., & Harris, A. P. (2012). *SANDIA REPORT Early-Stage Quantitative*

Risk Assessment to Support Development of Codes and Standard Requirements for Indoor

Fueling of Hydrogen Vehicles. [http://www.ntis.gov/help/ordermethods.asp?loc=7-4-](http://www.ntis.gov/help/ordermethods.asp?loc=7-4-0#online)

[0#online](http://www.ntis.gov/help/ordermethods.asp?loc=7-4-0#online)

Groth, K. M., Zumwalt, H. R., & Clark, A. J. (2016). *HyRAM V1.0 User Guide*.

Groth, K. M., Zumwalt, H. R., Clark, A. J., Sena, E. A., Ehrhart, B. D., Muna, A. B., & Morales, G. F.

(2023). *SANDIA REPORT HyRAM+ Version 5.0 User Guide*.

<https://classic.ntis.gov/help/order-methods/>

Houf, W., & Schefer, R. (2007). Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from

unintended releases of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(1), 136–

151. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.04.009>

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

- Houf, W., & Schefer, R. (2008). Analytical and experimental investigation of small-scale unintended releases of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(4), 1435–1444. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.11.031>
- Hu, Q., Zhang, X., & Hao, H. (2023). A review of hydrogen-air cloud explosions: The fundamentals, overpressure prediction methods, and influencing factors. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.302>
- IEA. (2020). *Technology Perspectives Energy Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage CCUS in clean energy transitions*. www.iea.org/t&c/
- Jones-Lee, M., & Aven, T. (2011). ALARP—What does it really mean? *Reliability Engineering & System Safety*, 96(8), 877–882. <https://doi.org/10.1016/J.RESS.2011.02.006>
- Jonkman, S. N., Van Gelder, P. H. A. J. M., & Vrijling, J. K. (2003). An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. En *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 99, Número 1, pp. 1–30). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00283-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00283-2)
- Joshi, A., Sattari, F., Lefsrud, L., Khan, M. A., & Xue, Y. (2025). Hydrogen Integration into Natural Gas Pipelines: Risk Analysis and Regulatory Recommendations. *Reliability Engineering and System Safety*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111422>
- Khan, T. O., Young, M. A., & Layzell, C. B. (2021). The Techno-Economics of Hydrogen Pipelines. En *Transition Accelerator Technical Briefs* (Vol. 1). www.transitionaccelerator.ca
- Kong, Y., Li, Y., Wang, S., Duan, P., Zhu, J., Han, H., & Han, J. (2024). Large-scale experimental study on jet flame length of hydrogen-blended natural gas and inverse methods for optimizing the weighted multi-point source model. *Fuel*, 367, 131434. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2024.131434>

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Koutalidis, H., Pelekis, S., Skepetari, E., Ntanos, C., Karakolis, E., Michalitsi-Psarrou, A., Blika, A.,

& Askounis, D. (2025). Renewable hydrogen blending into urban natural gas grids with power-to-gas: A techno-economic assessment for Greece. *International Journal of Hydrogen Energy*, 139, 380–395. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.05.004>

Kwak, H., Kim, M., Min, M., Park, B., & Jung, S. (2024). Assessing the Quantitative Risk of Urban Hydrogen Refueling Station in Seoul, South Korea, Using SAFETI Model. *Energies*, 17(4). <https://doi.org/10.3390/en17040867>

Lachance, J., Houf, W., Middleton, B., & Fluer, L. (2009). *SANDIA REPORT Analyses to Support Development of Risk-Informed Separation Distances for Hydrogen Codes and Standards*. <http://www.ntis.gov/help/ordermethods.asp?loc=7-4-0#online>

Lachance, J. L. (2009). *HYDROGEN IMPLEMENTING AGREEMENT AN IMPLEMENTING AGREEMENT OF THE INTERNATIONAL ENERGY AGENCY Uniform Risk Acceptance and Harm Criteria-IEA HIA Task 19 Perspective Presented by*.

Lei, B., Wei, Q., Pang, R., Xiao, J., Kuznetsov, M., & Jordan, T. (2023). The effect of hydrogen addition on methane/air explosion characteristics in a 20-L spherical device. *Fuel*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127351>

Li, H., Cao, X., Du, H., Teng, L., Shao, Y., & Bian, J. (2022). Numerical simulation of leakage and diffusion distribution of natural gas and hydrogen mixtures in a closed container. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(84), 35928–35939. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.08.142>

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Li, M., Wang, Z., Jiang, J., Lin, W., Ni, L., Pan, Y., & Wang, G. (2024). Numerical Simulation and Consequence Analysis of Full-Scale Jet Fires for Pipelines Transporting Pure Hydrogen or Hydrogen Blended with Natural Gas. *Fire*, 7(6). <https://doi.org/10.3390/fire7060180>

Liu, X., Zhang, D., Wu, X., Ai, H., Chen, P., Yan, F., Ouyang, X., Wang, H., & Zhang, H. (2023). ADVANCES AND CHALLENGES OF HYDROGEN-BLENDED NATURAL GAS PIPELINE INTEGRITY ASSESSMENT TECHNOLOGY | 掺氢天然气管道完整性评价技术的进展与挑战. *Mechanics in Engineering*, 45(2), 245–259. <https://doi.org/10.6052/1000-0879-22-636>

Lutostansky, E., Creitz, L., Jung, S., Schork, J., Worthington, D., & Xu, Y. (2013). Modeling of underground hydrogen pipelines. *Process Safety Progress*, 32(2), 212 – 216. <https://doi.org/10.1002/prs.11572>

Major Industrial Accidents Council of Canada. (1995). *Risk-based land use planning guidelines*. Major Industrial Accidents Council of Canada = Conseil canadien des accidents industriels majeurs.

Martin, P., Ocko, I. B., Esquivel-Elizondo, S., Kupers, R., Cebon, D., Baxter, T., & Hamburg, S. P. (2024). A review of challenges with using the natural gas system for hydrogen. *Energy Science and Engineering*, 12(10), 3995–4009. <https://doi.org/10.1002/ese3.1861>

National Fire Protection Association. (2026a). *NFPA 2 Código de Tecnologías de Hidrógeno*.

National Fire Protection Association. (2026b). *NFPA 59A, Norma para la Producción, Almacenamiento y Manipulación del Gas Natural Licuado (GNL)*.

Portarapillo, M., & Di Benedetto, A. (2021). Risk assessment of the large-scale hydrogen storage in salt caverns. *Energies*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/en14102856>

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Remacha, P., Tizné, E., Pina, A., Barroso, J., Muelas, Á., & Ballester, J. (2025). Impact of hydrogen blending on the formation of flammable atmospheres in enclosed spaces due to gas leaks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 142, 685–696.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.253>

Rosa, N., Azimi Fereidani, N., Cardoso, B. J., Martinho, N., Gaspar, A., & Gameiro da Silva, M. (2025). Advances in hydrogen blending and injection in natural gas networks: A review. En *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 105, pp. 367–381). Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.314>

Schiro, F., Stoppato, A., & Benato, A. (2020). Modelling and analyzing the impact of hydrogen enriched natural gas on domestic gas boilers in a decarbonization perspective. *Carbon Resources Conversion*, 3, 122–129. <https://doi.org/10.1016/J.CRCON.2020.08.001>

Serikova, N., & Murthy, M. (2025). Hydrogen Safety - Challenges in managing hydrogen gas dispersion. *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*, 2025-Novem(172).

Stalheim, D., Boggess, T., Marchi, C. S., Jansto, S., Somerday, B., Muralidharan, G., & Sofronis, P. (2010). *MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTY PERFORMANCE OF COMMERCIAL GRADE API PIPELINE STEELS IN HIGH PRESSURE GASEOUS HYDROGEN*.

Swain, M. R., & Swain, M. N. (1992). A comparison of H₂, CH₄ and C₃H₈ fuel leakage in residential settings. *International Journal of Hydrogen Energy*, 17(10), 807–815.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0360-3199\(92\)90025-R](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0360-3199(92)90025-R)

Thawani, B., Hazael, R., & Critchley, R. (2023). Assessing the pressure losses during hydrogen transport in the current natural gas infrastructure using numerical modelling. *International*

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Journal of Hydrogen Energy, 48(88), 34463–34475.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.208>

The MathWorks Inc. (s/f). *Matlab*.

TNO. (1992). *TNO-1992-greenbook*.

Turner, T., & Sari, A. (2012). *Vapor Cloud Explosion Prediction Methods—Comparison of TNO*

Multi-Energy (ME) and Baker-Strehlow-Tang (BST) Models in Terms of Vulnerability of Structural Damage Caused by an Explosion. 177–188.

<https://doi.org/10.1061/9780784412367.017>

Veracity. (s/f). *Search the marketplace Phast CFD add-ons - powered by KFX*.

