



GN+H₂ - Inyección de hidrógeno a la red de gas natural

Gabriel Pena; Pedro Curto; Mariana Silva;
Lidio Braga; Valentín Sanz; Facundo Rivoir

Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial
Instituto de Ensayo de Materiales Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Montevideo, Agosto 2025.

Agradecimientos

Este proyecto no habría sido posible sin el apoyo y la colaboración de diversas empresas, personas e instituciones que contribuyeron de manera significativa a su desarrollo. Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a:

- **ANII y Entidades Financieras del FSE (UTE, ANCAP y MIEM):** Por su aporte económico a través del Fondo Sectorial de Energía FSE S 2022-1-172823, que permitió financiar gran parte de las investigaciones realizadas, y por su continuo compromiso con la investigación e innovación en el sector energético.
- **Gasoducto Cruz del Sur:** Por el suministro de información técnica y datos históricos de la red transporte, consumos y composición del gas natural, fundamentales para los análisis de compatibilidad de materiales, los estudios sobre la matriz energética e intercambiabilidad de las mezclas.
- **MontevideoGas y Conecta:** Por el suministro de información técnica, datos históricos de las redes de distribución de gas natural y contribución con insumos imprescindibles para el montaje del banco experimental, viabilizando el correcto desarrollo del proyecto.
- **MSc. Ing. Marcos Tenconi:** Por su orientación, experiencia y valiosas contribuciones a lo largo de las distintas etapas de la investigación.
- **Ing. Manuel Bercer & Cia.:** Por su apoyo empresarial, proporcionando acceso a recursos, mejoras en la infraestructura del banco de ensayos y asesoramiento técnico clave para el desarrollo del proyecto.
- **Acodike:** Por la donación de elementos fundamentales para el correcto funcionamiento del banco de ensayos.

Agradecemos también a todas aquellas personas e instituciones que, directa o indirectamente, aportaron su conocimiento, tiempo y recursos para que este proyecto alcanzara sus objetivos. Su interés y confianza han sido fundamentales para avanzar hacia una matriz energética más sostenible y resiliente.

Índice general

Resumen	7
1. Introducción	9
1.1. Coyuntura actual de la matriz energética	9
1.2. Experiencias internacionales de inyección de hidrógeno a la red de GN	14
1.3. Objetivos del trabajo y organización del texto	16
2. Límite material de hidrógeno en la red	17
2.1. Introducción	17
2.2. Daño por hidrógeno en Aceros	17
2.3. Materiales poliméricos en contacto con hidrógeno	22
2.4. Efecto del hidrógeno en el diseño de gasoductos	23
2.5. Comportamiento y recomendaciones de aleaciones metálicas en contacto con hidrógeno	27
2.6. Inhibidores gaseosos del daño por hidrógeno	29
2.7. Permeación en materiales Poliméricos	30
2.8. Descripción de la red de Gas Natural existente en Uruguay . .	31
2.9. Conversiones de líneas preexistentes	35
2.10. Compatibilidad de mezclas GN+H ₂ en la red existente en Uruguay	36
2.11. Conclusiones	38
3. Comportamiento de mezclas GN+H₂	41
3.1. Introducción	41
3.2. Propiedades del Gas Natural	44
3.3. Reactor de mezcla homogénea (RMH)	44
3.4. Velocidad de llama laminar	54
3.5. Intercambiabilidad de GN con mezclas de GN-H ₂	57
3.6. Modelado numérico detallado	70

3.7. Estudio experimental	90
3.8. Conclusiones	104
4. Impacto en la Matriz Energética del Uruguay	107
5. Conclusiones generales	113
Bibliografía	117
!	
Apéndices	123
A. Determinación experimental de la velocidad de llama y razón de equivalencia	125

Resumen

Para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, es fundamental incrementar el uso de energías renovables. En su “primera transformación de la matriz energética”, Uruguay ha descarbonizado casi completamente su generación de energía eléctrica. Sin embargo, la generación con fuentes renovables no programables puede generar excedentes de forma estacional, lo que hace necesaria la búsqueda de alternativas de almacenamiento. Sumado a esto, el país se encuentra en la etapa de avanzar sobre la descarbonización de aplicaciones dependientes de fuentes fósiles y difícilmente electrificables. En esta línea, una opción es la producción de hidrógeno (H_2) verde, mediante la electrólisis a partir de energía renovable, el cual que puede inyectarse en la red de gas natural (GN) ya existente. Esta alternativa es actualmente implementada en al menos diez países. Para la mezcla de GN+ H_2 , es esencial mantener la seguridad operacional, la integridad de los equipos y las instalaciones, la eficiencia energética, la potencia térmica y las emisiones dentro de los límites reglamentarios, sin afectar al usuario final.

Este estudio tiene como objetivo identificar el porcentaje máximo de hidrógeno admisible en la red de GN bajo condiciones locales, asegurando una operación segura y estable. Para determinar este límite de inyección de H_2 , se emplearon diversas técnicas. En primer lugar, se evaluaron los materiales de la infraestructura nacional de transporte y distribución de gas natural para determinar su compatibilidad con hidrógeno, considerando problemas como la fragilización por hidrógeno (FPH) en aceros y pérdidas por permeación en polímeros como el polietileno de alta densidad (PEAD). Paralelamente, a partir de la composición real del gas natural, se realizó un análisis teórico de la combustión para determinar la intercambiabilidad con mezclas GN+ H_2 , evaluando parámetros críticos como la velocidad de llama laminar e índices Wobbe y Weaver. Seguidamente, se utilizaron modelos numéricos avanzados (CFD) para simular el comportamiento de estas mezclas. Adicionalmente se montó una bancada experimental, donde se ensayaron mezclas controladas de GN y H_2 en un quemador atmosférico tipo Bunsen, donde se evaluó la estabilidad y la

velocidad de llama. Finalmente, una vez determinado el límite admisible de H_2 en la red de gas natural, se estimó el ahorro potencial de emisiones de CO_2 e importación de gas natural, así como el aumento en la demanda de energía eléctrica nacional.

En cuanto a los materiales, desde la estación de transferencia en adelante, no se presentan limitaciones en la fracción de H_2 , tanto en los tramos de acero ni en PEAD para el transporte y distribución de mezclas de GN y H_2 . El análisis no consideró la diversidad de materiales presentes en instalaciones internas ni equipos. En cuanto a la combustión, a partir de la composición promedio del GN en Uruguay, se obtuvo que mezclas con hasta un 20 % de H_2 en volumen permiten una operación segura sin requerir modificaciones en los artefactos domésticos, manteniendo una intercambiabilidad aceptable según el índice de Wobbe (dependiendo de la composición del GN). La fracción admisible se reduce a 9 % considerando todo el espectro de composiciones registradas durante 3 años. En el banco experimental se logró ensayar de forma satisfactoria mezclas con hasta 50 % de H_2 . La inyección de H_2 a la red de GN hasta alcanzar una fracción de 20 % genera un ahorro de 7.2 % en la importación de GN y consecuentemente una reducción estimada de 11.3 Gg de emisiones de CO_2 (2.97 % de las emisiones generadas por el sector residencial), contribuyendo así a los objetivos de descarbonización. La demanda de energía eléctrica aumentaría en aproximadamente 78 GWh por año para satisfacer la producción de hidrógeno mediante electrólisis. A modo de ejemplo, este consumo eléctrico representa un 5.5 % de la energía eléctrica exportada en 2022 o un 32 % de la exportada en el 2023.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Coyuntura actual de la matriz energética

Desde principios del siglo XX, los combustibles fósiles han sido la principal fuente de energía empleada para satisfacer la demanda mundial. Iniciando con carbón mineral, pero luego diversificando a petróleo (y sus derivados) y gas natural según se fueron desarrollando avances tecnológicos. Paralelo al aumento casi exponencial de consumo de recursos fósiles, desde que se tiene registro se ha constatado un consumo casi constante de biomasa tradicional [1]. Dentro de las actividades humanas, la producción y consumo de energía, son de las más intensivas en el consumo de recursos, así como de las principales fuentes de emisiones contaminantes, representado alrededor del 60 % de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero [2, 3]. Por tal motivo, una de las Metas del Objetivo de Desarrollo Sostenible número 7 (Energía Asequible y no Contaminante) para el 2030, es aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas [3]. Sumado a esto, según los modelos desarrollados por expertos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus sigas en ingles), para que el calentamiento no sobrepase 1.5°C, o lo sobrepase de forma reducida, las emisiones antropógenas globales netas de CO₂ deben disminuir en un 45 % aproximadamente para el 2030 (con respecto a los niveles de 2010) y deben ser iguales a cero para el 2050 [4].

En este contexto, en las últimas décadas comenzó a incorporarse el uso de nuevas fuentes de energía renovable, a fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. No obstante, a nivel internacional el peso relativo de las fuentes renovables aún es muy inferior al de las fósiles, donde estas últimas representaron el 76.7 % del consumo de energía total (contemplando todos

los usos) en el 2022. Para ese mismo año, el consumo de energía nuclear fue del 3.75 % del total, mientras que las fuentes renovables (incluyendo la hidroeléctrica) tuvieron un peso relativo del 19.55 % [1]. Esta tendencia en la diversificación de la matriz energética mundial, que es acompañado fuertemente con un aumento en la eficiencia energética, también se debe al hecho de que los reservorios de fuentes fósiles son limitados, para los cuales se estima el agotamiento del petróleo y gas natural, a partir de los reservorios conocidos y el consumo actual, en poco más de 50 años. Para el caso del carbón mineral, el horizonte temporal de agotamiento supera los 110 años [1].

La matriz energética de Uruguay es significativamente diferente a los promedios mundiales, principalmente por el rol que juegan las fuentes de energía renovable, siendo la biomasa la principal fuente de abastecimiento de energía¹ (41 %), seguida por el petróleo (36 %), electricidad de origen hídrico (13 %), eólico (8 %) y por último el gas natural y la energía solar fotovoltaica (1 % cada uno) [5]. Respecto al consumo, los derivados de petróleo son los más relevantes (38 %), seguidos por los residuos de biomasa² (27 %), electricidad (21 %), leña (11 %), biocombustibles (2 %) y gas natural (1 %). En los últimos años, en la denominada primer transición energética, Uruguay ha logrado decarbonizar casi totalmente la generación de energía eléctrica. La introducción de eólica, solar y biomasa, complementando la tradicional hidráulica, ha resultado en una matriz eléctrica 97 % renovable [5]. Dado que el potencial de generación con centrales hidráulicas está prácticamente utilizado en su totalidad, se prevé que el crecimiento del parque de generación eléctrico se dé a partir de fuentes renovables, principalmente eólica y solar. Las energías renovables como la eólica y solar fotovoltaica, naturalmente intermitentes y/o cíclicas, presentan un gran inconveniente dado que la producción no siempre coincide con la demanda, por lo tanto para gestionar y aprovechar la energía eficientemente es necesario contar con la posibilidad de almacenamiento [6]. En particular el sistema eléctrico uruguayo se enfrenta a nuevos desafíos debido al aumento de la energía generada a través del uso de fuentes renovables y es necesario incorporar al sistema la capacidad de almacenar energía eléctrica.

En los últimos años la comunidad científica ha abordado el tema del almacenamiento de los excedentes de generación de energía eléctrica. Actualmente existen varias tecnologías de acumulación, cada una con un estado de madurez tecnológica diferente. La tecnología de centrales hidráulicas reversibles (PHS, por Pumped Hydroelectricity Storage) es la que se podría considerar como la

¹El abastecimiento de biomasa incluye el consumo de licor negro en las plantas de producción de pulpa de celulosa, el cual es ampliamente superior al del resto de las biomasas) [5].

²Residuos de biomasa: Incluye cáscara de arroz y de girasol, bagazo de caña, licor negro, gases olorosos, metanol, casullo de cebada y residuos de la industria maderera.

tecnología más madura, dado que abarca el 99 % de la potencia instalada de centrales de gran porte en el mundo [7]. La aplicación de dicha tecnología en Uruguay ha sido considerada, manejando algunas alternativas de localización posibles, que cumplirían con sus requerimientos geográficos específicos. No obstante, las barreras ambientales al momento de abordar un proyecto de estas características no serían de despreciar.

Otra tecnología de almacenamiento relativamente madura es la de aire comprimido (CAES, por Compressed Air Energy Storage). Que consiste en almacenar aire comprimido en depósitos (normalmente depósitos naturales, como cavernas) y luego generar electricidad a través de su expansión. Al igual que para la tecnología de PHS, ésta tiene una importante restricción dada por la disponibilidad de depósitos naturales. En la actualidad existen únicamente dos plantas de este tipo en funcionamiento comercial en el mundo. A pesar de que en la actualidad se estudian tecnologías de CAES con depósitos artificiales, y hoy en día no están disponibles comercialmente, se espera que tengan un alto costo en comparación con los anteriores [7].

Por otro lado, hace años que el hidrógeno se viene posicionado como un vector energético, para un futuro responsable y sustentable. Las aplicaciones de hidrógeno son muchas, puede ser utilizado como aditivo en la combustión, como fuente directa de energía térmica o en celdas de combustible limpias para generar electricidad. El principal inconveniente es su baja densidad energética y su alto rango de inflamabilidad, por lo que al día de hoy se está estudiando cómo superar estos inconvenientes. Sin embargo, la generación de hidrógeno como forma de almacenamiento de los excedentes de energía eléctrica producida con fuentes eólica o solar, es una alternativa prometedora que se encuentra en etapa de investigación y desarrollo a nivel mundial [8]. No obstante, debido a la variabilidad temporal de excedentes de energía eléctrica en la red, proyectos puramente dependientes de estos excedentes no son actualmente factibles.

Con esta idea sobre la mesa, otra alternativa que propone el uso eficiente de la energía es la conversión de la energía eléctrica a hidrógeno, que si bien por sí solo no es fácilmente almacenable, presenta ventajas como combustible. Algunas de las alternativas de uso de este hidrógeno puro, son su inyección a la red de gas natural. Esto permitiría tanto el almacenamiento, como la sustitución de importaciones de energéticos necesarios y altamente valiosos (como el gas natural), mientras que ofrece una buena oportunidad para la descarbonización del sistema productivo y de servicios. Normalmente, este proceso se conoce como *Power-to-H₂*, se utiliza la energía eléctrica excedente para alimentar un sistema de electrólisis de agua que da como resultado la descomposición de la molécula en oxígeno e hidrógeno. El hidrógeno puede inyectarse directamen-

te en la red de gas natural, sin embargo existen limitaciones vinculadas a las propiedades físicas y químicas del hidrógeno que restringen su inyección en grandes proporciones. La durabilidad del material, las fugas y la seguridad son algunas de las preocupaciones que dificultan la mezcla de hidrógeno en las redes de gas natural existentes y han sido discutidas en detalle por Melaina [9]. La mezcla de hidrógeno también afecta la calidad del gas natural en términos de su valor calorífico.

En la coyuntura global y nacional actual, se plantea necesaria una segunda transición energética en el país, por medio de la cual se apunta a continuar la sustitución de los consumos de fuentes fósiles por fuentes renovables. Parte de esta transición energética apunta a electrificar una fracción de los sectores transporte, industrial y residencial. Sumado a esto, surge el hidrógeno verde como vector energético, el cual puede ser utilizado para descarbonizar aplicaciones difícilmente electrificables.