Wang, D., Baliello, A., Poulikakos, L., Vasconcelos, K., Kakar, M. R., Giancontieri, G., Pasquini, E.,

Porot, L., Tušar, M., Riccardi, C., Pasetto, M., Lo Presti, D., & Cannone Falchetto, A. (2022).

Rheological properties of asphalt binder modified with waste polyethylene: An interlaboratory research from the RILEM TC WMR. *Resources, Conservation and Recycling*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106564>

Wei, Y. (2017). The development and application of CFD technology in mechanical engineering.

Top Conference Series Materials Science and Engineering, 274(1).

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/274/1/012012>

Whaley, H., & Lee, G. K. (1982). The behaviour of buoyant plumes in neutral and stable

conditions in Canada. *Atmospheric Environment* 1967, 16(11), 2555–2564.

[https://doi.org/10.1016/0004-6981\(82\)90335-3](https://doi.org/10.1016/0004-6981(82)90335-3)

Zhang, T., Zhao, W., Deng, Q., Jiang, W., Wang, Y., Wang, Y., & Jiang, W. (2017). Effect of

microstructure inhomogeneity on hydrogen embrittlement susceptibility of X80 welding

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

HAZ under pressurized gaseous hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(39), 25102–25113. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.081>

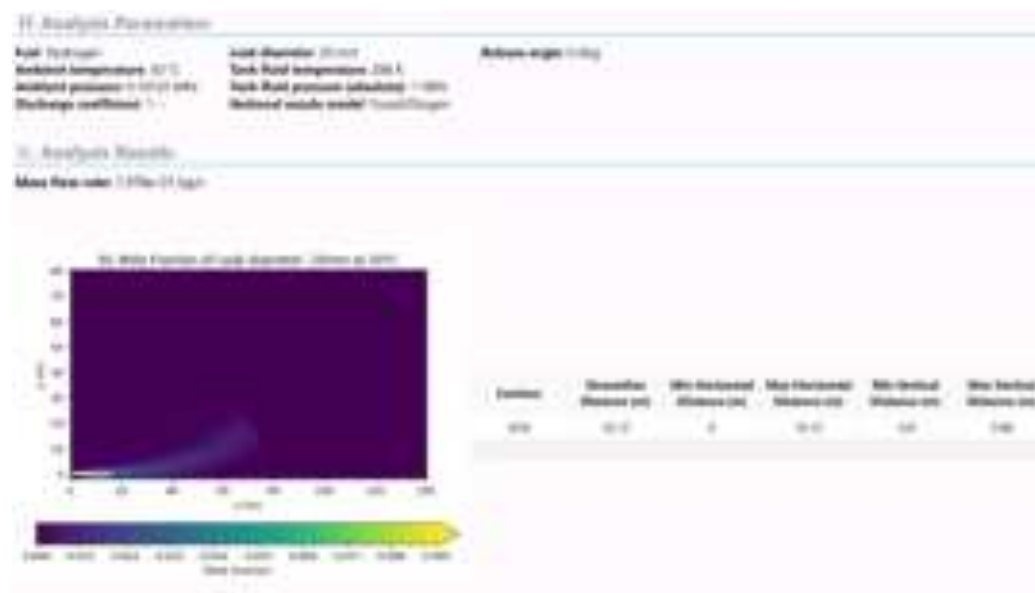
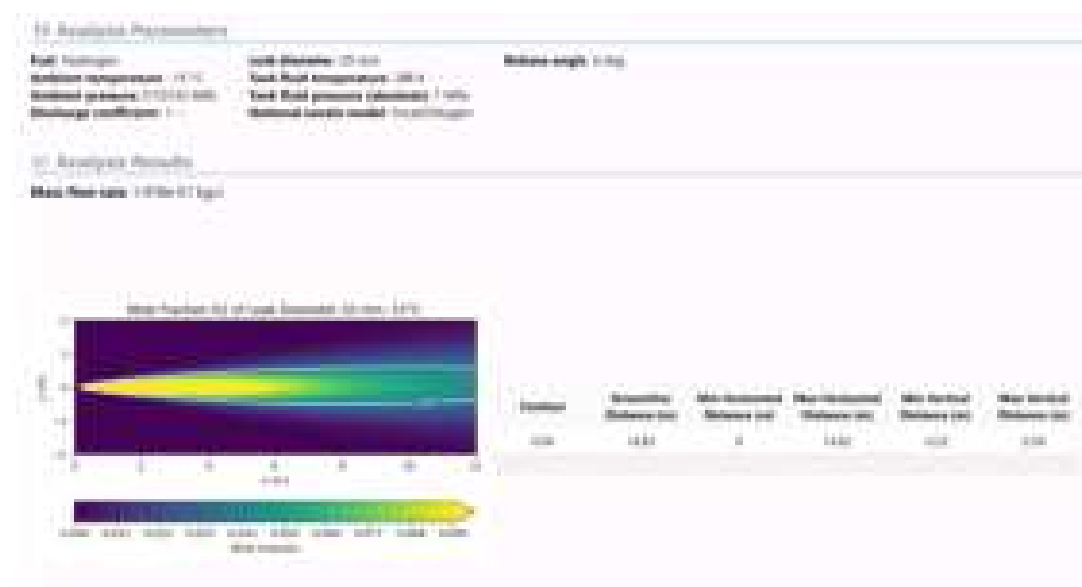
Zhang, X., Yang, Y., Cheng, W., Chen, G., Xu, Q., & Gao, T. (2024). Research on the Calculation Method and Diffusion Pattern of VCE Injury Probability in Oil Tank Group Based on SLAB-TNO Method. *Processes*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/pr12112459>

Zhao, T., & Guo, Z. (2025). Dispersion Behavior after Leakage of Hydrogen-Blended Natural Gas. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 18(3), 237–249. <https://doi.org/10.25103/jestr.183.23>

Trotsenko, L. M., Pruskiy, O. A., Pylypenko, R. A., Vasiliev, S. D., & Logvynenko, D. M. (2025). Experimental study of the thermotechnical characteristics of flames during the combustion of hydrogen-containing mixtures. *Energotehnologii i Resursosberezenie*, 84(3), 105–118. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2025.08>

Apéndices

Apéndice A. Resultados de simulación de dispersión de la nube inflamable.

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG**Figura A-1.***Resultados de dispersión de la nube inflamable para hidrógeno en verano.***Figura A-2.***Resultados de dispersión de la nube inflamable para hidrógeno en invierno*

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

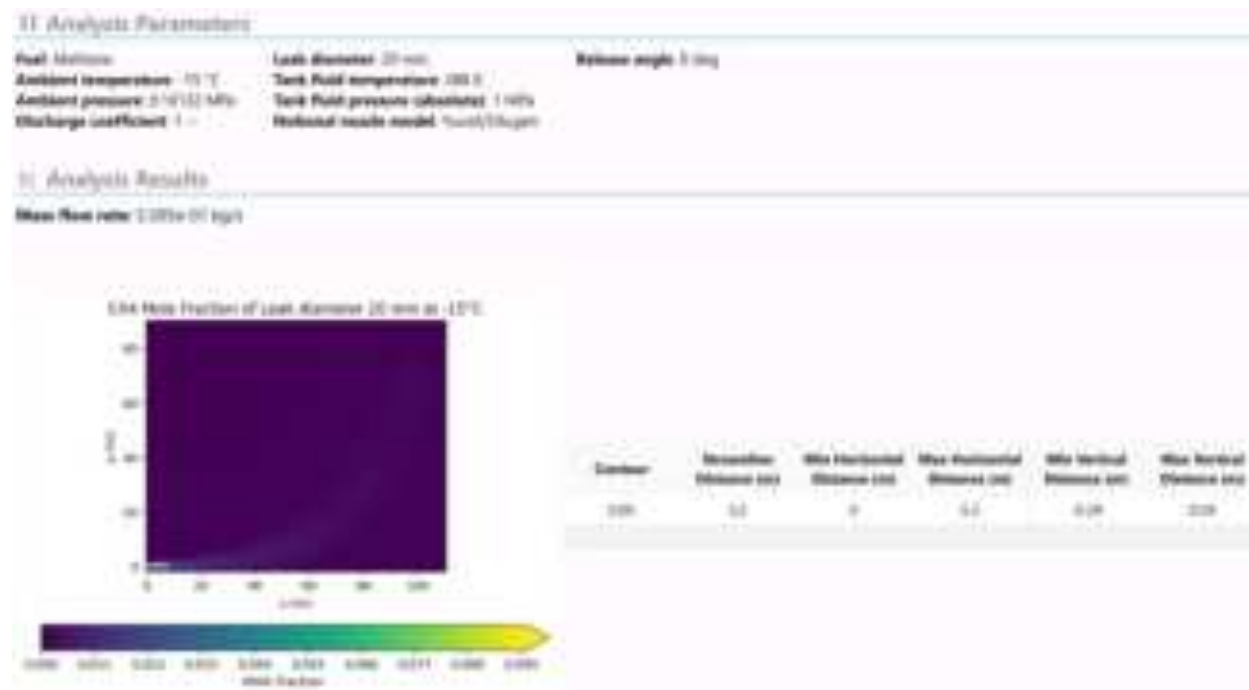
Figura A-3.