Si bien la generación de hidrógeno y uso a nivel industrial se realiza desde hace varias décadas, el interés internacional sobre este vector energético ha repercutido directamente en las líneas de interés de investigación y desarrollo del Uruguay. Desde 2019, se incluyó al hidrógeno como línea de interés en el Fondo Sectorial de Energía, visibilizando el desarrollo de proyectos de investigación vinculados a la temática. En 2022, el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) y el Laboratorio Tecnológico Uruguayo (LATU) crearon el Fondo Sectorial de Hidrógeno Verde, con el objetivo de financiar proyectos de investigación, innovación y formación en esta temática. Mediante esta convocatoria, se buscó fomentar y apoyar la construcción, producción y uso de Hidrógeno Verde y sus derivados. Entre sus usos se incluyen: Transporte de carga pesada o buses; E-metanol; E-kerosene; Fertilizantes verdes; Mezcla con gas natural. A finales del 2022, a través de la resolución presidencial 294/022, se encomendó al Ministerio de Industria, Energía y Minería implementar y administrar el Programa H2U, con el objetivo de promover el desarrollo del hidrógeno verde en Uruguay con acciones, entre otras, en las áreas de I) innovación, II) aspectos regulatorios, III) atracción de inversiones, IV) generación de capacidades, V) cooperación internacional, VI) análisis de aspectos de infraestructura y logística, VII) evaluación del potencial offshore y VIII) comunicación. Además, el decreto convoca a todos los organismos públicos con vinculación en la temática a trabajar de forma coordinada y articulada en la implementación del programa. El programa H2U establece las actuales líneas de trabajo para el desarrollo del hidrógeno verde y derivados de forma interinstitucional en el Uruguay. Los integrantes del grupo interinstitucional son: 1. MIEM 2. MREE 3. MEF 4.

MIN. DEFENSA 5. MTOP 6. MVOT 7. MA 8. OPP 9. URSEA 10. UTE 11. ANCAP 12. ANP 13. ANII 14. ANDE 15. LATU 16. CONICYT A mediados del 2022 se presentó la Hoja de ruta del Hidrógeno verde en Uruguay, la cual estuvo en consulta pública hasta agosto del 2023. La hoja de ruta plantea a Uruguay como un país con gran potencial de generación y exportación de hidrógeno verde. Además, plantea líneas para sustituir la demanda nacional de fuentes fósiles (transporte pesado y doméstico, combustibles sintéticos, producción de fertilizantes, entre otros). Los objetivos planteados se dividen en tres fases, con horizontes temporales en 2025, 2030 y 2040.

En este contexto se desarrolla el presente proyecto, el cual analiza aspectos técnicos asociados a las modificaciones generadas por la inyección de hidrógeno en la red de gas natural.

El análisis de estos factores es crucial para garantizar la viabilidad y seguridad del uso de mezclas de hidrógeno y gas natural. Esto implica no solo comprender las propiedades físicas y químicas del hidrógeno, sino también evaluar cómo estas características pueden alterar el comportamiento del sistema de distribución de gas natural. Por lo tanto, es fundamental investigar las posibles consecuencias en términos de seguridad, integridad de la infraestructura y efectos sobre los consumidores finales.

El hidrógeno gaseoso (H_2) es incoloro e inodoro y tiene una alta inflamabilidad, con un elevado rango de explosividad y baja energía de ignición en comparación con otros combustibles gaseosos [10]. Realizar inyección de H_2 a las redes de gas natural (GN) puede generar impactos en problemas de seguridad, principalmente porque la tasa potencial de fuga de hidrógeno es mucho mayor que la del gas natural; problemas en la integridad de los gasoductos, debido al mecanismo de fragilización en materiales metálicos; problemas en el usuario debido a cambios en calidad del gas, ya que las propiedades de combustión cambian cuando se agrega H_2 al GN.

Si comparamos el H_2 con el metano, el rango de inflamabilidad del H_2 es 4 - 75 % vol versus 4.4 - 17 % vol para el metano; la cantidad de oxígeno requerida para la combustión, para el metano es de 12 % vol y para el hidrógeno es de 5 %vol; la energía mínima para la ignición del metano es de 0.21 mJ, en cambio para el hidrógeno es de 0.016 mJ. De los valores anteriores, podemos concluir que el rango de inflamabilidad del H_2 es mucho mayor que para el GN, y que el H_2 además requiere de menos oxígeno para su combustión y de una menor cantidad de energía para iniciar la misma.

Las mezclas o blends de H_2 y GN en general son indicadas por el porcentaje de H_2 en la mezcla, que es lo mismo que porcentaje molar si consideramos que la mezcla se comporta como gas ideal. Las mezclas de GN e hidrógeno también

se vuelven más inestables a mayores contenidos de H_2 [11].

Dado que tanto el gas natural como el hidrógeno son inodoros, es necesario agregar odorante para que ambos puedan ser detectados en fugas. Si el gas natural ya es odorizado previo a la inyección de H_2 , entonces es necesario evaluar cómo se verá afectado el poder del odorante en la mezcla con H_2 ; en caso contrario, se debe odorizar directamente la mezcla. Algunos odorantes, como mezclas de Terc-butil mercaptano y sulfuro de dimetilo, han sido utilizados tanto para la odorización de GN y del H_2 por separado logrando resultados satisfactorios [12].

Tanto el H_2 como su llama carecen de color, por lo que desde el punto de vista de seguridad es necesario agregar un colorante para visualizar al mismo durante la combustión. En caso de tratarse de mezclas con GN, como este último ya presenta color y se prevé que porcentajes bajos de agregado de H_2 harán que la mezcla sea mayoritariamente de GN y que por lo tanto la llama sea visible. Este factor debe ser tenido en cuenta si se desea continuar aumento la concentración de H_2 .

1.2. Experiencias internacionales de inyección de hidrógeno a la red de GN

Existen diversas experiencias a nivel internacional en las cuales se está comenzando a utilizar mezclas de GN e H_2 en las redes de transporte y distribución. A continuación se describen los principales proyectos que están en ejecución o proyectados para los próximos años [13].

Europa

La Comisión Europea impulsa una economía del hidrógeno para 2050 y reconoce que mezclar hidrógeno con gas natural puede reducir la necesidad de nuevas infraestructuras a corto plazo. Sin embargo, solo será útil con porcentajes limitados durante una fase de transición. La iniciativa *European Hydrogen Backbone* prevé 23.000 km de tuberías para hidrógeno, de las cuales el 75 % serán adaptadas de las redes de gas natural.

- Alemania lidera los proyectos con varios pilotos, como el de Falkenhagen (2 % de hidrógeno desde 2013) y otros que alcanzan concentraciones de hasta el 10 %.
- Francia avanza con el proyecto GRHYD, que prueba niveles de mezcla de hasta el 20 % para distribuir gas a 200 hogares.

1.2. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES DE INYECCIÓN DE HIDRÓGENO A LA RED

- España desarrolla el proyecto *H2sarea*, que en su Fase I probará mezclas de hasta 20 % en bucle de red, verificando el comportamiento de equipos e instalaciones domésticas y evaluando los límites de infraestructura y materiales, con miras a integrar hidrógeno en 8000 km de tuberías de gas. *H2sarea* actúa como proyecto demostrador para proporcionar la evidencia técnica que justifique futuras revisiones normativas vigentes. Además, el proyecto *Green Hysland* en Mallorca inyectará hidrógeno excedente en la red de gas.
- Italia inició en 2019 pruebas de inyección con mezclas del 5 % y 10 %, suministrando a dos clientes industriales.
- Reino Unido se encuentra desarrollando el proyecto *HyDeploy*, el cual probará inyecciones de hidrógeno hasta el 20 % en una red que abastece a 650 hogares.

Estados Unidos

Proyectos piloto en California han probado mezclas de hasta el 20 % de hidrógeno en redes de gas. Otros estados, como Minnesota y Virginia, desarrollan pruebas con niveles de hasta el 5 %. El DOE también lidera la iniciativa *HyBlend*, que investiga las limitaciones técnicas y los impactos de mezclar hidrógeno con gas natural, con una inversión gubernamental de USD 11 millones.

Otras regiones

- Japón se encuentra probando mezclas de hidrógeno y gas en una turbina de 80 MW.
- China realiza pruebas de laboratorio con mezclas de hasta el 17 % de hidrógeno en infraestructuras de gas natural.
- Australia avanza con el proyecto *Hydrogen Park SA*, que inyecta hidrógeno en la red de gas para 710 hogares, comenzando con mezclas del 5 % y con planes de aumentar al 10 %.
- Canadá desarrolla proyectos en Alberta y Ontario, con pruebas de hasta un 5 % de hidrógeno en redes de gas residencial

Desde el punto de vista regulatorio, Alemania es el país que admite mayor porcentaje de hidrógeno en el gas natural, donde el límite se establece en 10 %, con la excepción de líneas que cuenten con estaciones de compresión o

alimenten centrales termoeléctricas, donde el límite es 2 %. Francia establece un límite de 6 %, mientras que España 5 % (aunque este límite refiere a otros gases no convencionales del gas natural y no específicamente a la inyección de hidrógeno). Otros países Europeos, como Austria, Bélgica, Lituania, Suiza, Eslovaquia y República Checa, así como Canadá, limitan la fracción de hidrógeno en 2 % [13].

1.3. Objetivos del trabajo y organización del texto

En general los equipos que utilizan gas para aplicaciones domésticas o comerciales suelen ser utilizados por usuarios pasivos y por lo tanto no se espera que tomen acciones en el dispositivo al cambiar el gas. Por lo tanto, dado que este uso impone las condiciones más restrictivas y la intercambiabilidad de gases para aplicaciones domésticas y comerciales deben ser cubiertas, este trabajo será enfocado a un análisis que cubra esta condición. Adicionalmente se refuerzan las condiciones de trabajo para asegurar la integridad y seguridad operacional de la red de transporte y distribución de gas.

Objetivo general

El objetivo del proyecto es evaluar el desempeño del sistema de gas natural, al inyectar hidrógeno en la red e identificar los límites admisibles en el marco nacional.

Objetivos específicos

- Identificar, desde el punto de vista de la compatibilidad de los materiales con mezclas GN+H₂, cuales son los puntos críticos de la red nacional de transporte y distribución.
- Establecer los límites de H₂ en la mezcla de GN+H₂ que permiten que un usuario pasivo no se vea afectado en la operación normal de un sistema de combustión doméstico.
- Establecer las características de la llama y cómo es su evolución cuando varía la relación de de H₂ en la mezcla de GN+H₂.

Capítulo 2

Límite material de hidrógeno en la red

2.1. Introducción

Al estudiar la posibilidad de inyectar H_2 a las redes de GN existentes, es necesario tener en cuenta los daños que estas mezclas pueden tener sobre los materiales de la red. Para esto es necesario estudiar cada red, sus componentes, materiales, antigüedad y presiones de operación, entre otros factores, para luego determinar la máxima cantidad de H_2 admisible a ser inyectada en dicha red. Por ejemplo, el daño que causa el hidrógeno en un acero puede presentarse de distintas maneras según el tipo de material, su temperatura, la presión de operación y su estado tensional entre otros. En la próxima sección se ampliarán estos aspectos.

2.2. Daño por hidrógeno en Aceros

Las redes de transporte y distribución de gas están compuestas básicamente por materiales metálicos y materiales poliméricos. Dentro de estos, los aceros son aquellos que presentan un mayor riesgo de ser afectados por el hidrógeno. Estos materiales pueden presentar problemas por estar en contacto con el H_2 , que implican la penetración de hidrógeno atómico a la red cristalina del metal, cuya detección a tiempo es difícil y como consecuencia pueden causar la ruptura de la cañería, incluso trabajando a presiones menores para las que fue diseñada.

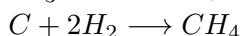
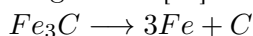
El ingreso de hidrógeno en la red cristalina del material desde H_2 en estado gaseoso, implica la adsorción de la molécula de H_2 sobre la superficie del metal y la disociación de la misma, ser absorbido en el metal y por último difundir en

éste. Tanto la superficie, la temperatura, la presión y las fases presentes en el metal juegan un papel muy importante en el ingreso y difusión del hidrógeno molecular [14].

Existen diferentes tipos de daño que pueden presentar los aceros al estar en contacto con hidrógeno. Cada uno de estos mecanismos depende del tipo de fuente de hidrógeno y de las condiciones del hidrógeno en contacto con el material. Para este trabajo, el tipo de daño más probable en presentarse es aquel que se da en temperaturas bajas (temperaturas ambiente, o del suelo en este caso), que es la fragilización por hidrógeno, mecanismo desarrollado en la sección 2.2.3.

2.2.1. Ataque por Hidrógeno (APH)

Este ataque implica una descarbonización del acero. Se presenta en metales expuestos a altas temperaturas y presiones, en donde existe una formación *In situ* de metano mediante la siguiente secuencia de reacciones y representado en la figura 2.1 [14].



El ataque por hidrógeno resulta en una zona de acumulación del metano dentro de la red cristalina metálica, reduciendo las propiedades mecánicas del mismo (descenso de ductilidad y de resistencia). Esta falla es irreversible, y suele presentarse en tubos de calderas, cañería en refinerías, en síntesis de amoníaco y otros servicios en donde se presenta el hidrógeno en altas temperaturas y presiones [14]

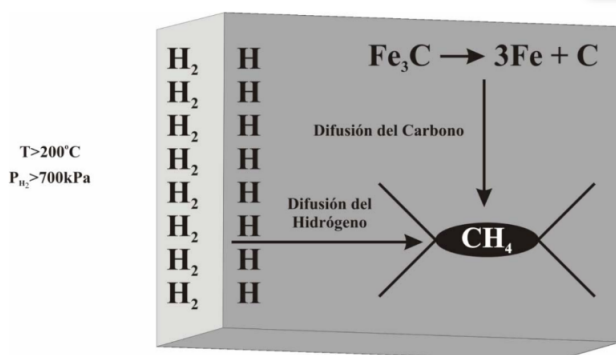


Figura 2.1: Mecanismo de Ataque por Hidrógeno APH. Fuente: CNEA “Degradación de los Aceros por Efecto del Hidrógeno” [14]

2.2.2. Fisuración Inducida por Hidrógeno (FIH)

Esta falla, también conocida como ampollado, se produce en ausencia de tensiones y a temperatura ambiente, cuando parte del hidrógeno atómico que ingresó en la red cristalina se recombina en forma molecular dando origen al H_2 , generalmente en las interfases matriz – inclusión. Si la presión alcanzada por concentración de H_2 es suficientemente alta, se producen ampollas o fisuras (Fig. 2.2). En general, se detecta fácilmente por inspección visual, si esto no es posible, siempre puede detectarse por ultrasonido [14].

La FIH se limita a aceros con límite de elasticidad debajo de los 600 MPa y es frecuente en cañerías, recipientes a presión y tanques de almacenamiento de industrias químicas, petroquímicas y petroleras.

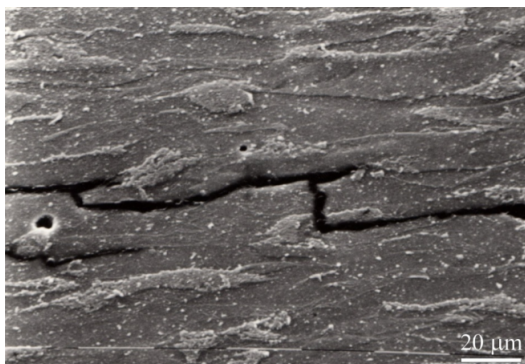


Figura 2.2: Fisuración inducida por hidrógeno. Fuente: CNEA “Degradación de los Aceros por Efecto del Hidrógeno” [14].

2.2.3. Fragilización por Hidrógeno (FPH)

Por último, puede presentarse en los metales expuestos al hidrógeno un daño denominado FPH. En este, los materiales pierden ductilidad, resistencia y tenacidad al encontrarse afectados por el hidrógeno. Para que este daño ocurra, se requieren los siguientes factores en forma simultánea:

- superar una cantidad mínima de H en el material
- superar una tensión mínima en el rango elástico, conocida como tensión crítica o tensión umbral. Esta tensión puede ser aplicada y/o interna
- tener una microestructura susceptible

El presente trabajo se concentra en este fenómeno, ya que es el que se ajusta a las condiciones de operación de la red de transporte de GN.