Resultados de dispersión de la nube inflamable para metano en verano.



Figura A-4.

Resultados de dispersión de la nube inflamable para metano en invierno.



DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H_2 -NG

Figura A-5.

Resultados de dispersión de la nube inflamable para B1 (10 % H_2 -90 % CH_4) en verano.

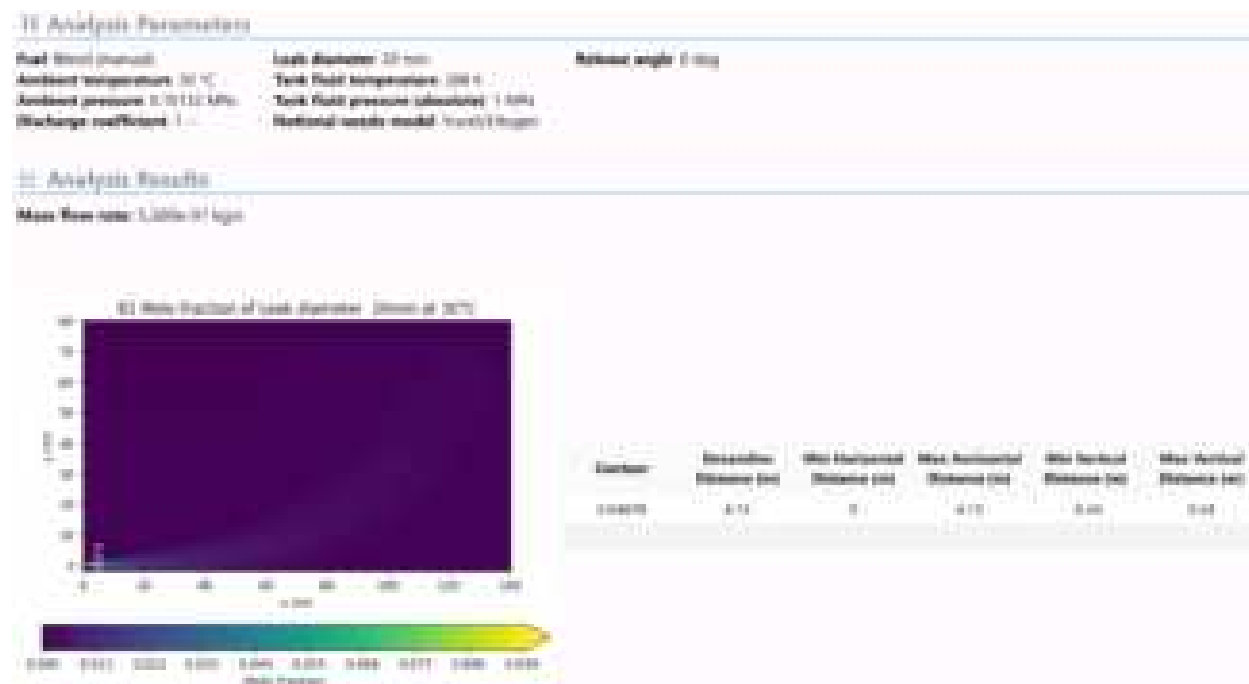
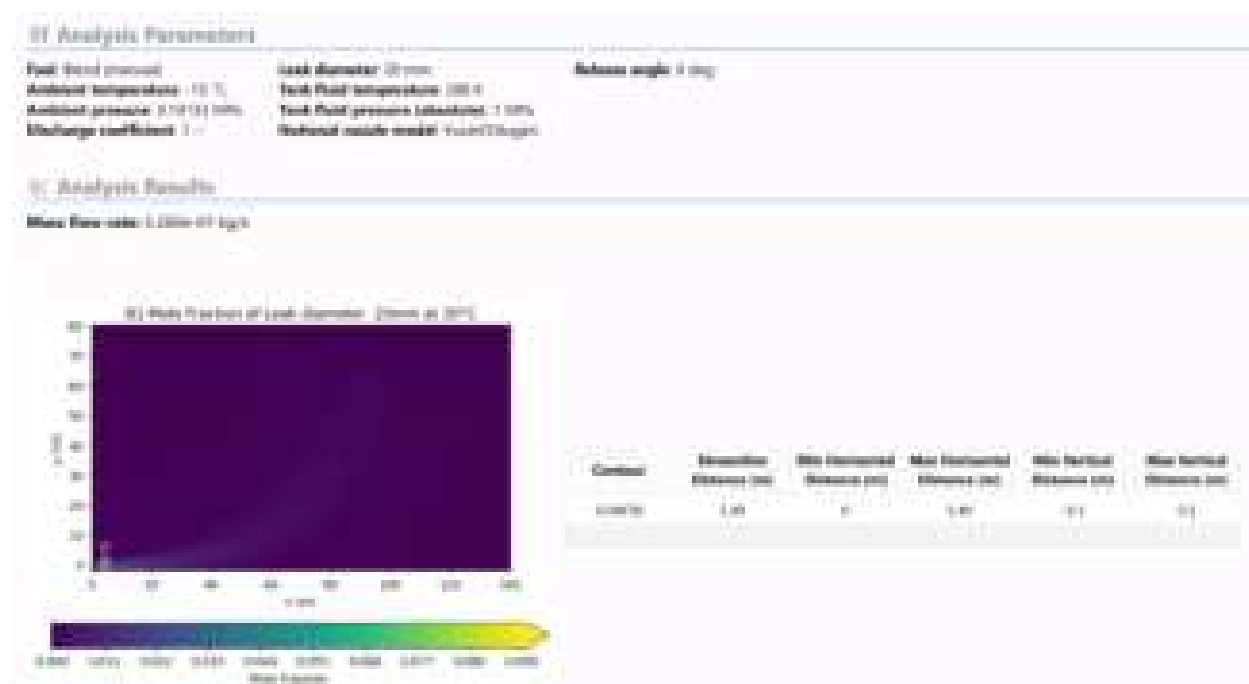


Figura A-6.

Resultados de dispersión de la nube inflamable para B1 (10 % H_2 -90 % CH_4) en invierno.



DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Figura A-7.

Resultados de dispersión de la nube inflamable para B2 (20 % H₂-80 % CH₄) en verano.

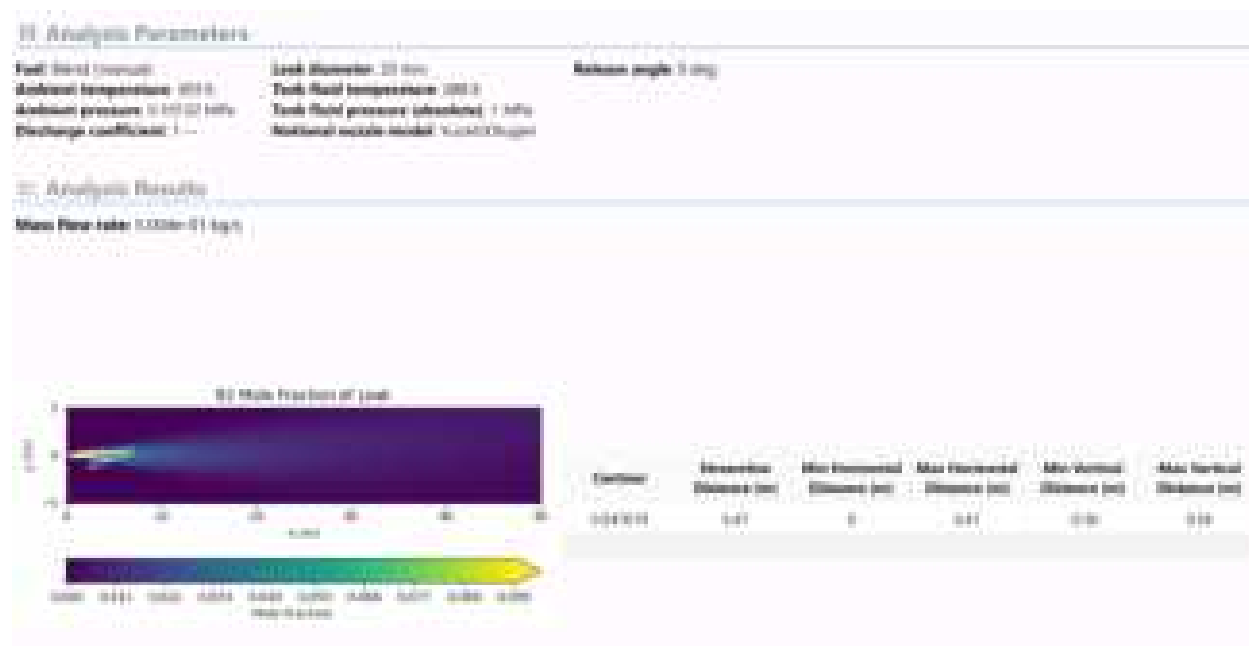
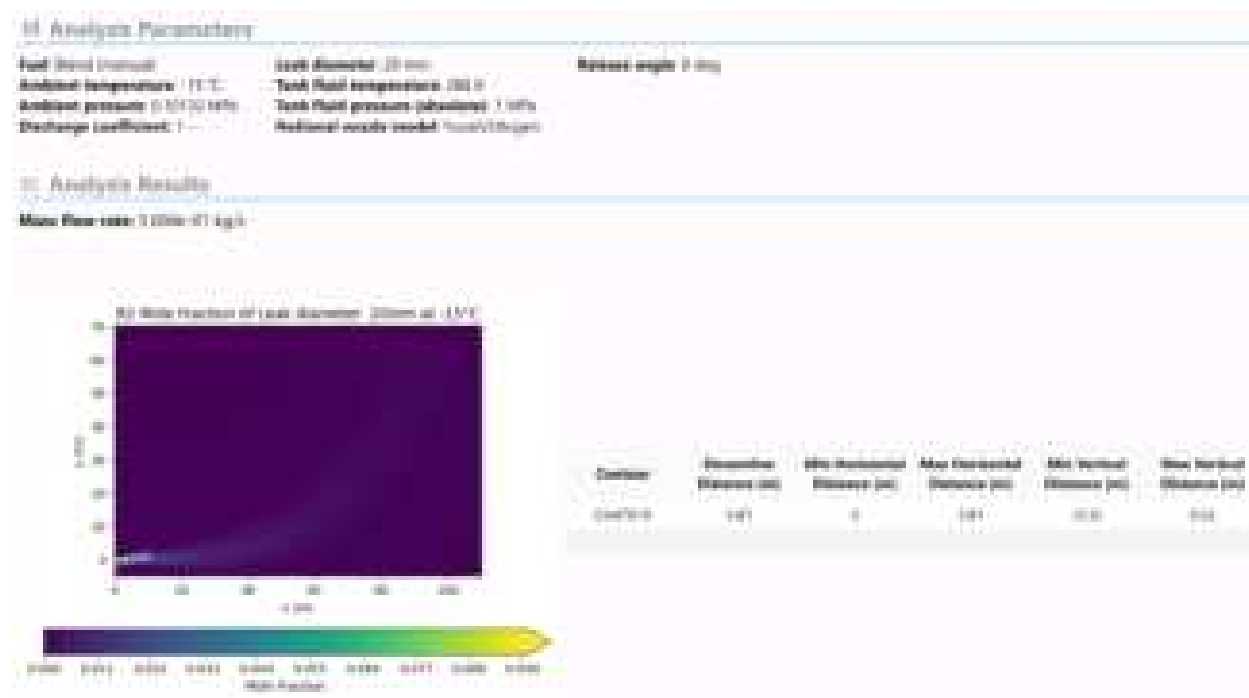


Figura A-8.

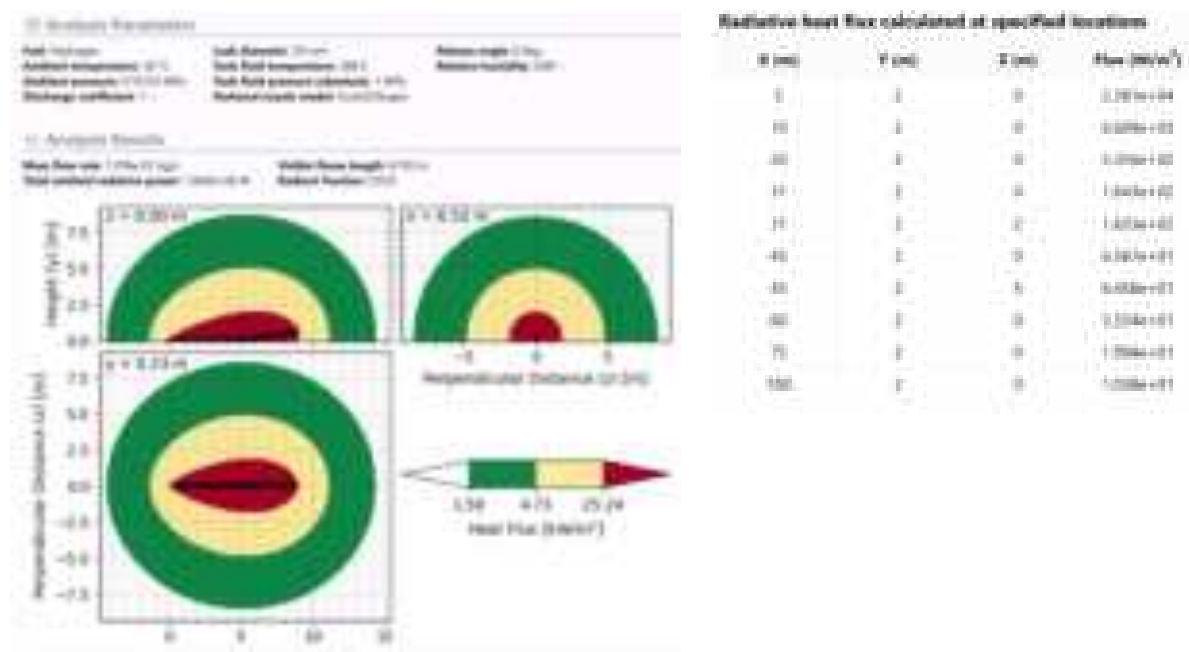
Resultados de dispersión de la nube inflamable para B2 (20 % H₂-80 % CH₄) en invierno.



Apéndice B. Resultados de simulación de llama de chorro

Figura B-1.

Resultados de llama de chorro para hidrógeno en verano.

**Figura B-2.**

Resultados de llama de chorro para hidrógeno en invierno.

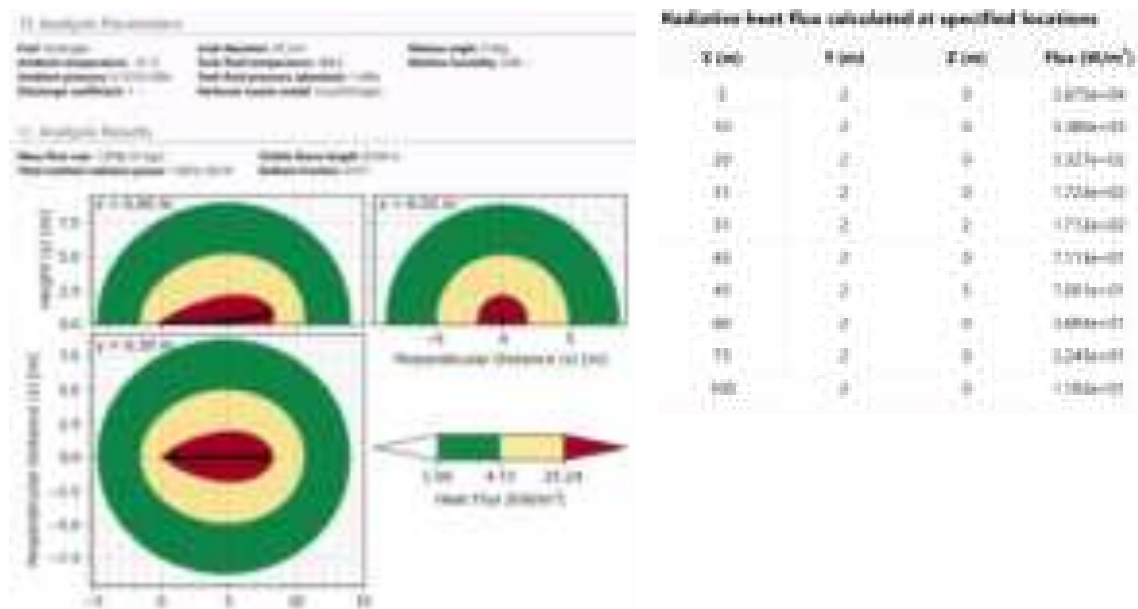
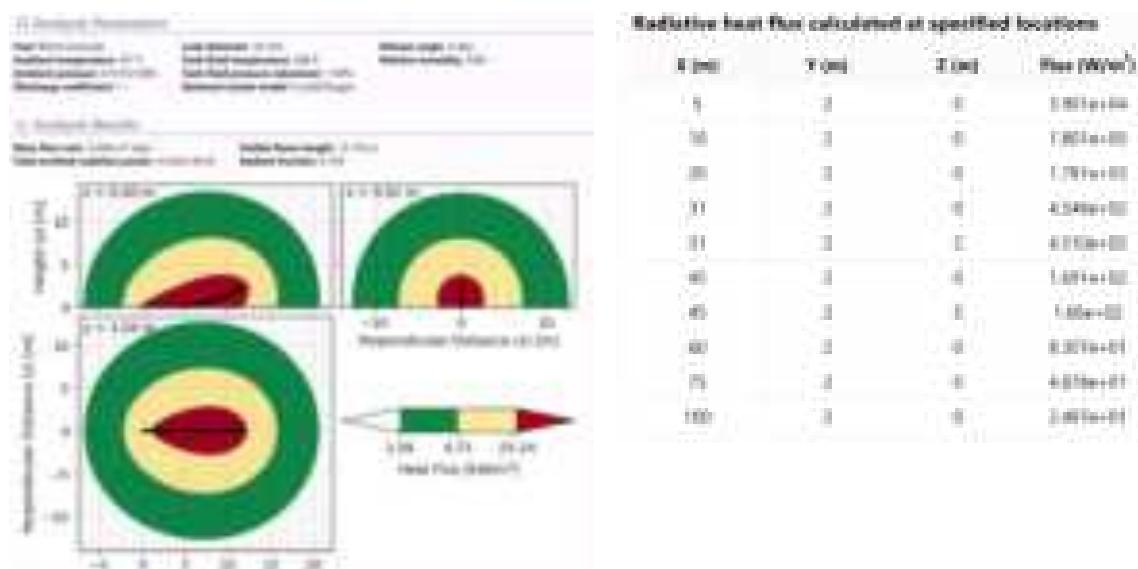