Puede tratarse de una falla parcialmente reversible mediante tratamientos térmicos si llega a detectarse a tiempo, lo que es difícil ya que no se detecta mediante ensayos no destructivos tradicionales [14].

Los átomos de hidrógeno que ingresan a la red son fuertemente atraídos por los defectos existentes en la misma que se conocen como trampas de hidrógeno. Estas trampas incluyen vacancias, dislocaciones, límites de grano, partículas de segunda fase y también inclusiones no metálicas. Estas trampas pueden clasificarse como reversibles o irreversibles. Las irreversibles son aquellas con alta energía de activación y donde el tiempo de residencia del hidrógeno es mayor; se considera que el hidrógeno luego de llegar a esta trampa no difunde. Si en cambio el sitio de captura de hidrógeno tiene baja energía de activación, será entonces un sitio reversible en el cual el hidrógeno tendrá mayor difusividad [15].

El modelo que describe este fenómeno es aún discutido y existen diferentes teorías. Uno de los modelos más antiguos y conocidos es la teoría de la presión. Esta indica que se formarían ampollas y fisuras internas de la microestructura del metal en donde se almacena el hidrógeno gaseoso (cavidades, borde de grano o interfases). Esta teoría explica este fenómeno a altas presiones, pero las tensiones sobre el metal para cuando éste es expuesto a H_2 a bajas presiones no serían suficientes para justificar su fragilización. Otra de las teorías que intenta explicar este fenómeno es la de la descohesión, la cual indica que si existe hidrógeno dentro en el extremo de una microfisura, cuando un material está sometido a deformación plástica, se reducen significativamente las fuerzas de cohesión interatómicas, causando la propagación de la fisura. Esta teoría tampoco explica las fallas por deformación del tipo dúctil, por ejemplo hoyuelos. La teoría de la energía superficial basa su hipótesis en que hay un decremento en la energía superficial del material afectado debido a la presencia de hidrógeno adsorbido en la superficie interna del metal, en el frente de una microfisura ya existente. Nuevamente esta teoría no termina de justificar todos los casos de falla, ya que no explica cómo otros elementos que también son adsorbidos, incluso más fuertemente que el H_2 , no causan este tipo de fragilización [14].

Existen otras teorías como la interacción del hidrógeno disuelto y las dislocaciones, pero ninguna termina de modelar el fenómeno que realmente se observa en los materiales. De esta manera, se entiende que los mecanismos descritos anteriormente pueden suceder en simultáneo, o uno luego del otro. Bajo esta hipótesis, se explica que para que suceda la falla (rotura del material) primero el hidrógeno debe alcanzar una concentración crítica dentro de

la red. En caso de que la concentración de hidrógeno supere ese valor crítico, entonces se producirá una microfisura en la red del metal, ver figura 2.3. Una vez que existe esa fisura, puede propagarse si la tensión aplicada sumada a la tensión residual en esa fisura supera la tensión crítica (la tensión de cohesión). El hidrógeno presente en la red hace que esa tensión crítica disminuya, porque disminuye la energía de cohesión y además puede aumentar las tensiones residuales. De esta manera, entran en juego ambas teorías explicadas anteriormente: la teoría de la disminución de la energía de cohesión, y la teoría de las presiones respectivamente [14].

El ingreso de hidrógeno a la red metálica no esta solo influenciado por factores ambientales como pH, presión parcial de H_2 y temperatura (entre otros), si no que también debe ser tenida la cuenta la microestructura del metal en análisis que consiste en las fases primarias y secundarias e inclusiones y precipitados no metálicos, que pueden afectar el atrapamiento y la difusión del hidrógeno dentro de la red metálica. Los aceros de alta resistencia mecánica, debido a su microestructura, son los que suelen afectarse de mayor manera. La presión del gas es un factor determinante en el mecanismo de FPH: a mayor presión de operación de hidrógeno gaseoso, mayor es la FPH. Algunos autores han reportado que existe una presión umbral, por debajo de la cual no habrá daño. Esta presión umbral depende del material. Sin Embargo existen otros autores que indican que no existe tal presión umbral [15] [14].

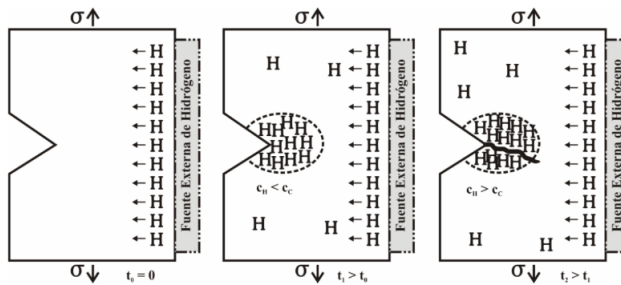


Figura 2.3: Mecanismo de Fragilización por Hidrógeno. Fuente: Cnea “Degradación de los Aceros por Efecto del Hidrógeno”

2.3. Materiales poliméricos en contacto con hidrógeno

En las redes de distribución y transporte de GN actuales, existen partes fabricadas con materiales no metálicos sino poliméricos, como tuberías de plástico o sellos elastoméricos. Normas internacionales como la ISO 4437 especifican requisitos para sistemas de tubos y sus componentes fabricados en polietileno (PE) cuyo uso está destinado al suministros de combustibles gaseosos. Establece que los tubos deben estar fabricados a partir de material virgen o de un material propio reprocesado de PE, no admitiendo el reciclaje de material de fuentes externas. Esta norma también indica las dimensiones de diámetros externos, ovaliación y tolerancias y la relación de dimensiones estandar (SDR) que se utiliza para evaluar la resistencia de las tuberías de plástico a la presión. Una serie de características mecánicas están descritas en la norma, entre ellas presión y resistencia hidroestática, elongación a la rotura y resistencia a la propagación lenta y rápida de fisuras.

En materiales poliméricos el H_2 puede permear, aumentando el riesgo de fugas de combustible al ambiente. En comparación con el GN, el H_2 puede permear de 4 a 5 veces más que el metano. Si bien el H_2 tiene mayor índice de difusión en los sellos elastoméricos utilizados en cañerías, las cañerías poliméricas tienen mayor superficie en contacto con el gas, por lo que estas superficies presentan mayores fugas absolutas. Trabajos realizados sobre cañerías poliméricas a presiones de 4 bar, reportan que las pérdidas de gas por fugas no superan el $5 \times 10^{-5} \%$ del combustible transportado, en caso de una mezcla del 17 % de H_2 y GN [16].

Con respecto a investigaciones previas de tuberías de PE para servicio de H_2 , no se ha reportado degradación de las cañerías por hidrógeno puro. Las pruebas de tracción realizadas sobre PE no muestran ningún efecto significativo del uso de H_2 a bajas presiones. En cambio, presiones más altas resultan una ligera disminución en la tensión y la deformación de tracción. También hay consenso en que hay que seguir evaluando la unión de tuberías por termofusión a los efectos de la exposición al H_2 en la región de la unión [17–21].

La mayoría de los elastómeros también son compatibles con el hidrógeno. En la tabla 2.1, se presentan los elastómeros más comunes utilizados en el sistema de transporte y distribución de EE.UU., todos resultan compatibles con el uso de H_2 , según se describe en la tabla 2.2 [16].

Número	Nombre del Material	Otros Nombres	Tipo	Sigla en Inglés
1	Butadieno-Estireno	Buna-S; GR-S	Caucho de estireno-butadieno	SBR
2	Butadieno-Acrilonitrilo	Buna-N; Nitrile; Perbunan; Nytek	Caucho de acrilonitrilo-butadieno	NBR
3	Caucho Natural	Goma	Caucho Natural	NR
4	Policloropreno	Neoprene; Bayprene; Chloroprene	Caucho Sintético	CR
5	Etileno-Propileno	Nordel; Royalene; Dutral	Caucho Sintético	EPM & EPDM
6	Poliamida (11 y 12)	Rilsan; Vydyn; Plaskin; Nylon	Elastómero	PA11 & PA12
7	Silicona y Fluorosilicona	Polysiloxanes; Cohrlastic; Green-Sil; Parshiled; Baysilone; Blue-Sil	Caucho de Silicona/Polisiloxano	SI & FSI
8	Fluoroelastómero	Viton; Fluorel; Technoflon	Caucho Sintético de Alto Rendimiento	FKM
9	Perfluoroelastómero	Kalrez; Chemraz; Kel-F	Caucho Sintético de Alto Rendimiento	FPM
10	Polipropileno	PP	Termoplástico /Poliolefina	PP
11	Politetrafluoro-etileno	Teflon, Halon	Termoplástico Totalmente Fluorado	PTFE & FTE

Tabla 2.1: Materiales en cañerías de Gas Natural

2.4. Efecto del hidrógeno en el diseño de gasoductos

Los gasoductos de GN se diseñan, construyen e inspeccionan de acuerdo con el código ASME B31.8. En cambio, los requisitos para los gasoductos de H2 se detallan en el código ASME B31.12 y son más estrictos que los de los gasoductos que transportan GN. Ambas normas establecen que las especificaciones para los ductos utilizados en el transporte de gases, deben cumplir con los requisitos técnicos establecidos en las normas ASTM A53, ASTM A106 o API 5L (entre otras). La designación de los materiales metálicos bajo la norma API 5L establece distintos grados que indican en su denominación el límite elástico (o SMYS por sus siglas en ingles) en ksi. Por ejemplo, un API 5L X42 tiene un SMYS mayor o igual a 42 ksi (290 MPa). En la misma norma se establecen dos niveles de calidad producto: PSL 1 y PSL 2. Las tuberías PSL 2

Compatibilidad de Polímeros	Compatibilidad
Polietileno	Buena
Cloruro de Polivinilo	Buena
Caucho Natural	Regular
Caucho Butílico	Buena
Caucho de Silicona	Regular
Neopreno (CR)	Buena
Buna S (SBR)	Buena
Viton	Buena
Buna N (NBR)	Buena

Tabla 2.2: Compatibilidad de Polímeros

tienen requisitos más estrictos que las tuberías PSL 1, con menores cantidades máximas de azufre y fósforo y niveles mínimos y máximos para el SMYS y la resistencia a la tracción, también requisitos sobre la energía mínima absorbida en las pruebas de impacto Charpy del metal base y de zonas afectadas por el calor (ZAC) de los procesos de soldadura. Para las tuberías PSL 2, las letras después de SMYS indican la condición del componente (por ejemplo si fue laminado, normalizado, laminado termomecánicamente, templado y revenido, etc). Por ejemplo, un API 5L X52N se entrega en condiciones normalizadas. La norma ASTM A53 indica especificaciones para ductos de acero al carbono utilizados en tuberías sin costura, con soldadura, y galvanizadas con revestimiento de zinc. La norma ASTM A106 implica especificaciones similares a las A53 en composición química pero están diseñados para servicio a alta temperatura. Dentro de las normas ASTM A53 y A106, los grados B tienen mayor contenido de carbono y manganeso que el grado A, y también mayor SYMS y resistencia última. Comparando un acero ASTM A53 Grado A o B y un acero ASTM 106 Grado A o B con un acero API 5L X42, los primeros tienen menor SYMS y resistencia última requeridos y los del tipo API 5L tienen menor contenido de fósforo y azufre [22] [23] [24].

La norma ASME B31.8 indica una ecuación para la determinación de la presión de diseño de una cañería. Dada una cañería construida con un material cuyo límite elástico es SYMS, su espesor es t , el diámetro exterior es D , la presión máxima de operación está dada por la siguiente ecuación 2.1:

$$P = \frac{2(SYMS)t}{D} FET \quad (2.1)$$

Donde F es un factor de diseño que tiene en cuenta la proximidad de la tubería a caminos, autopistas, ferrocarriles, calles, edificios y construcciones en general; E es el factor de junta longitudinal y T es el factor de reducción de

temperatura [25].

La norma ASME B31.12 indica que cuando H_2 es mayor al 10 % (en volumen), la presión total del gas es menor a 21 MPa, la temperatura está entre -62°C y 232°C y el contenido de agua es inferior a 20 ppm, la presión de operación máxima para una cañería dada se determina bajo la siguiente ecuación:

$$P = \frac{2(SYMS)t}{D} F E_w T_f H_f \quad (2.2)$$

siendo la principal diferencia entre la ecuación de presión de diseño para el H_2 y la del GN el factor de rendimiento del material H_f , que explica los efectos adversos del hidrógeno sobre las propiedades mecánicas de las tuberías de acero al carbono y su valor deriva de las relaciones de presión y resistencia a la tracción o SYMS (Tabla 2.3) [26].

Resistencia mínima, ksi		Presión de diseño, psig						
Tracción	Fluencia	≤1000	2000	2200	2400	2600	2800	3000
66 y menor	≤ 52	1.0	1.0	0.954	0.910	0.880	0.840	0.780
De 66 a 75	≤ 60	0.874	0.874	0.834	0.796	0.770	0.734	0.682
De 75 a 82	≤ 70	0.776	0.776	0.742	0.706	0.684	0.652	0.606
De 82 a 90	≤ 80	0.694	0.694	0.662	0.632	0.610	0.584	0.542

Tabla 2.3: Factores de rendimiento de los materiales de las tuberías de acero al carbono por presión de diseño del sistema

El factor de diseño F , que varía según la clase de ubicación en función de factores como el número y la proximidad de los edificios destinados a la ocupación humana, es diferente para el hidrógeno que para el GN; en la Tabla 2.4 se presentan los valores que toma este factor. E_w y T_f tienen valores similares tanto en ASME B31.12 como en ASME B31.8. T_f toma valor 1 para temperaturas de operación iguales o menores a 121°C [26].

Cabe destacar que no existen normas que regulen el diseño de cañerías cuando el contenido de hidrógeno en la mezcla es menor al 10 %.

Clase de ubicación	Factor de diseño, F
Clase 1, División 2	0.50
Clase 2	0.50
Clase 3	0.50
Clase 4	0.40

Tabla 2.4: Factor de diseño según clase de ubicación

El código ASME B31.12 también establece que se debe especificar un criterio de tenacidad a la fractura u otro método para controlar la propagación de la fractura cuando una tubería está diseñada para operar con una tensión circunferencial superior al 40 % del SMYS. La tenacidad a la fractura es una propiedad de los materiales que se mide a partir de probetas prefisuradas, ejerciendo cargas cíclicas (fatiga). El comportamiento del material frente a la propagación de la fisura puede ser estable o inestable, siendo el comportamiento esperado para los aceros utilizados en tuberías del tipo de propagación estable. Este comportamiento, se caracteriza mediante un curva, llamada curva R, que grafica la tenacidad a la fractura elastoplástica (J , resistencia a la extensión de la grieta cerca del inicio de la extensión estable de la grieta) vs la extensión de la grieta o fisura. Estos ensayos estan establecidos en la norma ASTM E1820, y prevén la determinación de los parámetros mediante el método de probeta múltiple o probeta simple. A partir de ensayos de fatiga, se puede hallar la tenacidad a la fractura inestable K_{JIC} , donde el J indica que fue obtenido a partir del parámetro J, I indica el modo de sollicitación, y C indica crítico. Estudios realizados por Nibur et al, indican que la tenacidad a la fractura para los aceros en presencia de hidrógeno (K_{IH}), disminuye al aumentar la presión parcial de H_2 y la resistencia del acero. (Ref Nibur de Kappes). También se ha estudiado que el K_{IH} de las ZAC de los proceso de soldadura, suele ser menor que el valor correspondiente al metal base. Es claro que existe una relación entre la tenacidad a la fractura y la microestructura del componente. Si bien la presión de hidrógeno no tiene grandes efectos sobre la SYMS y la resistencia última, si tiene un efecto significativo en la disminución de la ductilidad del material y también en la disminución de la tenacidad a la fractura (tanto la iniciación como la dJ/da o capacidad de desgarro) y acelera la tasa de crecimiento de la fatiga [27, 28].