Figura B-5.

Resultados de llama de chorro para B1 (10 % H₂-90 % CH₄) en verano.

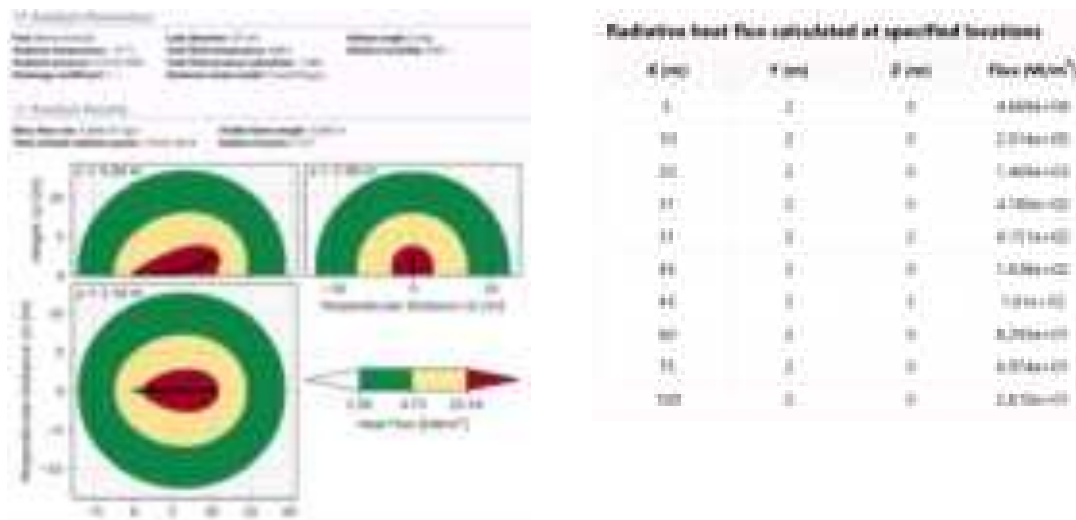


DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H_2 -NG

Figura B-7.

Resultados de llama de chorro para B2 (20 % H_2 –80 % CH_4) en verano.

Figura B-8.

Resultados de llama de chorro para B2 (20 % H_2 –80 % CH_4) en invierno.

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Apéndice C. Resultados de la simulación de sobrepresión e impulso sin confinamiento

Figura C- 1.

Resultados de sobrepresión e impulso para hidrógeno en verano.

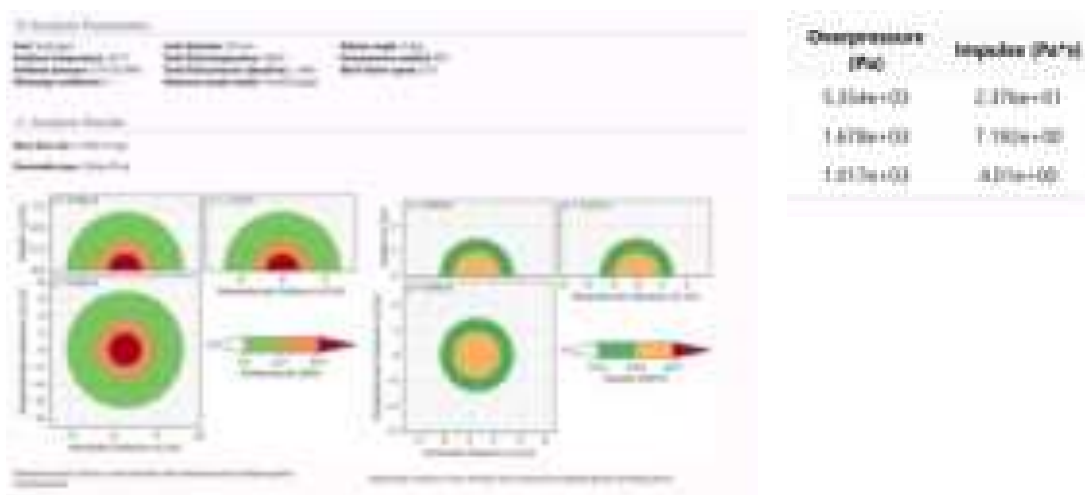
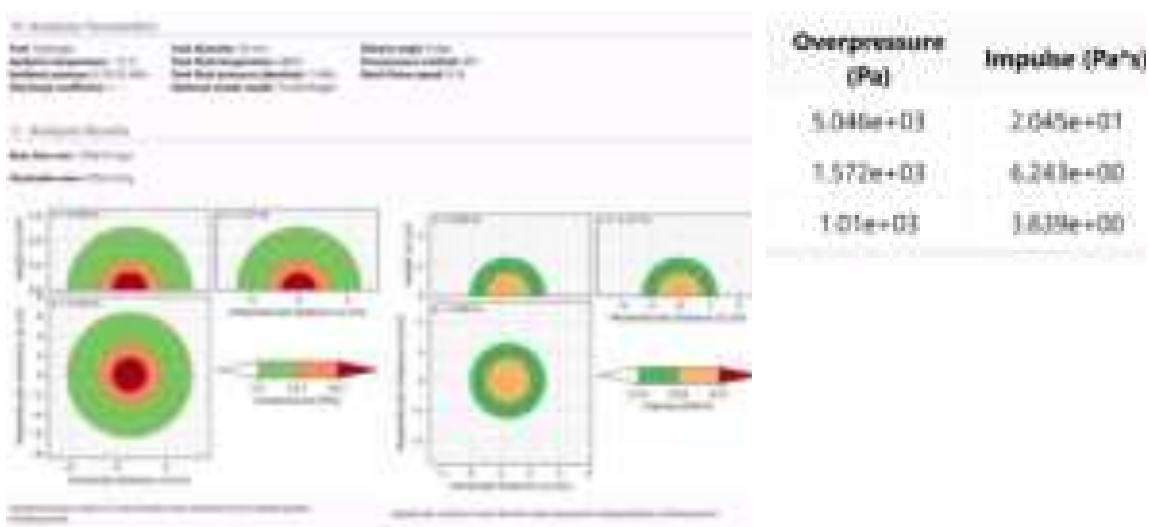


Figura C- 2.

Resultados de sobrepresión e impulso para hidrógeno en invierno.



DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Figura C- 3.

Resultados de sobrepresión e impulso para metano en verano.