En la práctica es común que se infiera la microestructura y la resistencia de los aceros a partir de medidas de dureza. A partir de ensayos realizados por distintos autores, se han tomado los valores de dureza de 98HRB y 750MPa de resistencia última como valores umbrales para mitigar la propagación de fisuras en presencia de H_2 gaseoso. La norma ASME B31.12 limita la resistencia a la tracción del metal base y las soldaduras a 110 ksi (760 MPa) / 100 ksi (690 MPa) según el método para controlar la propagación de la fisura que se tome [29] [26].

2.5. Comportamiento y recomendaciones de aleaciones metálicas en contacto con hidrógeno

Los requerimientos de los mercados hacia el uso de materiales más resistentes pero a su vez más livianos han impulsado, entre otros, al desarrollo de nuevos aceros. Esto también fue posible gracias al avance en la metalurgia y a las técnicas de fabricación. En este contexto, surgen los aceros de baja aleación y alta resistencia (HSLA por sus siglas en inglés) los cuales logran mayor resistencia y soldabilidad, manteniendo suficiente tenacidad y ductilidad. Estos aceros suelen tener muy bajo contenido de carbono y pequeñas cantidades de otros elementos de aleación, logrando buenas propiedades mecánicas debido a la composición y a la aplicación de procesamientos termomecánicos adecuados. Los elementos de aleación incluyen entre un 0.05 y un 0.25 % de carbono, un contenido de manganeso de hasta un 2 % y pequeñas cantidades de cromo, níquel, molibdeno, cobre, nitrógeno, vanadio, niobio, titanio y circonio. Estos aceros están clasificados por el Instituto Americano del Petróleo (API) en orden de su resistencia (X-42, X-46, X-52, X-56, X-60, X-65, X-70, X-80, X-100 y X-120). La soldabilidad es una propiedad crítica de los aceros para tuberías, ya que en la ZAC se pueden generar microestructuras susceptibles al daño por hidrógeno. En estos aceros HSLA la soldabilidad se controla reduciendo el contenido de carbono mientras que los niveles de resistencia son mantenidos gracias al agregado de elementos de aleación como cromo y molibdeno y adiciones muy bajas (menos del 0.1 % en peso) de niobio, titanio y vanadio [15].

El efecto de diferentes elementos de aleación sobre la soldabilidad se evalúa utilizando las expresiones de carbono equivalente (CE) [22]:

Para los aceros con un contenido de carbono menor o igual a 0.12 %, el carbono equivalente (CE(pcm)) se calcula según la ecuación 2.3:

$$CE(Pcm) = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (2.3)$$

Para los aceros con un contenido de carbono de más de 0.12 % el carbono equivalente (CE(IIW)) se calcula según la ecuación 2.4:

$$CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (2.4)$$

Para los aceros dentro de la primera categoría mencionada, el máximo de carbono equivalente permitido es de 0.25 %, y para el segundo caso, el máximo es de 0.43 % según la API 5L. CE mayores habilitan mayores dureza y la

presencia de martensita en la ZAC. La European Industrial Gases Association (EIGA) generó un documento el cual pretende promover la comprensión de quienes participan en el diseño, operación y mantenimiento seguros de sistemas de transmisión y distribución de H_2 y mezclas, siendo su alcance las tuberías metálicas que transportan hidrógeno puro o mezclas, trabajando a temperaturas entre $-40^{\circ}C$ y $175^{\circ}C$, y presiones totales entre 1 y 21 MPa. No pretende ser un documento de carácter normativo, si no una guía de buenas prácticas. En este, se contemplan límites más estrictos del carbono equivalente, que aquellos para la API 5L. La EIGA limita los valores de azufre al 0.01 %, mientras que la API 5L admite hasta 0.015 %. Esto se debe a que el azufre presente en el acero puede generar corrosión por la formación de ácido sulfhídrico. Lo mismo con el fósforo, para el cual el límite aceptable desciende a 0.015 %, mientras que la API 5L permite hasta 0.025 % [30] [22].

Si bien la EIGA admite en su documento el uso de aceros ASTM A53 grado A y B y acero ASTM A106 grado A, recomienda la utilización de materiales que cumplan con la normativa API 5L que sean de grado X52 o menor, o que cumplan con la normativa ASTM A106 grado B, indicando que estos aceros se han utilizado ampliamente en el servicio de gas hidrógeno con pocos reportes de daño. Los aceros nombrados poseen una baja SYMS ya que, como se mencionó anteriormente, una alta resistencia a la fluencia normalmente se relaciona con microestructuras susceptibles a la FPH. También limita los esfuerzos mecánicos a lo que pueden estar sometido estos materiales en caso de utilizarse para servicios de hidrógeno [31] [23] [24] [22].

Dentro de la familia de los aceros inoxidable, los austeníticos son los más resistentes a la FPH; han sido utilizado con éxito en tuberías de gas hidrógeno a alta presión y también en recipientes a presión. La presencia de las fases ferrita (inducida en el procesamiento o en la soldadura) o martensita (inducida por deformación) hace que los que estos aceros se vuelvan susceptibles a este tipo de daño, por lo que estas fases deben evitarse. Como estabilizador de austenita se suele agregar un mayor contenido de níquel, lo que termina otorgando una mayor resistencia a la FPH. Por ejemplo, el AISI 316 con un contenido de níquel mayor al 12 % en peso tiene una buena respuesta frente a la FPH entre los aceros inoxidable austeníticos monofásicos comunes, siempre que otras fases no hayan sido introducidas durante el trabajo mecánico o durante la soldadura [26].

Las aleaciones de aluminio en atmósferas secas, presentan buena resistencia a la FPH. Sin embargo, si el gas contiene vapor de agua, se pueden crear condiciones propicias para el agrietamiento por corrosión bajo tensión de las aleaciones de aluminio. La norma ASME B31.12 indica que la susceptibilidad

del aluminio a la fragilización por hidrógeno es muy baja en gas hidrógeno seco [26].

El cobre tiene una baja permeabilidad al hidrógeno, por lo que es un material apto para aplicaciones de sellado. Se debe tener en cuenta de utilizar grados de cobre libres de oxígeno cuando se trabaja con gas hidrógeno, ya que el cobre puede volverse frágil debido a una reacción entre el hidrógeno disuelto y el oxígeno (ya sea en solución o en óxidos) para formar agua, lo que da como resultado poros que promueven la falla [26].

En la tabla 2.5 se presenta de forma general la compatibilidad de distintas aleaciones metálicas y sus familias frente al uso del hidrógeno [26].

Grupo de Materiales	Gas	Líquido	Notas
Aleaciones a base de aluminio	Aceptable	Aceptable	...
Acero inoxidable austenítico con más de 8 % de níquel en solución recocida	Aceptable	Aceptable	Transformación de martensita inducida por temperatura o estrés debido a la austenita inestable
Aleaciones a base de cobre	Aceptable	Aceptable	...
Acero al carbono de baja y media resistencia y aceros de baja aleación	Aceptable	No aceptable	Fragilidad a temperatura criogénica
Hierros fundidos	No aceptable	No aceptable	No permitido para servicio de hidrógeno
Aleaciones a base de níquel	Ver nota	Aceptable	Aceptabilidad en hidrógeno gaseoso dependiendo de la resistencia y composición de la aleación. Algunas aleaciones pueden exhibir severa fragilidad por hidrógeno
Aleaciones a base de titanio	No aceptable	Aceptable	Formación de hidruro de titanio

Tabla 2.5: Compatibilidad de Materiales con Hidrógeno

2.6. Innibidores gaseosos del daño por hidrógeno

Ya en el año 1988 se realizaron ensayos que expusieron que la tenacidad a la fractura en entornos inertes para materiales API 5L X42 y X70, era el doble que para aquella realizada en mezclas 60 % H_2 y 40 % CH_4 . Sin embargo, se encontró que si la atmósfera presenta un 24 % de CO , entonces los valores de tenacidad a la fractura alcanzaban a aquellos medidos en atmosferas inertes [32].

Es posible que niveles similares de CO hubiesen estado presentes en el gas de síntesis extensamente utilizado varias décadas atrás en Uruguay y en otros países. Por lo que, teniendo en cuenta el efecto inhibitor del CO, el gas de síntesis haya sido mucho menos agresivo de lo que puede ser otra mezcla de gases conteniendo valores similares de H_2 , pero sin CO.

Otro inhibidor del efecto dañino de la fragilización es el oxígeno. Cuando el oxígeno está presente, aun en cantidades pequeñas correspondientes a 50ppm, se logra mitigar parcialmente el efecto de la fragilización. En cuanto al daño por fatiga, el O_2 , CO , C_2H_4 (etileno), SO_2 (dióxido de azufre) y metilmercaptano inhiben el crecimiento de fisuras por fatiga en H_2 , probablemente por adsorción de azufre, oxígeno o carbono que bloquea la absorción de hidrógeno [29].

2.7. Permeación en materiales Poliméricos

Los materiales poliméricos que componen la red de distribución de GN dentro de Montevideo, presentan una mayor permeación para el gas H_2 que para el GN, por lo que es posible que en caso de utilizar mezclas de $GN + H_2$, existan mayores pérdidas del gas transportado por las cañerías.

Las consecuencias de una permeación por la cañería no implican un riesgo a la seguridad, ya que serían cantidades que generan una concentración muy por debajo del límite de inflamabilidad del hidrógeno. Es posible analizar si las pérdidas por permeación en los plásticos pueden afectar al funcionamiento de la red de otra manera, como por ejemplo, pérdidas económicas.

Teniendo en cuenta las posibles condiciones del gas a ser transportado por la red, se puede estimar el volumen que se perdería de hidrógeno debido a la permeación por las paredes de la red. El coeficiente de permeación del gas por las paredes de los caños de polietileno de alta densidad (PEAD) depende altamente de la temperatura a la que se encuentra el material. A $20^\circ C$ es aproximadamente 2.5 veces mayor al coeficiente medido a $8^\circ C$ [33].

Los caños de polietileno que transportan GN en Montevideo, son enterrados bajo tierra, lo que permite obtener las temperaturas a las que está el material, ya que este estará en equilibrio térmico con el suelo que lo rodea y por lo tanto a la misma temperatura. Para profundidades de aproximadamente 1 metro de la superficie, las temperaturas del suelo varían según la estación del año, pero se sabe que no bajan de los $10^\circ C$ y no sobrepasan los $23^\circ C$ en verano. Al tener una gran inercia térmica, se puede asumir que la temperatura es estacionaria ya que cualquier cambio en las condiciones ambientales producirá un cambio lento en la temperatura del suelo a 1m de profundidad.

El coeficiente de permeación en función de la temperatura se puede deter-

minar a partir de la ecuación fórmula empírica planteada por el DBI Gruppe, proveedor de servicios de gases en Alemania, según se aprecia en la ecuación 2.5:

$$C = 28.5e^{0.1T-1} + 33 \frac{\text{Ncm}^3\text{mm}}{\text{m}^2\text{bar día}} \quad (2.5)$$

La ecuación 2.5 es una función analítica cuya curva ajusta con los valores obtenidos experimentalmente por el DBI Gruppe, quienes ensayaron la difusividad del polietileno de cuyo espesor otorga densidad de 0.96-0.99 g/cm³ (PE100) a distintas temperaturas.

Como se puede ver en la ecuación, el aumento en la temperatura aumenta el coeficiente de difusividad del hidrógeno en el plástico estudiado. Calculando para 23°C, que sería la temperatura máxima que tiene el PEAD enterrado, y por lo tanto la mayor permeación posible, se obtiene un coeficiente de difusión de:

$$C = 137.6 \frac{\text{Ncm}^3\text{mm}}{\text{m}^2\text{bar día}}$$

A partir del detalle de los materiales poliméricos de la red de distribución, con las dimensiones de los gasoductos, se puede calcular un valor estimado de permeación por kilómetro para los PE100 en función de la presión parcial de hidrógeno P_p , la cual se puede obtener mediante la ley de Dalton. Este valor resulta de la ecuación 2.6:

$$P = 11.885P_p \frac{\text{Ncm}^3}{\text{km día}} \quad (2.6)$$

Como el PE100 tiene una relación lineal entre el espesor de pared y el diámetro (relación dada por el SDR) este valor de permeación calculado es válido para todos los diámetros que componen las cañerías de distribución de PE100.

Este valor de permeación es solamente de H₂ puro, por lo que se le deberán adicionar las pérdidas por difusión de GN con su correspondiente coeficiente de permeación.

2.8. Descripción de la red de Gas Natural existente en Uruguay

En Uruguay las empresas que realizan el transporte y distribución de GN son Gasoducto Cruz del Sur (GCDS), MontevideoGas y Conecta.

El GN comenzó a ser transportado desde Argentina hasta Paysandú mediante el gasoducto del Litoral en una obra de ANCAP desarrollada desde 1998

hasta el año 2000 (año de inauguración) en la cual la cañería atraviesa el puente internacional General San Martín. El gasoducto del Litoral queda excluido de este análisis, que se concentrará en el transporte y distribución a Montevideo y zona metropolitana. Sin embargo, las conclusiones sobre materiales y presiones de operación admitidas para mezclas de GN e H_2 son aplicables a ambas instalaciones. El GN que se distribuye en Montevideo también proviene de Argentina, específicamente desde Punta Lara. Se transporta desde allí por el Gasoducto Cruz del Sur, el cual se inauguró a fines del año 2002, e ingresa a Uruguay en Santa Ana, Colonia. La operación de GCDS comienza aguas abajo de la válvula de Punta Lara, por lo que el ramal offshore es operado y controlado también por GCDS, siendo la estación en Argentina operada por la empresa “Transportadora del Gas del Sur”. [34]

Siguiendo el trazado, luego del gasoducto troncal que ingresa a Uruguay desde Argentina, existe una estación de disminución de presión llamada estación de transferencia ubicada en Montevideo, desde donde parten los gasoductos secundarios hacia las estaciones de entrega, denominadas City Gates. Estos gasoductos también pertenecen a GCDS. A partir de las City Gates, la distribución es realizada por MontevideoGas y Conecta. El esquema de la organización puede verse en la figura 2.4

De forma general, la cadena de suministro de gas abarca desde la fuente de obtención del gas hasta llegar al consumidor final. En la red nacional, podemos diferenciar 2 tipos de segmentos:

- Transporte y distribución: entre 42.8 bar (4.28 MPa) y 24.5 bar (2.45 MPa), abarca desde el ingreso a Uruguay hasta las City Gates. Estas presiones se corresponden con las máximas presiones de operación (MA-PO) para cada tramo.
- Servicio, menor a 4 bar, comprende desde las City Gates hasta los usuarios finales.

Materiales y condiciones de operación en el sector Transporte y Distribución

La red nacional, una vez en Colonia, consta de un gasoducto troncal y tiene una MAPO de 42.8 bar. Este tramo va desde Santa Ana hasta la estación de transferencia con una longitud total de 153.25 km. En la estación de transferencia la presión es reducida hasta 24.5 bar y el trazado de la red continúa a esta presión máxima de operación hasta las City Gates a través de gasoductos secundarios.

2.8. DESCRIPCIÓN DE LA RED DE GAS NATURAL EXISTENTE EN URUGUAY33

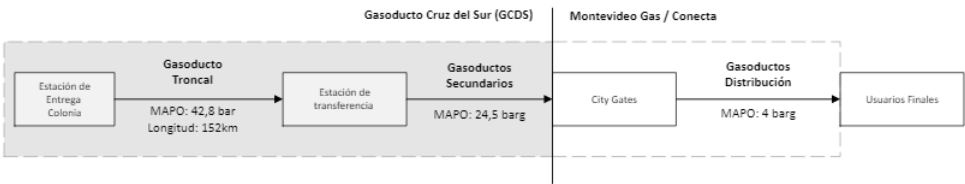


Figura 2.4: Diagrama de la Red de Gas Natural. Fuente: Elaboración propia con datos de MG y GDCS

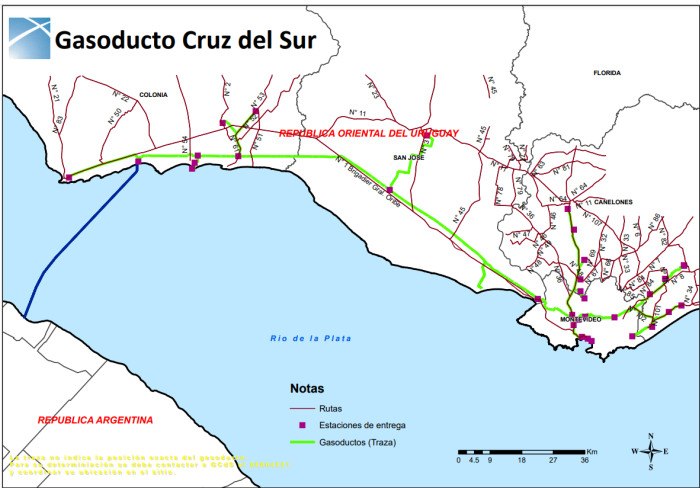


Figura 2.5: Diagrama de la Red de Gas Natural. Fuente: www.gcds.com.uy

En la tabla 2.6 Se pueden encontrar los materiales, diámetros nominales, espesores de pared, presiones de operación y tipo de soldadura longitudinal para los ductos utilizados en estos tramos.

Tabla 2.6: Materiales utilizados en el sector transporte

Material	NPS (in)	Espesores de Pared (mm)	Tipo de Soldadura Longitudinal
API 5L X65	24	14.3 / 12.9	SAW
API 5L X65	20	11.1	ERW
API 5L X65	18	6.4 / 7.1 / 8.7 / 10.3 / 12.7	ERW
API 5L X42	18	8.7 / 9.53	ERW
API 5L X46	12	9.5	ERW
API 5L X42	6	6.4	Seamless - Laminado en Caliente
API 5L X42	4	6.4	Seamless - Laminado en Caliente
API 5L X42	3	5.5	Seamless - Laminado en Caliente

Es importante tener en cuenta que en este tramo, existe desde el troncal un desvío de un ramal hacia la central Puntas del Tigre, que está ubicada en el departamento de San José.

Materiales y condiciones de operación en el sector Servicio

MontevideoGas es la empresa responsable de la distribución del gas dentro de la capital, mientras que Conecta suministra este combustible a todas las zonas cubiertas en el interior del país. Se puede observar la cobertura de MontevideoGas en la figura 2.6.

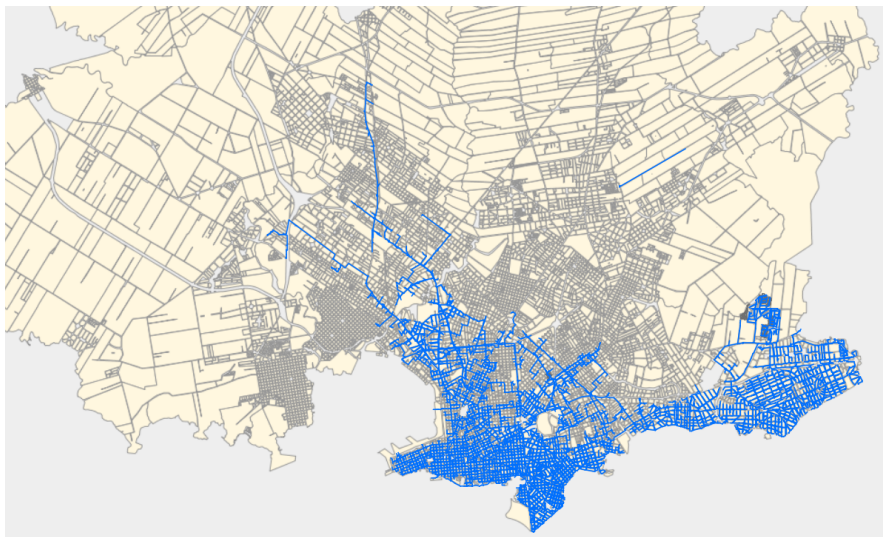


Figura 2.6: Zona de cobertura de suministro dentro de Montevideo. Fuente: MontevideoGas.

Los materiales de los ductos utilizados en el sector servicio figuran en la tabla 2.7. Se utilizan materiales poliméricos como el Polietileno de alta densidad (PEAD), con uniones realizadas por electrofusión y también algunos tramos de materiales metálicos que cumplen con los códigos API 5L, ASTM A53, ASTM106. La cañería instalada en este sector reporta ser puesta en operación desde el año 1996 en adelante. Existe un 2.34 % de la red (aproximadamente 18km, compuestos de varios tramos separados), de material polimérico, de la cual no se tiene fecha de instalación (se asume previa al año 1996).

Material	Diámetros DN (mm)	MAPO (barg)
PEAD 80 SDR 11	20/32/40/50/63/90/125/180/250	4
PEAD 100 SDR 11	20/32/40/50/63/90/125/180/250	4
PEAD PE 100 SDR 17.5	250	4
Acero al Carbono Api 5L X52 Sch 20	300	4
Acero al Carbono A53 Sch 80 Gr A	40	4
Acero al Carbono A53 Sch 40 Gr A	50/80/100/150/250	4
Acero al Carbono A106 Sch 80 Gr A	40	4
Acero al Carbono A106 Sch 40 Gr A	50/80/100/150/250	4
Acero al Carbono A53 Sch 80 Gr B	40	4
Acero al Carbono A53 Sch 40 Gr B	50/80/100/150/250	4
Acero al Carbono A106 Sch 80 Gr B	40	4
Acero al Carbono A106 Sch 40 Gr B	50/80/100/150/250	4

Tabla 2.7: Materiales en el tramo de distribución y servicio

Las válvulas de servicio utilizadas en este sector están compuestas por los siguientes materiales:

- Cuerpo – Latón amarillo con un contenido de entre 34 y 37 % de Zinc.
- Asientos – Caucho de Nitrilo-Butadieno (NBR)
- Esfera – AISI 316

Las válvulas reguladoras de presión están compuestas por los siguientes materiales:

- Cuerpo y tapa - Aleación de zinc fundido a presión según ISO: ZnAl4;
- Partes internas - Nitrilo NBR; Acero inoxidable; Broce; Aluminio

2.9. Conversiones de líneas preexistentes

Existen recomendaciones para la conversión de tuberías construidas originalmente para el uso de GN a mezclas de H_2+GN . Estas recomendaciones figuran en las normas EIGA (2014) y ASME B31.12 (2023). Ambas coinciden en que la complejidad de la conversión del servicio depende de la cantidad de incógnitas sobre la información vinculada a la tubería como material, tipo de soldadura, año de puesta en operación, entre otros. Por ejemplo, si faltan los certificados sobre los materiales, la descripción de los mismos debe ser determinada mediante análisis químico y físico extrayendo una muestra por cada 1.6 km de tubería [26,30].

El código ASME B31.12 2023 también indica que el control y la detección de fracturas deben calificarse siguiendo uno de los dos métodos propuestos (método A o método B), o de lo contrario la MAPO debe ser tal que tensión circunferencial sea menor o igual al 40 % del SMYS. El uso de cualquiera de los métodos previstos implica la realización de ensayos de carácter destructivo (ejemplo Charpy). Además, para valores mayores de tensión circunferencial, la norma también pide análisis de propiedades mecánicas (dureza, SYMS y resistencia última) del metal base y las soldaduras, cada 1.6km de ducto utilizado, independientemente de la existencia de certificados de fábrica. El procedimiento parece extremadamente complejo y costoso, ya que implica la realización de ensayos destructivos sobre muchos sitios de muestreo. La norma EIGA 2014 resulta más restrictiva en este punto, y recomienda que la presión sea lo suficientemente baja como para reducir el nivel de tensión en el material de la tubería por debajo del 30 % del SYMS en cualquier punto de la tubería. La FPH esta controlada, entre otros, por la resistencia y microestructura del material. La dureza puede usarse para inferir la presencia de microestructuras susceptibles en las tuberías, incompatibles con el H_2 gaseoso. Sin embargo, cuando medimos dureza lo hacemos sobre una zona pequeña del material. Además, fenómenos vinculados a la segregación (falta de homogeneidad en la composición química) y tratamientos térmicos promueven la coexistencia de diferentes microestructuras en el componente, que pueden presentar durezas variables. Teniendo esto en cuenta, es posible notar que el valor resistencia última brinda poca información sobre la distribución de las microestructuras y la dureza local a lo largo del espesor de un ducto y, por lo tanto, sobre la respuesta del material a la FPH. Por ejemplo elementos como manganeso y fósforo, presentes en menor concentración en aceros HSLA, tienden a segregarse y luego de un proceso de soldadura pueden provocar diferentes microestructuras en el espesor del ducto, pudiendo presentar valores de dureza mayores a los del metal base. Por tanto, en la ZAC por la soldadura pueden hayarse microestructuras susceptibles de presentar crecimiento de grietas subcrítico. La norma ASTM B31.12 limita la dureza según la composición del acero a valores entre 238 y 245 HV [26,29].

2.10. Compatibilidad de mezclas $GN+H_2$ en la red existente en Uruguay

Cualquier red de GN posee una capacidad de almacenamiento intrínseca conocida como *Linepack*, que equivale a la totalidad del gas (en volumen) que puede ser contenida en la red de gas. Como la presión en la red varía, también

lo hace la cantidad de gas almacenado. Es normal que el *linepack* varíe a lo largo del día y día a día, ya que el flujo se regula en función de la oferta y la demanda. En la red nacional, la mayor parte del almacenamiento se encuentra en el sector transporte, ya que es el que opera a mayor presión. Por otro lado, si bien la presión de operación es un factor importante a tener en cuenta al estudiar la integridad de la red, son las variaciones de presión las que podrían generar problemas de seguridad y vida útil. Existe bibliografía que demuestra que una vez fragilizado el componente metálico, el crecimiento de las fisuras se debe a la interacción de átomos de hidrógeno y las variaciones de presión. En cambio, si la presión de la tubería es constante, esto evita que los átomos de hidrógeno presionen más al gasoducto aumentando el tamaño de las fisuras, pudiendo llegar las mismas a valores de apertura crítica de fisura y provocar la rotura drástica del componente [35].

Respecto al uso de gas a altas presiones, hay que tener en cuenta que el troncal existente en Uruguay tiene un desvío hacia la central Puntas del Tigre, la cual cuenta con un compresor en el ingreso a planta. Ciertos estudios muestran que el uso de mezclas de GN+H₂ en equipos compresores admite solo un 5 % de concentración de hidrógeno sin modificaciones en el equipo, y es posible llegar a un 10 % con modificaciones en el mismo [36].

Además, como fue descrito anteriormente, parte del ducto del troncal está construido en acero grado API 5L X65. Por los motivos antes expuestos, se sugiere descartar la inyección a hidrógeno en el tramo troncal de transporte.

A partir de la estación de transferencia, las presiones de operación se encuentran en valores menores a 24.5 bar y los materiales utilizados son aceros API 5L menores al grado 52, aceros ASTM A53 grado A y B, y ASTM A106 grado A y B y materiales poliméricos por lo que resulta atractivo el estudio de inyección de H₂ a la salida de la estación de transferencia, lo que además minimizaría las instalaciones vinculadas a la inyección de hidrógeno. Analizando la materialidad del resto de los componentes de la instalación que son metálicos, se deben sustituir las válvulas y accesorios que no sean aleaciones base cobre, base aluminio y aceros inoxidables austeníticos por componentes en base a alguna de estas 3 familias.

En este tramo, es necesario tener en cuenta las condiciones de integridad actuales de los gasoductos metálicos existentes para establecer los máximos de H₂ a admitir. Determinar el tamaño de defectos y fisuras preexistentes determina la capacidad de un gasoducto para operar con mezclas con hidrógeno. Para esto se recomienda realizar inspecciones internas exhaustivas de cada metro de la línea de transmisión para identificar cualquier defecto preexistente que deba abordarse. Estas inspecciones deben contar con algún método de detección

de fisuras, siendo entre los métodos disponibles, recomendado el uso de ultrasonido. Equipos para detección de fisuras pueden acoplarse a los dispositivos de limpieza y de inspección en línea (llamados pigs o cerdos) para realizar el análisis. En caso que no se detecten imperfecciones de las buscadas, es conservador considerar que existen fisuras de un tamaño correspondiente al doble del mínimo detectable por el equipo empleado y realizar cálculos de propagación de fisura a partir de esos valores, criterio similar es aplicado en programas de vigilancia para ramas más críticas de la industria (energía nuclear) [37].

En cuanto a las soldaduras existentes, estas deben estar libres de defectos y las propiedades mecánicas de las ZAC deben coincidir con las propiedades del ducto. Los niveles de dureza en la soldadura y de la ZAC deben controlarse para evitar puntos duros. La EIGA en su documento IGC doc 121/14 recomienda realizar mediciones de microdureza en zonas transversales a través del metal base de la tubería, metal de soldadura, soldadura de costura y ZAC de la soldadura. Se debe asegurar la ausencia de puntos duros de más de 22 HRC, siendo esta un poco más restrictiva que la ASME B31.12 en este aspecto. Mediciones de dureza sobre metal base, soldadura y ZAC deben ser realizadas a fin de corroborar estos requisitos [16, 30]. Las recomendaciones de la EIGA indican que se recurra al registro de incidentes y reparaciones de la red desde el inicio de la operación, para analizar las especificaciones de los materiales utilizados en las reparaciones y dirimir si cumplen con los requisitos de adaptación a la conversión de GN+H₂. También se debe tener presente las filtraciones que se puedan generar en los tramos poliméricos.

Se ha calculado la tensión circunferencial para los tramos metálicos existentes en la red a partir de la estación de transferencia y se ha comprobado que para todos ellos es menor al 30 % del SMYS, por lo que no sería necesario aplicar un método de los descritos en la norma ASTM B31.12 de tenacidad a la fractura. También se ha corroborado que dados los espesores de pared de los ductos de acero utilizados en el tramo en análisis, la presión que se obtiene de la ecuación 2.2 (presión admisible de diseño) siempre es mayor a la presión de operación actual de la red.

2.11. Conclusiones

Debido principalmente a los aceros utilizados, entre otros factores, en la sección anterior se descartó la posibilidad de inyectar H₂ previa a la estación de transferencia. Habiendo realizado el estudio sobre las condiciones de operación de los ductos de la red y materialidad de los mismos, se concluye que desde el punto de vista teórico no existirían límites para el porcentaje de H₂ a inyectar a

partir de la estación de transferencia en adelante. En este tramo, los materiales de los ductos están entre los recomendados por las normas internacionales, los espesores de los ductos cumplen con la ecuación de presión de diseño dada por la norma ASTM B31.12 y las tensiones circunferenciales actuales son menores al 30 % del SMYS.