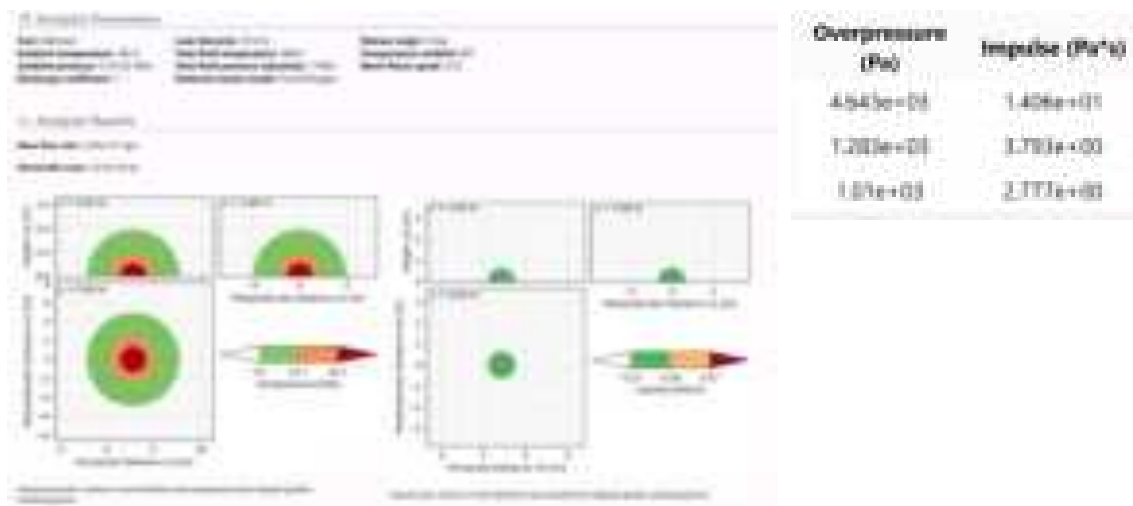


Figura C- 4.

Resultados de sobrepresión e impulso para metano en invierno.



DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Figura C- 5.

Resultados de sobrepresión e impulso para B1 (10 % H₂–90 % CH₄) en verano.

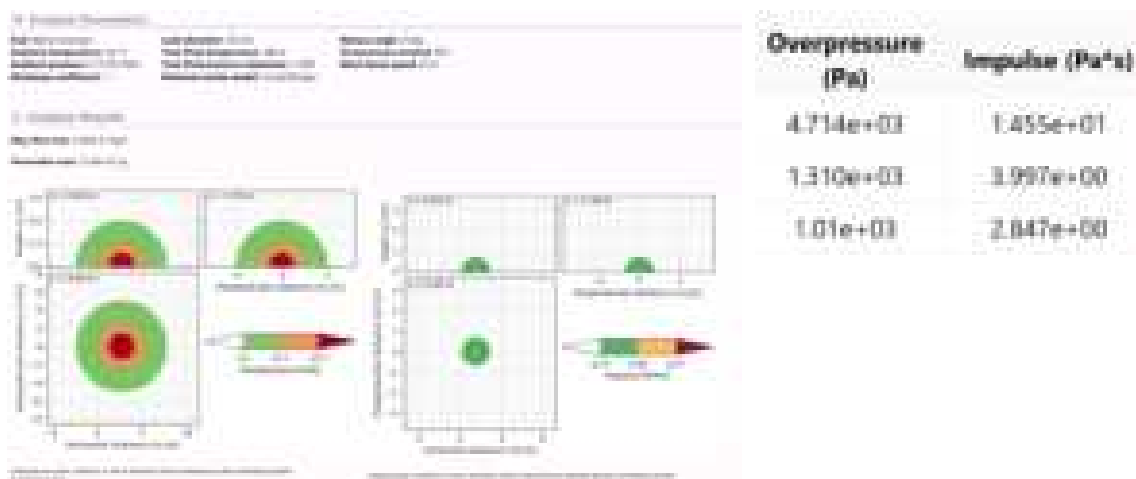
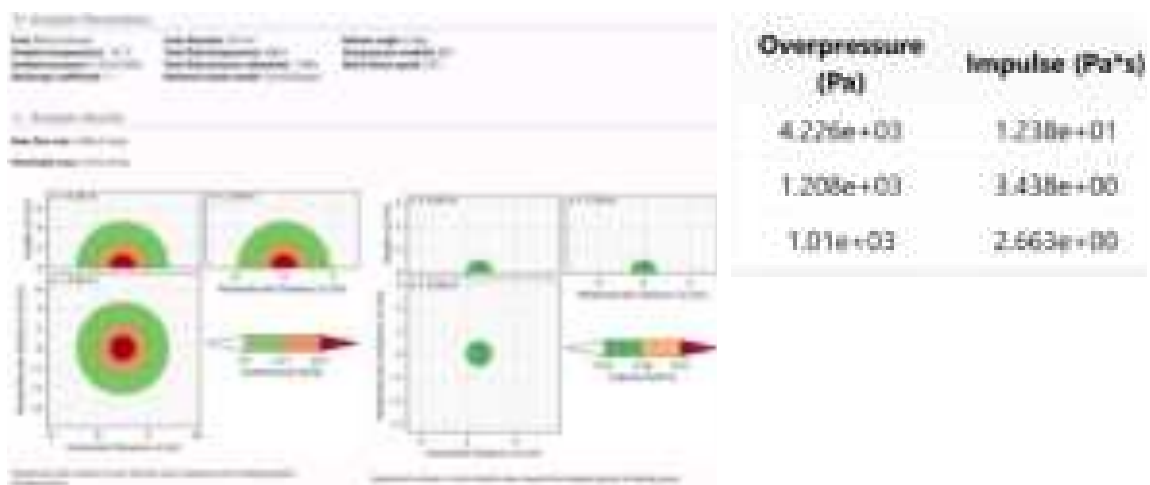


Figura C- 6.

Resultados de sobrepresión e impulso para B1 (10 % H₂–90 % CH₄) en invierno.



DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Figura C- 7.

Resultados de sobrepresión e impulso para B2 (20 % H₂–80 % CH₄) en verano.

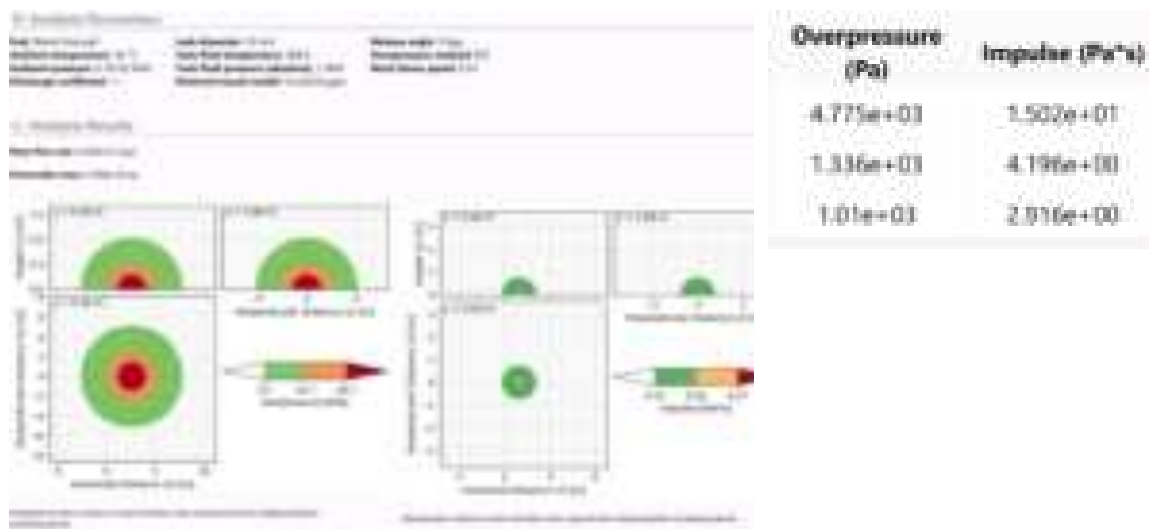


Figura C- 8.

Resultados de sobrepresión e impulso para B2 (20 % H₂–80 % CH₄) en invierno.



DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Apéndice D. Resultados de simulación de evaluación cuantitativa del riesgo.

Figura D- 1.

Datos de descripción del sistema, número de componentes y metros de tubería.

Quantitative Risk Analysis

Estimate system risk for Hydrogen and other alternative fuels. Includes consequences and fatality risk of jet flames and overpressures for different release sizes, each of which can be predicted to occur with different frequencies.

System Description

Components

Number of each type of component in system

# Compressors	0	# Flanges	0
# Vessels	0	# Heat exchangers	0
# Valves	12	# Vaporizers	0
# Instruments	2	# Loading arms	0
# Joints	10	# Extra component 1	0
# Hoses	0	# Extra component 2	0
# Filters	1		

Interconnecting Piping

Pipe length	404	in	ft
Pipe inner diameter	2	in	ft
Pipe outer diameter		in	ft
Pipe wall thickness		in	ft

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Figura D- 2.