Sin embargo, para que esto se pueda realizar se debe tener en cuenta que:

- se deberán realizar ensayos de inspección en línea para asegurar la integridad de la red, de que no cuenta con fisuras ni grietas. En caso de hallarlas, se debe determinar su apertura y realizar un cálculo de propagación de la fisura, considerando material y carga del tramo.
- se deben realizar medidas de dureza sobre material base, soldadura y ZAC para asegurarse de cumplir con las recomendaciones de la EIGA
- modificar componentes metálicos que no sean de aleaciones inoxidable auténtico, base aluminio o base cobre (para cualquier porcentaje de H_2 a inyectar).
- las uniones bridadas deben ser cambiadas por uniones soldadas, en caso de mantener bridas aquellas que tengan más de 20 años deben ser renovadas al igual que las válvulas existentes.
- de aquellos tramos sobre los que no se tenga el historial de operación documentado, deberán ser reemplazados por tramos nuevos
- si bien aceros que cumplan con las normas API 5L grado igual o menor a 52, ASTM A106 o ASTM A53 están incluidos en la norma ASME B31.12, la EIGA recomienda dentro de estos el uso de los API 5L grado 52 o menor y ASTM A106 grado B

Los puntos anteriores resultan engorrosos y costosos, por lo que las conversiones realizadas de líneas preexistentes no han seguido este camino. Las experiencias internacionales sobre la conversión de redes existentes de GN a servicios de mezclas $GN+H_2$ se han realizado en forma paulatina, partiendo de una base de 2 a 5 % de H_2 y realizando luego de 3000 horas de operación una evaluación de fugas sobre determinados puntos críticos (uniones bridadas, soldaduras, válvulas, transiciones de materiales), rondando los máximos actuales de H_2 en 23 %.

Capítulo 3

Comportamiento de la combustión de mezclas GN+H₂

3.1. Introducción

La inyección de Hidrógeno en la red de Gas Natural genera cambios en la composición del gas y consecuentemente en el desarrollo de la combustión. Por lo tanto, todos los usuarios de gas natural conectados aguas abajo de una eventual inyección de hidrógeno, se ven afectados por la misma, siendo gran parte de ellos usuarios pasivos, a los cuales no se les puede exigir ninguna acción en los equipos para su uso normal y seguro. Por lo tanto, las mezclas de H₂ y GN deben ser imperceptibles por el usuario, es decir, la mezcla deber ser intercambiable con el gas natural original. La intercambiabilidad de gases se define como, la capacidad de sustituir un combustible gaseoso por otro en una aplicación de combustión sin cambiar la seguridad operacional, la eficiencia, el rendimiento ni aumentar sustancialmente las emisiones de contaminantes del aire [38]. De este modo, al intercambiar un gas por otro, el quemador debe mantener (o con cambios permisibles) la potencia térmica, el rendimiento de conversión de energía, su funcionamiento estable (sin retroceso ni desprendimiento de llama), combustión completa (concentración admisible de productos de combustión incompleta) y ausencia de puntas amarillas que indiquen procesos pirolíticos y hollín relacionados con el ingreso insuficiente de aire para la combustión [39].

Generalmente la adición de hidrógeno al gas natural disminuye el índice de Wobbe y aumenta la velocidad de llama laminar (SI). El índice de Wobbe se puede relacionar al suministro de calor del sistema de combustión, y es un requisito esencial para el correcto funcionamiento desde una perspectiva del

usuario final. La velocidad de llama laminar es una propiedad de la mezcla combustible y comburente, que está altamente relacionada con la estabilidad de la llama y su valor está fuertemente vinculado a fenómenos como el calado de la llama. El calado de llama puede dañar el quemador e incluso extinguir la llama, lo que puede promover un accidente en el ambiente donde se utilice el quemador, por esta razón es un tema que debe estudiarse con un alto grado de responsabilidad [8].

El diagrama de Dutton presenta los límites de intercambiabilidad como función de la composición y el índice de Wobbe [40]. Sin embargo, varios autores mencionan que este enfoque deja de lado muchos aspectos que deben tenerse en cuenta a la hora de intercambiar dos gases combustibles [41–43]. El método de los índices de Weaver, involucra seis indicadores de intercambiabilidad de gases, que reflejan: la tasa de producción de calor, suministro de aire primario, el soplado o desprendimiento de la llama, el calado o retroceso de la llama, la combustión incompleta y la formación de llamas amarillas; cuando se intercambian dos gases en un mismo sistema de combustión [41, 44]. De la misma forma la American Gas Association (AGA) ha desarrollado un método que intenta reflejar el comportamiento de la llama cuando se intercambia el gas combustible de suministro, particularmente atendiendo, la formación de llamas amarillas, el soplado de la llama y el calado [42]. Ortiz [41] menciona que estos índices se limitan a la tecnología utilizada y con ciertas mezclas, dado que los ensayos fueron llevados a cabo cuando había una fuerte dependencia del gas manufacturado y el componente de hidrógeno era muy elevado. Sin embargo para el presente proyecto esto resulta en una ventaja, dado que el estudio pretende evaluar la adición de hidrógeno a una corriente de gas natural.

de Vries [8], aplica un enfoque de intercambiabilidad que se basa en caracterizar los cambios de rendimiento en función de la composición del combustible, utilizando parámetros de combustión, en lugar de depender de los parámetros de diseño del quemador (por ejemplo velocidad de llama, exceso, flujo, etc.). Otro punto a destacar de su trabajo, es un principio operativo importante: en ausencia de un sistema de control activo, la relación combustible-aire en un aparato cambia con la composición del combustible. La relación combustible-aire (primario) es la propiedad dominante que cambia cuando se cambia el combustible, lo que tiene un gran impacto en la estabilidad de la llama. El autor caracteriza la estabilidad de la llama (a través del calado), considerando la velocidad de llama laminar y analiza las consecuencias de agregar hidrógeno al gas natural.

Cuando la intercambiabilidad no es adecuada, surgen una serie de problemas en la combustión, en el propio fenómeno de la combustión y asociados a la

naturaleza de las emisiones, como por ejemplo: inestabilidad en la combustión, desprendimiento de la llama del quemador, apagado de la llama, autoignición del gas, problemas de dinámica de la llama, retroceso de llama, puntas de llama amarillas, aumento de emisiones de CO , NO_X , C_XH_Y y SO_2 [41]. Estos problemas, que dependen no solamente del gas combustible, sino también del artefacto (quemador), afectan la eficiencia y seguridad de operación, así como la durabilidad de los equipos [42].

Para analizar la intercambiabilidad de los gases y las características de la combustión de las principales aplicaciones domésticas de forma teórica, se utiliza una metodología que caracterice las diferentes mezclas y evalúe su comportamiento en los sistemas de combustión. La metodología adoptada para el análisis del comportamiento de las mezclas involucra cinco enfoques complementarios:

Reactor de mezcla homogénea (WSR por sus siglas en inglés). Mecanismos detallados de reacción para determinar emisiones de gases y límites de temperatura.

Plug flow. Estimar diferentes velocidades de llama laminar.

Índices de intercambiabilidad. Los indicadores de referencia son la relación entre los índices de Wobbe de los gases (*Heat Rate Ratio*, Jh), el índice de retroceso de llama (*Flashback Index*, Jf), índice de formación de llamas amarillas (*Yellow-tipping Index*, Jy), índice de combustión incompleta (*Incomplete Combustion Index*, Ji), Índice de desprendimiento de llama (*Lifting Index*, Jl) y índice de suministro de aire (*Primary Air Ratio*, Ja), conocidos como los índices de Weaver [42, 44]. Estos índices se utilizan para modelar y calcular la intercambiabilidad entre gas natural y diferentes mezclas de gas natural e hidrógeno.

CRFD. Estudio de llamas de premezcla parcial mediante el uso de modelos de flamelets, implementando mecanismos detallados de reacción. Se resuelven ecuaciones de conservación de la fracción de mezcla, de la energía, así como el comportamiento turbulento del flujo y la conservación de las especies. Todo esto permite determinar la geometría y estructura de la llama, pudiendo obtener otras estimaciones de su perfil de temperatura, de especies, y de velocidades, logrando obtener una mejor comprensión del efecto de la adición de hidrógeno a una mezcla de gas natural.

Análisis experimental. Se realiza un análisis experimental del desempeño de las mezclas de GN e H_2 en quemadores atmosféricos (mechero Bunsen y anafe). Para cada quemador se implementa un protocolo de mediciones

de forma tal de analizar de forma cualitativa y cuantitativa las variaciones que sufre al aumentar la el porcentaje de H_2 en la mezcla.

3.2. Propiedades del Gas Natural

Como fue mencionado anteriormente, el gas natural utilizado en Uruguay proviene de Argentina, el cual ingresa al país por dos puntos, Santa Ana en el departamento de Colonia y en Paysandú. La composición, y por ende, las propiedades del gas natural dependen de las características de los fluidos en el yacimiento y de los tratamientos realizados (deshidratación, procesos para remoción de hidrocarburos pesados y endulzamiento (captura de CO_2 y H_2S). El gas natural está compuesto principalmente por metano (CH_4), en fracciones molares que suelen superar el 90 %. Además generalmente presenta contenido de otros hidrocarburos más pesados como etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}), pentano (C_5H_{12}), hexano (C_6H_{14}) y gases inertes como CO_2 y N_2 . El gas disponible en Uruguay es una mezcla resultante de la red de transporte de Argentina, el cual varía con el tiempo. En la tabla 3.1 se presentan cuatro composiciones particulares del gas natural.

Tomando el historial de composición diario desde el año 2021 al 2023, se calcula el índice de Wobbe en cada caso y luego se destacan las composiciones que dan el máximo valor de Wobbe, el mínimo, y la composición que mejor aproxima al valor promedio visto, se presenta además la densidad relativa al aire (G) y poder calorífico superior (PCS) de estas composiciones.

3.3. Reactor de mezcla homogénea (RMH)

Con el objetivo de hacer un primer modelado de la combustión, se estudia la misma en un reactor de mezcla homogénea. Se realiza la hipótesis de que en dicho reactor la turbulencia es elevada. Por esto, la mezcla del combustible y el oxidante es instantánea, por consecuente se descartan gradientes espaciales de concentración.

Dado que la mezcla de los reactivos no es una limitante para la velocidad de las reacciones, estas están dominadas por la cinética química, es decir, por el camino que recorren los reactivos, participando en diversas reacciones que dan lugar a los productos finales. Estas reacciones se dividen en las elementales, caracterizadas por colisiones entre moléculas, y en las globales, que se caracterizan como el conjunto de las elementales, en una visión más macroscópica del proceso.

	Promedio	Mínimo	Máximo	Crítica
CH_4	92.91	94.42	87.73	94.15
C_2H_6	4.48	2.17	7.85	2.61
C_3H_8	0.68	0.37	2.11	0.45
$I - C_4H_{10}$	0.12	0.049	0.36	0.0581
$N - C_4H_{10}$	0.16	0.093	0.47	0.11
$I - C_5H_{12}$	0.0323	0.027	0.088	0.033
$N - C_5H_{12}$	0.024	0.028	0.067	0.033
C_6H_{14}	0.015	0.015	0.032	0.020
CO_2	0.50	0.89	0.65	1.15
N_2	1.04	1.92	0.60	1.35
PCS (kJ/Nm ³)	41347	39830	44000	40191
Densidad Relativa al aire, G	0.60	0.59	0.63	0.59
Wb (kJ/Nm ³)	53450	51881	55030	521718

Tabla 3.1: Propiedades del gas natural en Uruguay - 2021, 2022, 2023.

Sumando a la hipótesis de que no hay gradientes de temperatura, y que además el sistema opera en régimen estacionario, resulta que el proceso se modela mediante ecuaciones algebraicas de balance de especies y energía.

Para cada especie (i) involucrada en la reacción, el balance de masa de la misma, en un volumen de control (V), puede escribirse según la ecuación 3.1.

$$\dot{m}_i = V\dot{m}_i''' + (\dot{m}_{i,vc})_{in} - (\dot{m}_{i,vc})_{out} \quad (3.1)$$

Siendo $\dot{m}_i$ la variación de la masa de la especie i en el tiempo, $\dot{m}_i'''$ la generación volumétrica de la especie, $(\dot{m}_{i,vc})_{in} - (\dot{m}_{i,vc})_{out}$ los flujos másicos de entrada y salida de la especie en el volumen de control.

El término de generación másica volumétrica puede determinarse a partir de la variación de la concentración molar ($\dot{w}_i$) y el peso molecular de la misma (MW_i), según se describe en la ecuación 3.2.

$$\dot{m}_i''' = \dot{w}_i MW_i \quad (3.2)$$

Donde:

$$\dot{w}_i = \frac{d[i]}{dt} \quad (3.3)$$

Siendo $[i]$ la concentración molar de dicha especie.

Considerando un sistema estacionario, a partir de las ecuaciones 3.1,3.2,3.3, el balance de masa se reduce a la ecuación 3.4.

$$0 = \dot{w}_i MW_i + \dot{m}(Y_{i,in} - Y_{i,out}) \quad (3.4)$$

Con un balance de masa a cada especie, se tiene tantas ecuaciones como especies. Suponiendo que hay N especies, se tienen N ecuaciones, para resolver un sistema de N+1 incógnitas, donde esta última es la temperatura, la cual influye en el valor de $\dot{w}_i$.

Para completar el sistema se introduce un balance de energía. Suponiendo un reactor de paredes rígidas, y estado estacionario del sistema, el balance de energía del sistema se determina según la ecuación 3.5 o 3.6.

$$\dot{Q}_{vc} = \dot{m}(h_{in} - h_{out}) \quad (3.5)$$

$$\dot{Q}_{vc} = \dot{m} \left(\sum_i [Y_{i,out} h_i(T)] - \sum_i [Y_{i,in} h_i(T_{in})] \right) \quad (3.6)$$

A partir de las ecuaciones de los balance de masa de cada especie y de energía, se puede determinar en su totalidad el estado del sistema.

3.3.1. Resolución del RMH

El modelado del reactor de mezcla homogénea se realizó mediante la implementación del *software* de código abierto Cantera [45]. Con dicho software, se simuló el comportamiento del reactor, para distintas proporciones de hidrógeno en mezcla y condiciones de funcionamiento. El proceso de reacción se desarrolla mediante la implementación de un mecanismo detallado de reacción, específicamente, el mecanismo CRECK, creado por el Politécnico de Milano, el cual considera 497 especies involucradas en un total de 24501 reacciones [46–48]

Se generaron un total de tres rutinas para evaluar el comportamiento de las distintas mezclas. Para estudiar la sensibilidad del sistema frente a la variación del porcentaje de hidrógeno presente en la mezcla, se simuló el reactor como uno donde reaccionan gases ideales un proceso a entalpía constante, por lo que el sistema es adiabático.

Inicialmente se obtuvieron datos sobre la temperatura del reactor, así como de las fracciones molares para distintas especies de los productos de combustión para las mezclas de gas natural.

Las especies analizadas son los principales productos de combustión: CO_2 , CO , H_2 ; los óxidos de nitrógeno NO_X ; y emisiones contaminantes. Según Zhang [49], en la combustión de gas natural en quemadores como una hornalla de cocina, se pueden generar emisiones consideradas contaminantes como

los carbonilos: formaldehído (CH_2O), acetaldehído (CH_3CHO), y acetona (C_3H_6O), por lo que estos fueron contabilizados en todos los modelos.

En segundo lugar se analizó el comportamiento de estos productos de combustión, en función del contenido de hidrógeno en el combustible, en un reactor de mezcla homogénea, en el cual la temperatura de los productos permanece constante.

Por último, se analizó el mismo reactor, para diversas fracciones de hidrógeno en mezcla, con la finalidad de caracterizar el tiempo de residencia necesario para lograr resultados comparables a los que se alcanzan en el equilibrio (tiempos infinitos). De este modo se puede analizar como influye la adición de hidrógeno en la velocidad de las reacciones.

3.3.2. Sistema adiabático

Para caracterizar el proceso de combustión se considera la razón de equivalencia combustible aire, ϕ , definida como la relación de combustible y aire de la mezcla dividido la relación combustible y aire en condiciones estequiométricas (a veces se suele mencionar como razón de equivalencia o riqueza). Por lo tanto, una razón de equivalencia igual a 1 corresponde a una relación estequiométrica, cuando es mayor a la unidad hay más combustible que el que se puede oxidar con la cantidad de aire en la mezcla y si es menor a la unidad hay un exceso de aire, de forma que teóricamente se podría oxidar todo el combustible con el aire de la mezcla.

Se ensayaron mezclas cuyas razones de equivalencias alcanzan valores entre 0.9 y 0.5 considerando que los quemadores atmosféricos, como los anafes, suelen operar, globalmente, en condiciones de exceso positivo, alcanzando valores cercanos a $\phi = 0.5$ [40].

Por otro lado se analiza el efecto de la adición de H_2 a la composición de combustible, considerando valores de 0 a 95 % en volumen.

En un reactor de mezcla homogénea adiabático (entalpía constante), a medida que aumenta la fracción de H_2 en la mezcla de reactivos, se aprecia un claro y evidente descenso de CO_2 en los productos, así como un aumento de H_2O . La tendencia de la concentración de ambas especies se esquematiza en la figura 3.1. Razonablemente, el aumento en la fracción molar del agua es debido a la mayor presencia de hidrógeno, que a su vez al reemplazar compuestos de carbono y provoca que se genere menos CO_2 al final del proceso. Otras especies de interés son el CO , por ser un indicador de combustión incompleta; así como los NO_X , ya que son emisiones contaminantes que empeoran la calidad del aire, y por lo tanto se busca que estas se mantengan en el mínimo posible. En la figura 3.2 se presenta la evolución de la fracción de cada una de ellas en

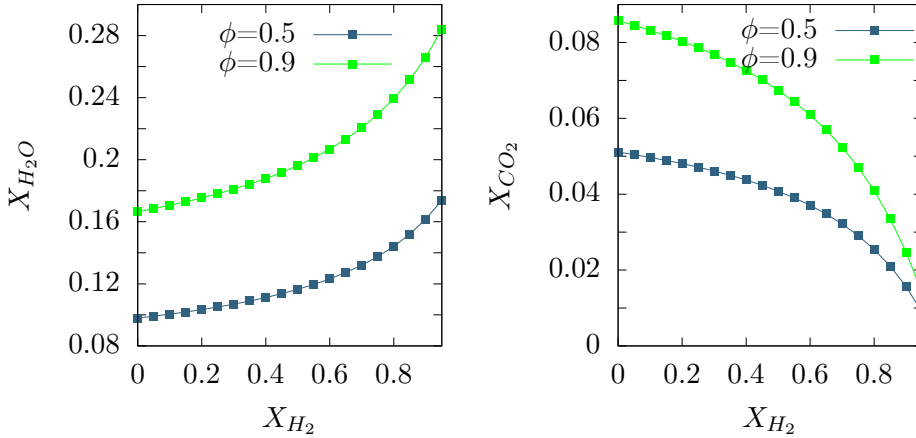


Figura 3.1: A la derecha se muestra un gráfico que expone las fracciones molares de CO_2 en función de la fracción de H_2 en mezcla para un sistema adiabático. A la izquierda, se visualiza la concentración de H_2O , en función de la misma variable

los productos en función de la fracción de hidrógeno en la mezcla de combustibles. Según los resultados obtenidos, se aprecia que los valores de monóxido de carbono tienden a disminuir al aumentar la fracción de hidrógeno, para las dos razones de equivalencias consideradas. Además de la sustitución de átomos de C en el combustible por H_2 , según Rajpara [50], al aumentar la fracción de hidrógeno en la mezcla, se fomenta la formación de radicales libres OH , los cuales influyen en gran medida en la oxidación del CO , provocando una pronunciada caída en su registro. Por otra parte, el incremento de los NO_X está principalmente relacionado con el aumento de la temperatura del sistema con la adición de H_2 en la mezcla, según se aprecia en la figura 3.3. Este fenómeno también fue resaltado por Rajpara [50]. La formación de óxidos de nitrógeno es altamente sensible a la temperatura, y cuando esta aumenta, mecanismos térmicos se ven favorecidos, entre los cuales se destaca el mecanismo de Zeldovich [51], este resultado se ve respaldado además por los resultados de Wright [52], en el cual recopila distintos estudios y donde se llegan a ver los mismos comportamientos.

Adicionalmente se estudian algunas de las emisiones contaminantes de inte-

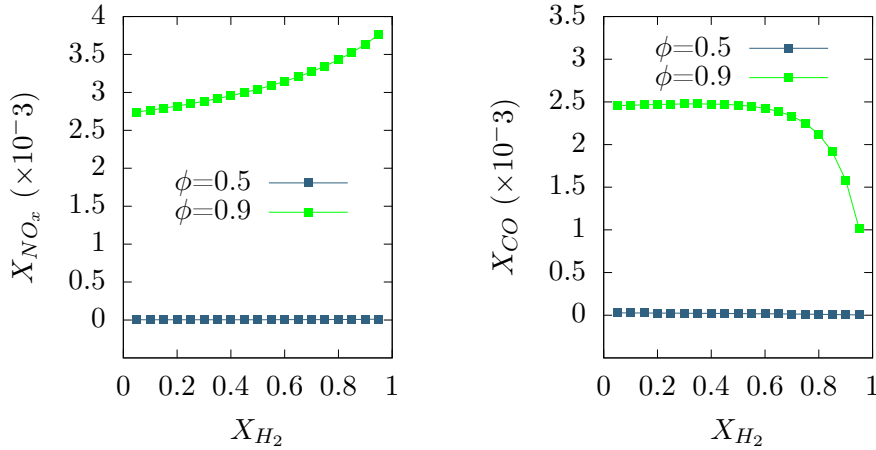


Figura 3.2: Gráfico de las fracciones molares de NO_x y CO en función de la cantidad de H_2 en mezcla, para $\phi = 0.5$ y $\phi = 0.9$ en un sistema adiabático

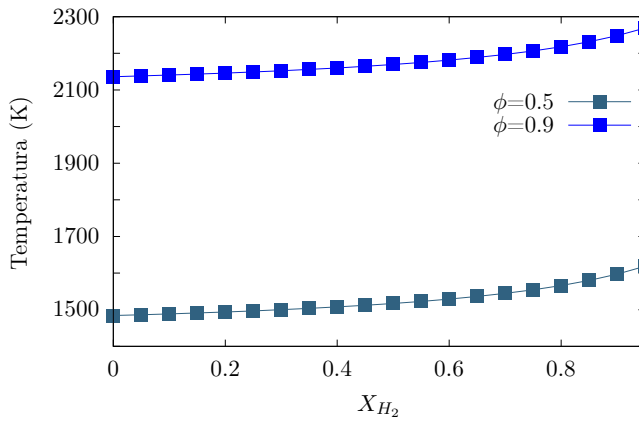


Figura 3.3: Gráfico de la temperatura del reactor en función de la cantidad de H_2 en mezcla, para $\phi = 0.5$ y $\phi = 0.9$ en un sistema adiabático

rés, CH_2O , CH_3CHO y C_3H_6O respectivamente. En la figura 3.4 se presenta la evolución de la fracción molar de estas especies en función de la fracción de hidrógeno en el combustible, haciéndose evidente su comportamiento. Las especies antes mencionadas se ven reducidas a medida que aumenta el hidrógeno.

Nuevamente, esto viene de la mano de lo que ya se mencionó; principalmente se sustituyen átomos de carbono por hidrógeno, lo que claramente reduce la cantidad de estos compuestos. Por lo tanto, una aumento de H_2 en la mezcla combustible genera una reducción de estas emisiones contaminantes.

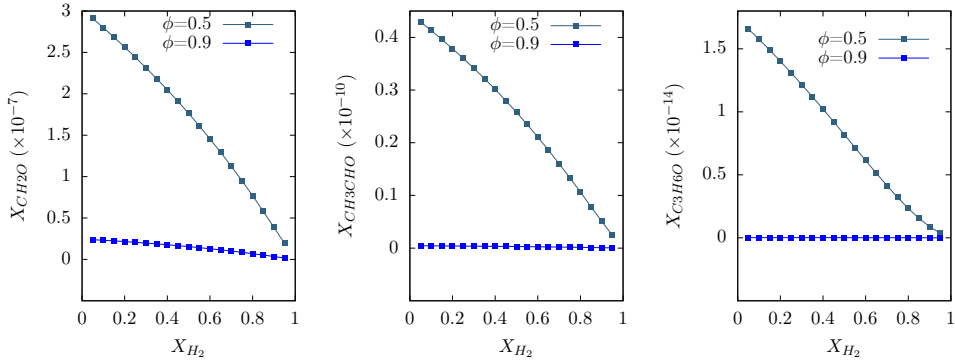


Figura 3.4: Fracción molar de contaminantes (CH_2O , C_3CHO , C_3H_6O) en función de la fracción de hidrógeno. Se muestran resultados para dos razones de equivalencia. $\phi = 0.5$ y $\phi = 0.9$

3.3.3. Temperatura Constante

Considerando que el fenómeno de disociación (que depende de la temperatura), influye en los productos de combustión, y que la temperatura de los productos en un sistema adiabático depende de la composición del combustible, en esta sección se analiza la composición de los productos en un reactor de mezcla homogénea a temperatura constante.

La temperatura para la cual se modeló el sistema es de 1485K, que es la temperatura que alcanza el sistema adiabático cuando no hay hidrógeno en la mezcla, y además $\phi = 0.5$, de modo que se comparte el punto de partida con el caso adiabático.

En la figura 3.5, se puede ver que las fracciones molares de CO_2 y H_2O para ambas situaciones, no presentan cambios significativos, por lo que no es evidente que la disociación juegue un papel significativo en el resultado final para estas especies, ya que las curvas se observan superpuestas.

En la figura 3.6 se comparan los resultados de CO y los óxidos de nitrógeno para el sistema adiabático y a temperatura constante. Se observa que si bien ambas curvas son crecientes con el aumento de H_2 en la mezcla, para el caso adiabático (donde la temperatura aumenta), en comparación, la producción de NO_x aumenta de forma significativa. Por lo tanto, se puede concluir que el

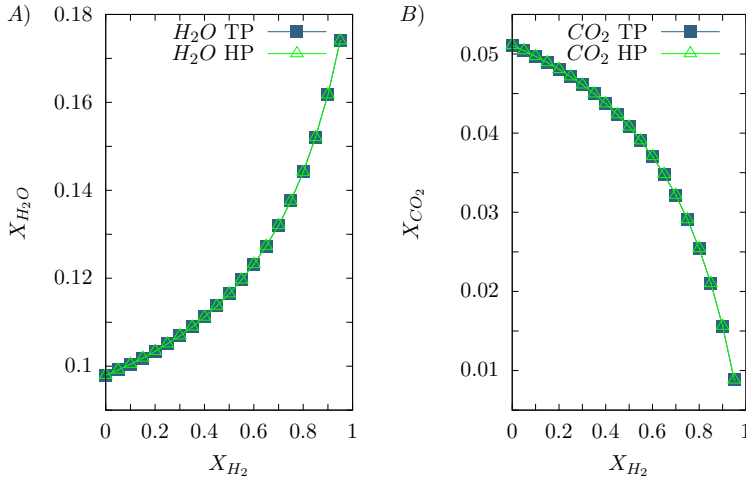


Figura 3.5: A): Fracción molar de H_2O tanto para los casos adiabático y a temperatura constante. B): Fracción molar de CO_2 para los casos adiabático y a temperatura constante. Todos los gráficos son comparando el caso adiabático y el caso a temperatura constante, para $\phi = 0.5$ en función de las distintas fracciones de H_2 .

hidrógeno fomenta la formación de los óxidos de nitrógeno, pero el mecanismo que más influye es el térmico. Para el caso del CO se observa que si bien se tienen resultados similares, para el caso adiabático se observa una caída levemente más pronunciada.

Finalmente, se comparan las emisiones de CH_2O , CH_3CHO y C_3H_6O . Según se observa en las figuras 3.7, 3.8, 3.9, tanto para temperatura constante como para el caso adiabático la tendencia de las tres emisiones contaminantes consideradas a reducirse con el aumento de hidrógeno en la mezcla, siendo siempre superior la fracción de estas especies a temperatura constante que en el sistema adiabático.

3.3.4. Tiempo de Residencia

Se estudia como influye el contenido de hidrógeno de la mezcla en el tiempo de residencia necesario en la zona de combustión para que las reacciones evolucionen hasta un estado final satisfactorio (crecan al equilibrio). Dependiendo del flujo de reactivos y de el volumen que ocupa la reacción de combustión, el tiempo de residencia permitirá que las distintas reacciones se desarrollan en mayor o menor medida.

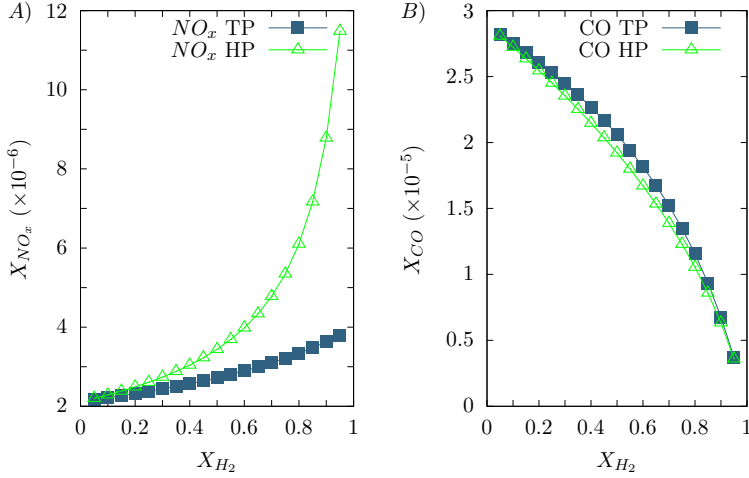


Figura 3.6: A): Fracción molar de NO_x tanto para los casos adiabático y a temperatura constante. B): Fracción molar de CO para los casos adiabático y a temperatura constante. Todos los gráficos son comparando el caso adiabático y el caso a temperatura constante, para $\phi = 0.5$ en función de las distintas fracciones de hidrógeno.