Cantidad de ocupantes seleccionados

Refueling Demands

Number of vehicles: 0

Number of refueling vehicle / day: 0

Number of vehicle operating days: 0

Number of refuelings per year: 0

Occupants

Specify distributions, locations, and number of hours each occupant group spends in location annually. Each entry at origin corresponding to length, height, width and extends in +x direction

Occupants	1	Station workers	2000	Expected hours / occupant / year
	Distribution	Parameter A	Parameter B	Units
X (length)	Uniform	1	20	Meters
Y (height)	Constant	0	0	Meters
Z (width)	Uniform	1	10	Meters

Occupants	581	Nearby people	2000	Expected hours / occupant / year
	Distribution	Parameter A	Parameter B	Units
X (length)	Uniform	1	581	Meters
Y (height)	Constant	0	0	Meters
Z (width)	Uniform	1	93	Meters

Nota. Se seleccionó 1 ocupante, el cual representa a un técnico en el sitio que realiza tareas de mantenimiento y permite calcular el Riesgo Individual Promedio (AIR) para el personal operativo. De tal manera que, las personas cercanas (*Nearby people*) se estimaron 581 personas, calculadas multiplicando la densidad poblacional del área de estudio (0,5814 hab/m², Ec. 2) por un área de referencia de 1 000 m², representativa de la zona inmediata de exposición alrededor de la estación reguladora (Ec. 3). Esta cifra representa a la población en las áreas circundantes a la

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

infraestructura (como zonas residenciales o comerciales en Sherwood Park) y es fundamental para calcular la Pérdida de Vidas Potencial (PLL), que es una métrica de riesgo social.

$$\text{Área} = b * h = 500m * 260 = 130,000m^2 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\text{Densidad Poblacional} = \frac{\text{Población total}}{\text{área}} = \frac{75,575 \text{ hab}}{130,000m^2} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\text{Densidad Poblacional} = 0.5814\text{hab}/m^2$$

$$\text{Personas cercanas} = \text{densidad} \times \text{área de referencia} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\text{Personas cercanas} = \frac{0.5814\text{hab}}{m^2} * 1000m^2 = 581.35\text{hab}$$

La selección de los modelos BST (Baker-Strehlow-Tang) y TNO para este estudio se justifica por su idoneidad técnica para caracterizar los riesgos de mezclas de hidrógeno y gas natural en entornos exteriores. Se seleccionó el modelo BST para cuantificar la sobrepresión de explosiones no confinadas y la radiación de la llama de chorro (operando a Mach 35), debido a su capacidad de proporcionar una caracterización térmica detallada y manejar escenarios de ignición tardía donde otros modelos pueden tener limitaciones. Simultáneamente, el uso del head-impact permitió evaluación de consecuencias físicas de forma más precisa para la infraestructura de la estación reguladora, al enfocarse en el riesgo real que correría un trabajador o un transeúnte en un entorno exterior ante una explosión de nube de vapor (VCE).

Figura D- 3.

Modelos de consecuencia física seleccionados: BST y TNO.

Consequence Models

Physical Consequence Model Options

Overpressure method:	BET	▼
Mach flame speed:	0.28	▼
TNT equivalence factor:		

Harm Model Options

Thermal profile model:	ISO	▼
Thermal exposure time:	10	s ▼
Overpressure profile model:	Heat impact	▼

Figura D- 4.

Resultados de salida del análisis QRA para el hidrógeno en verano.

Analysis 1 - QRA					
Analysis Parameters					
System Description					
Real technique	Discharge coefficient: 1	# Compressors: 3	# Tanks: 0		
Fluid phase: fluid	Relative humidity: 0.01	# Vessels: 0	# Filters: 0		
Ambient temperature: 30 °C	Exclusion radius: 0.01 m	# Valves: 10	# Flanges: 1		
Ambient pressure: 1.01325 MPa	Number of vehicles: 0	# Instruments: 0	# Heat exchangers: 0		
Test fluid temperature: 300.0	Number of failings / vehicle / day: 0	# Joints: 10	# Separators: 0		
Test fluid pressure (absolute): 1 MPa	Number of vehicle operating days: 0	Pipes (length): 400 m	# Loading arms: 0		
National records needed: Yes/No/Other	Gas detection radius: 0.01 m	Pipe inner diameter: 2 m	# Extra component: 0		
Leak diameter: 20 mm					
Release angle: 0 deg					
Random leak: 0/1/2/3/4					
Consequence Models					
Overpressure method: 301	Thermal profile model: 100	Dispersion profile model: 100 (input)			
Mass flow speed: 0.75	Thermal exposure time: 10 s				
Analysis Results					
Potential loss of life (PLL): 0.076-0.776 fatalities / year					
Total accident cost (TAC): 1.14 to 11.46 fatalities at 10 ⁷ persons / year					
Average individual risk (AIR): 0.001 to 0.01 fatalities / person / year					

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Figura D- 7.

Resultados de salida del análisis QRA para el metano en invierno.

II. Analysis Parameters

System Description

Fluid description	Discharge coefficient (C _d)	# Compressors (C)	# Tanks (T)
Fluid phase from	Relative humidity (RH)	# Heaters (H)	# Filters (F)
Initial temperature (°F)	Surface relief (PSI)	# Valves (V)	# Pumps (P)
Initial pressure (PSIA)	Number of vehicles (N)	# Instruments (I)	# Heat exchangers (E)
Test fluid temperature (°F)	Number of failings (F vehicles) / day (D)	# Joints (J)	# Separators (S)
Test fluid pressure (absolute) (PSIA)	Number of vehicle operating days (D)	Pipe (length) (ft)	# Loading arms (L)
Relief device model (cc/ft³/psig)	Gas detection model (D)	Pipe inner diameter (in)	# Valve components (V, L)
Leak diameter (in)			# Valve component (D)
Release angle (deg)			
Release rate (lb/ft³/s)			

Compressors & Motors

Compressor model (M)	Thermal profile model (T)	Refrigerant profile model (R) from input
Max flow speed (ft/s)	Thermal response time (s)	

III. Analysis Results

Potential loss of the (PSI) (lb/ft³/s) from (ft³/s)

Heat released (MBtu) (PSIA) (lb/ft³/s) from (ft³/s)

Energy released (MBtu) (PSIA) (lb/ft³/s) from (ft³/s)

Figura D- 8.

Resultados de salida del análisis QRA para las mezclas B1 y B2 en verano.

Analysis 1 - QRA

II. Analysis Parameters

System Description

Fluid description	Discharge coefficient (C _d)	# Compressors (C)	# Tanks (T)
Fluid phase from	Relative humidity (RH)	# Heaters (H)	# Filters (F)
Initial temperature (°F)	Surface relief (PSI)	# Valves (V)	# Pumps (P)
Initial pressure (PSIA)	Number of vehicles (N)	# Instruments (I)	# Heat exchangers (E)
Test fluid temperature (°F)	Number of failings (F vehicles) / day (D)	# Joints (J)	# Separators (S)
Test fluid pressure (absolute) (PSIA)	Number of vehicle operating days (D)	Pipe (length) (ft)	# Loading arms (L)
Relief device model (cc/ft³/psig)	Gas detection model (D)	Pipe inner diameter (in)	# Valve components (V, L)
Leak diameter (in)			# Valve component (D)
Release angle (deg)			
Release rate (lb/ft³/s)			

Compressors & Motors

Compressor model (M)	Thermal profile model (T)	Refrigerant profile model (R) from input
Max flow speed (ft/s)	Thermal response time (s)	

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Apéndice E. Criterios internacionales de riesgo individual

Figura E 1.

Resumen de medidas de riesgo individual tomado del Greenbook (TNO, 1992)

Table 3
Examples of risk measures

Risk measure	Form of operation	Probability	Consequence	Mathematical expression	Form of operation	Limit	Comment
Individual risk (IR)	Probability of death for a person in a given area	1 per year	Death of individual	$IR = P_f P_{inj}$	Maximum acceptable risk (MAR)	10^{-6}	(2001)
IR - 100	Probability of death for a person in a given area	1 per year	Death of individual	$IR = P_f P_{inj}$	Maximum acceptable risk (MAR)	10^{-6}	(2001)
IR - 1000	Probability of death for a person in a given area	1 per year	Death of individual	$IR = P_f P_{inj}$	Maximum acceptable risk (MAR)	10^{-6}	(2001)
IR - 10000	Probability of death for a person in a given area	1 per year	Death of individual	$IR = P_f P_{inj}$	Maximum acceptable risk (MAR)	10^{-6}	(2001)
IR - 100000	Probability of death for a person in a given area	1 per year	Death of individual	$IR = P_f P_{inj}$	Maximum acceptable risk (MAR)	10^{-6}	(2001)
IR - 1000000	Probability of death for a person in a given area	1 per year	Death of individual	$IR = P_f P_{inj}$	Maximum acceptable risk (MAR)	10^{-6}	(2001)

Figura E 2.

Criterios de riesgo individual por país. Fuente: Sandia National Laboratories

Survey of Individual Risk Criteria for Public					
Individual Risk Criteria	United Kingdom	The Netherlands	Hungary	Czech Republic	Australia
10^{-4}	Intolerable limit for members of the public				
10^{-5}	Risk has to be lowered to ALARP	Limit for existing installations, ALARA principal applies	Upper limit	Limit for existing installations, risk reduction applied	Limit for new installations
10^{-6}	Broadly acceptable risk level	Limit for new installations and general limit after 2010, ALARA principal applies	Lower limit	Limit for new installations	
10^{-7}	Negligible level of risk				Negligible level of risk
10^{-8}		Negligible level of risk			
ICA (EN 50490) International Standard for Hydrogen Safety Approved: November 16, 2018 (Supersedes: 2007)					

DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Figura E 3.

Estándares de fatalidad internacional curvas FN (Jonkman et al., 2003)

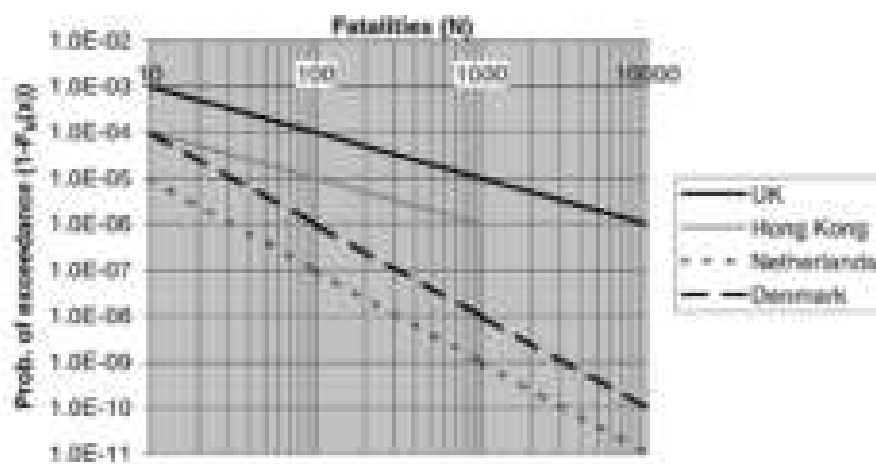
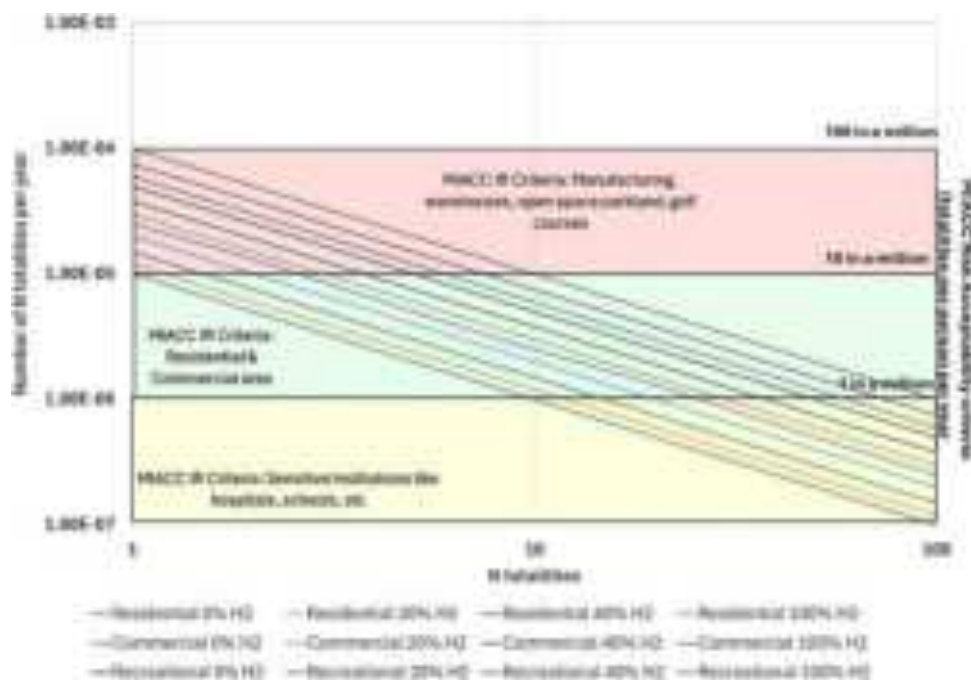


Fig. 6. Some international standards in FN format [2.6.11.21].

Figura E 4.

Curvas FN para diferentes escenarios y concentraciones de H₂ en comparación con los criterios de tolerancia IR de MIACC (Canadá) (Joshi et al., 2025)



DESCARBONIZACIÓN Y TRANSPORTE DE H₂-NG

Apéndice F. Otros

Tabla F-1.

Distancias de daño para diferentes áreas de fuga, criterios de daño y presiones

Table F-1. Harm distances for different leak areas, harm criteria, and pressures.

Harm Criteria	Harm Distance (Leak Area)			
	>0.10 to 1.72 MPa (>15 to 250 psig)	>1.72 to 26.68 MPa (>250 to 3900 psig)	>26.68 to 51.71 MPa (>3900 to 7500 psig)	>51.71 to 103.43 MPa (>7500 to 15000 psig)
Un-ignited jet concentration ~ 4% mole fraction of hydrogen	31.2 m (20% Area) 22.1 m (10% Area) 15.7 m (5% Area) 12.1 m (3% Area) 7.2 m (1% Area)	38.1 m (20% Area) 25.4 m (10% Area) 18.1 m (5% Area) 14.0 m (3% Area) 8.1 m (1% Area)	22.8 m (20% Area) 16.0 m (10% Area) 11.3 m (5% Area) 8.6 m (3% Area) 5.0 m (1% Area)	26.8 m (20% Area) 19.0 m (10% Area) 13.4 m (5% Area) 10.4 m (3% Area) 6.0 m (1% Area)
Radiation heat flux level of 1577 W/m ² (500 Btu/hr-ft ²)	25.4 m (20% Area) 15.8 m (10% Area) 10.7 m (5% Area) 7.9m (3% Area) 4.1 m (1% Area)	28.1 m (20% Area) 18.0 m (10% Area) 12.8m (5% Area) 9.5 m (3% Area) 4.8 m (1% Area)	16.8 m (20% Area) 11.2 m (10% Area) 7.8 m (5% Area) 5.5 m (3% Area) 2.8 m (1% Area)	20.5 m (20% Area) 13.8 m (10% Area) 9.6 m (5% Area) 6.8m (3% Area) 3.3 m (1% Area)
Radiation heat flux level of 4.7 W/m ² (1500 Btu/hr-ft ²)	17.3 m (20% Area) 11.6 m (10% Area) 7.9 m (5% Area) 5.9 m (3% Area) 3.1 m (1% Area)	20.3m (20% Area) 13.8m (10% Area) 9.4m (5% Area) 7.0 m (3% Area) 3.7m (1% Area)	12.2 m (20% Area) 8.2 m (10% Area) 5.5 m (5% Area) 4.1 m (3% Area) 2.1 m (1% Area)	14.9 m (20% Area) 10.0 m (10% Area) 6.7 m (5% Area) 5.1 m (3% Area) 2.6 m (1% Area)
Greater of radiation heat flux level of 28337 W/m ² (9000 Btu/hr-ft ²) or visible flame length	13.0 m (20% Area) 8.2 m (10% Area) 6.5 m (5% Area) 5.0 m (3% Area) 2.9 m (1% Area)	16.0 m (20% Area) 10.6 m (10% Area) 7.5m (5% Area) 5.8 m (3% Area) 3.4 m (1% Area)	8.6 m (20% Area) 6.7 m (10% Area) 4.7 m (5% Area) 3.6m (3% Area) 2.1 m (1% Area)	11.1 m (20% Area) 7.9 m (10% Area) 5.8 m (5% Area) 4.3m (3% Area) 2.6 m (1% Area)
Greater of radiation heat flux level of 20000 W/m ² (6340 Btu/hr-ft ²) or visible flame length	13.0 m (20% Area) 8.2 m (10% Area) 6.5 m (5% Area) 5.0 m (3% Area) 2.9 m (1% Area)	15.0 m (20% Area) 10.6 m (10% Area) 7.5m (5% Area) 5.8 m (3% Area) 3.4 m (1% Area)	8.6 m (20% Area) 6.7 m (10% Area) 4.7 m (5% Area) 3.6m (3% Area) 2.1 m (1% Area)	11.1 m (20% Area) 7.9 m (10% Area) 5.8 m (5% Area) 4.3m (3% Area) 2.6 m (1% Area)

*The largest harm distances are predicted for the visible flame length.