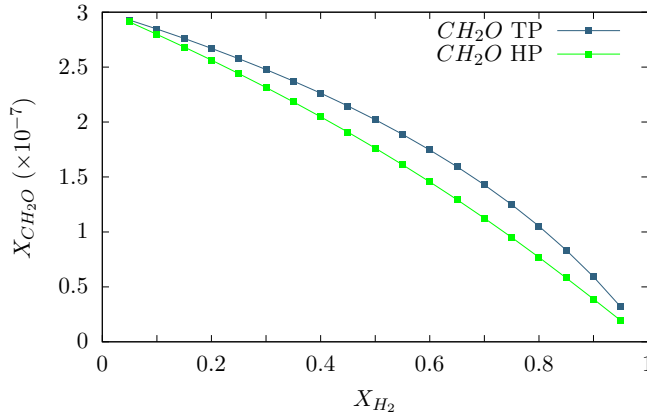


Figura 3.7: Fracción molar de CH_2O en función de la fracción de H_2 en mezcla. Se muestran los casos adiabático y a temperatura constante para $\phi = 0.5$

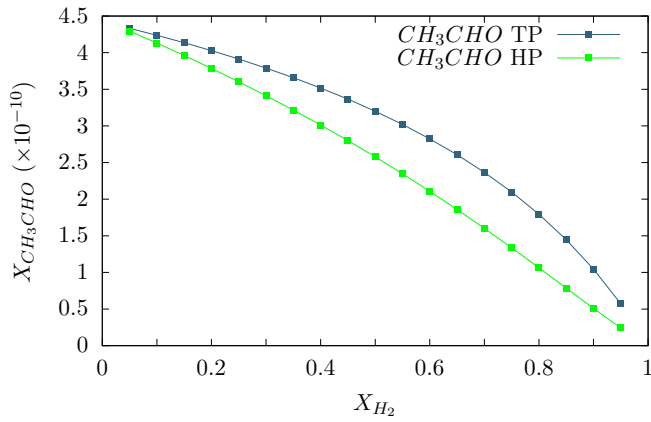


Figura 3.8: Fracción molar de CH_3CHO en función de la fracción de H_2 en mezcla. Se muestran los casos adiabático y a temperatura constante para $\phi = 0.5$

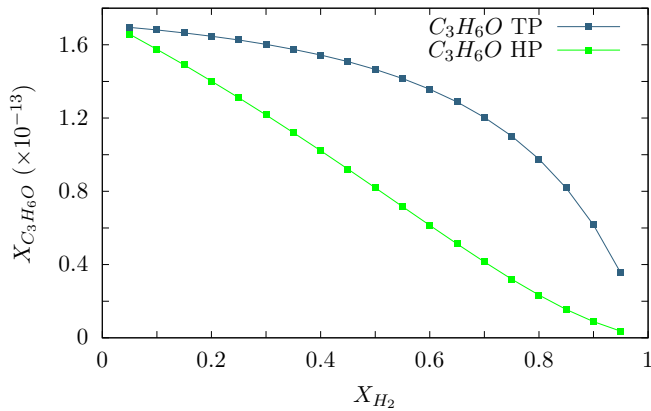


Figura 3.9: Fracción molar de C_3H_6O en función de la fracción de H_2 en mezcla. Se muestran los casos adiabático y a temperatura constante para $\phi = 0.5$

Se espera que a tiempos de residencia cortos, dicho conjunto de reacciones no llegan a término, por lo que al final se observa una combustión de bajo rendimiento, donde no se llega a liberar toda la energía disponible en el combustible, dado que habrá alto contenido de productos de combustión incompleta.

Por otro lado, cuando el tiempo de residencia es muy alto, se espera que todas las reacciones se terminen, y el sistema alcance el estado de equilibrio químico, donde ya no se observen nuevos aumentos de temperatura, o cambios en las concentraciones de especies. Esto sucede porque todas las reacciones reversibles se ven equilibradas (las directas y reversas suceden a la misma velocidad) y no se observan cambios macroscópicos en el sistema.

Es de esperarse que haya un valor específico para el tiempo de residencia característico (τ), en el cual la mayoría de las reacciones se completan, por lo que el sistema se encuentra en un estado próximo al que se alcanza en el equilibrio. En este trabajo, se entiende que el sistema llega a dicho estado una vez que la concentración molar de la especie dióxido de carbono [CO_2] es el 99 % de la que se tiene en el equilibrio químico.

La razón para considerar dicho criterio radica en que las reacciones involucradas en la combustión se pueden clasificar en tres clases; de iniciación, propagación y finalización. Es en este último paso que se forma el dióxido de carbono, por lo que cuando se alcanza el 99 % de la composición en el equilibrio, se puede considerar que la mayoría de reacciones o rutas que llevan a obtener dicha especie como producto llegan a finalizarse, luego de esto, aumentar más el tiempo de residencia no produciría grandes cambios en las mediciones realizadas, donde en el caso extremo los cambios no serían perceptibles o medibles.

En la figura 3.10 se presentan los resultados del tiempo de residencia característico (τ) en función de la fracción de hidrógeno en la mezcla. Se observa que al aumentar la fracción de H_2 en mezcla, el tiempo de residencia necesario tiende a reducirse. La explicación para el comportamiento observado se corresponde con que el hidrógeno tiende a aumentar la velocidad de llama laminar de la reacción, lo cual se encuentra relacionado con una tasa de reacción más acelerada, por lo tanto se necesita menos tiempo para alcanzar el estado cercano al de equilibrio. En la sección 3.4 se aborda con mayor profundidad el cambio de la velocidad de llama laminar al variar el hidrógeno en la mezcla.

3.4. Velocidad de llama laminar

La llama es el lugar geométrico del espacio donde se producen las distintas reacciones químicas que involucra el proceso de combustión. Las llamas verifican ser auto-sustentables, por lo que la energía liberada es suficiente para que

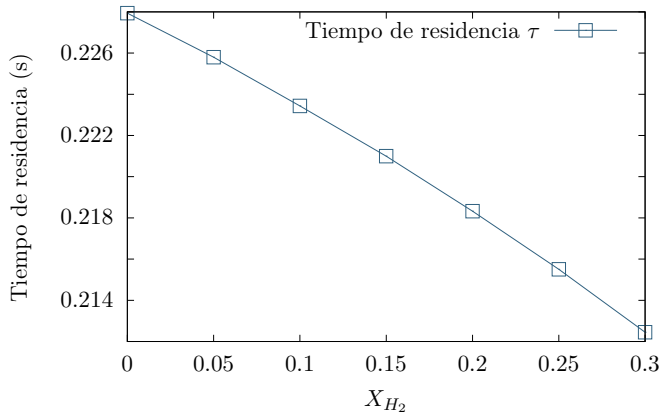


Figura 3.10: Tiempo de residencia característico (τ) para el cual se alcanza el 99 % de la composición de CO_2 en el equilibrio químico, como función de la fracción de hidrógeno.

los reactivos sin quemar, alcancen la energía de activación necesaria [53].

En un sistema hidrostático, el frente de llama se propaga en dirección a los reactivos y la velocidad a la que avanza se denomina “velocidad de llama laminar”, denotada como S_L .

La velocidad de la llama laminar depende del combustible, comburente, la relación entre ambos, así como la temperatura de los reactivos, su presión y la presencia de inertes en la mezcla [53]. El hidrógeno en la mezcla suele afectar el comportamiento de la llama, así como su velocidad, por lo que es de interés caracterizar las velocidades teóricas para distintas mezclas de gas natural e hidrógeno.

Para estudiar la velocidad de llama, se implementa una simulación en Cantera [45]. El código utilizado para los cálculos se basa en una representación de una llama adiabática como un objeto unidimensional. Precisamente, para una mezcla de reactivos definida, se crea la llama en un dominio acotado y resuelven todos los parámetros y ecuaciones que gobiernan dicha llama, que se desarrolla en estado estacionario. Se resuelven su perfil de velocidades y temperaturas, así como la distribución de especies a lo largo de la misma. Este proceso se da de forma iterativa hasta que se llega a una solución que converja en el dominio y concuerde con el nivel refinamiento impuesto.

Se utiliza el mecanismo detallado de reacción GRI-Mech 3.0 [54], ya que según detalla Luo [55], al compararlo con otros mecanismos detallados se obtienen resultados que se ajustan mejor a los ensayos experimentales. Se simula

la llama unidimensional, adiabática y en estado estacionario. Variando el porcentaje en mezcla de hidrógeno se obtienen las distintas velocidades de llama para condiciones de presión atmosférica y temperatura de reactivos de 300K. En la figura 3.11 se presentan los resultados obtenidos al variar la fracción de hidrógeno en el combustible y la riqueza.

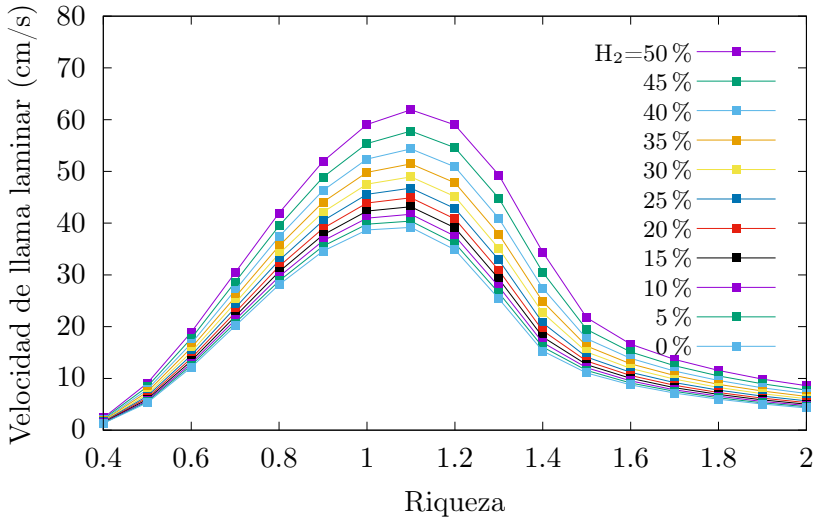


Figura 3.11: Gráfico de la velocidad de llama laminar en función de razón de equivalencia y fracción de hidrógeno. Se muestran curvas para las distintas fracciones de hidrógeno.

Se puede observar que la velocidad de llama es altamente sensible a la variación de estos parámetros. Se puede ver que para cualquier relación de riqueza, la adición de hidrógeno incrementa la velocidad de llama laminar. En particular, próximo al estequiométrico ($\phi = 1$), el agregado de hidrógeno influencia en gran medida las velocidades de llama, haciendo notar que para fracciones próximas al 50 %, las velocidades son próximas al doble de la velocidad del gas de referencia (0 % H_2). Por otro lado, cuanto menor es la riqueza de combustible en la mezcla, menor es la influencia del hidrógeno, en términos absolutos. La razón del fenómeno observado es que como el comburente es aire, cuando el exceso es grande, gran parte del volumen de gas es nitrógeno, el cual si bien reacciona para dar lugar a los ya comentados NO_X , en gran medida permanece como un inerte, que como ya se destacó anteriormente, impide el crecimiento del frente de llama, de modo que efectivamente lo frena. Nuevamente, Luo observa el mismo efecto en mezclas de metano, para $\phi < 1$ [53, 55]. Sobre

esto último se debe destacar que los mismos autores del mecanismo de reacción advierten que en condiciones de altos excesos, se tiende a sobre estimar el valor de la velocidad de llama, por lo que se esperan valores aún menores a los observados [54].

3.5. Intercambiabilidad de GN con mezclas de GN-H2

3.5.1. Variación de ϕ con la adición de hidrógeno

En esta sección se propone estudiar cómo se ve afectada la razón de equivalencia (ϕ) de un quemador atmosférico de tipo bunsen (ver Figura 3.12), al agregar hidrógeno a la composición combustible. Una forma de definir la razón de equivalencia, ϕ puede ser según la ecuación 3.7.

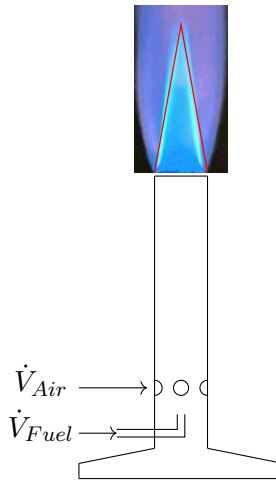


Figura 3.12: Esquema del frente de llama en un mechero Bunsen.

$$\phi = \frac{\dot{V}_{Fuel}}{\dot{V}_{Air}} (4.76\alpha_q) \quad (3.7)$$

Donde el $\dot{V}_{Fuel}/\dot{V}_{Air}$ refiere a la razón entre los caudales volumétricos de combustible y aire, mientras que α_q representa la cantidad mínima de moles de O_2 , por cada mol de combustible, necesarios para obtener combustión completa (condición estequiométrica) y 4.76 corresponde a la relación de moles de aire por cada mol de O_2 .

El flujo volumétrico a través de un orificio depende principalmente de la presión de suministro, del fluido en escurrimiento, y finalmente de la geometría del puerto de salida. La expresión 3.8 presenta la relación entre las anteriores variables.

$$\dot{V}_{Fuel} = K_1 C_d D^2 \frac{\sqrt{P_{man}}}{G} \quad (3.8)$$

Donde C_d es el coeficiente de descarga por el orificio, D es el diámetro de salida, P_{man} es la presión manométrica del flujo, G es la densidad relativa frente al aire, por último, K_1 es una constante. Admitiendo que la presión de suministro de combustible, así como el coeficiente de descarga y el diámetro del orificio son magnitudes constantes por ser un aspecto constructivo del sistema, se tendrá que al variar la composición de combustible lo único que dará lugar a variaciones en el flujo volumétrico es el valor de la densidad relativa.

Además, se tendrá que si bien el flujo volumétrico de combustible cambia, la cantidad de movimiento de dicho caudal permanecerá aproximadamente constante según describe de Vries et al. [8]

La premezcla de combustible y aire se genera mediante el uso de una contracción, donde por efecto venturi se acelera el flujo de combustible, provocando que se succione aire por los orificios (ver Figura 3.12). Por lo anteriormente planteado, el caudal de aire que participa en la premezcla también permanecerá constante, por lo que en la ecuación 3.7, se tiene que $\dot{V}_{Air}$ es constante.

Al aumentar la fracción de hidrógeno, cambia el flujo de combustible, además cambia la relación combustible aire estequiométrica, pero como el aire de premezcla permanece constante, resulta en un cambio de la razón de equivalencia del quemador.

Dado una condición inicial de razón de equivalencia inicial, ϕ_0 , se evalúa como cambia la razón de equivalencia al adicionar hidrógeno. Si se considera un valor inicial de riqueza, ϕ_0 , y un caudal de combustible inicial, la cantidad de aire arrastrada en el venturi será constante independientemente de la variación en la composición del combustible. A partir de la ecuación 3.7 se sabe que al variar la fracción de hidrógeno en la mezcla, el valor de α_q será función de la cantidad de hidrógeno en el combustible, $\alpha_q = \alpha_q(X_{H_2})$.

Además usando la proporcionalidad del flujo de combustible al inverso de la raíz de los cocientes de densidades relativas al aire, se reescribe la siguiente relación

$$\phi = \frac{\dot{V}_{fuel,0}}{\dot{V}_{air,0}} \cdot \sqrt{\frac{G_0}{G}} \cdot 4.76 \cdot \alpha_q(X_{H_2}) \quad (3.9)$$

Recordando que cuando se fija la razón de equivalencia inicial, se fijó $\dot{V}_{air,0}$, se puede sustituir este en función de las condiciones iniciales. Además, considerando el modelo de gas ideal, y que el combustible original, así como el que tiene hidrógeno, se inyectan al quemador bajo las mismas condiciones, se obtiene la ecuación 3.10.

$$\phi = \phi_0 \cdot \frac{\alpha_q(X_{H_2})}{\alpha_{q,0}} \cdot \sqrt{\frac{PM_0}{PM}} \quad (3.10)$$

Donde PM hace referencia al peso molecular de la mezcla de gas combustible y el subíndice 0 a la condición inicial. Además, si se plantea la diferencia del nuevo ϕ y el original según $\Delta\phi = \phi - \phi_0$ se obtiene la ecuación 3.11.

$$\Delta\phi = \phi_0 \left(\frac{\alpha_q(X_{H_2})}{\alpha_{q,0}} \cdot \sqrt{\frac{PM_0}{PM}} - 1 \right) \quad (3.11)$$

En la figura 3.13 se muestran los resultados de aplicar el anterior desarrollo a la mezcla de gas natural “promedio” para tres razones de equivalencia iniciales, 0.75, 1.0 y 1.25 respectivamente.

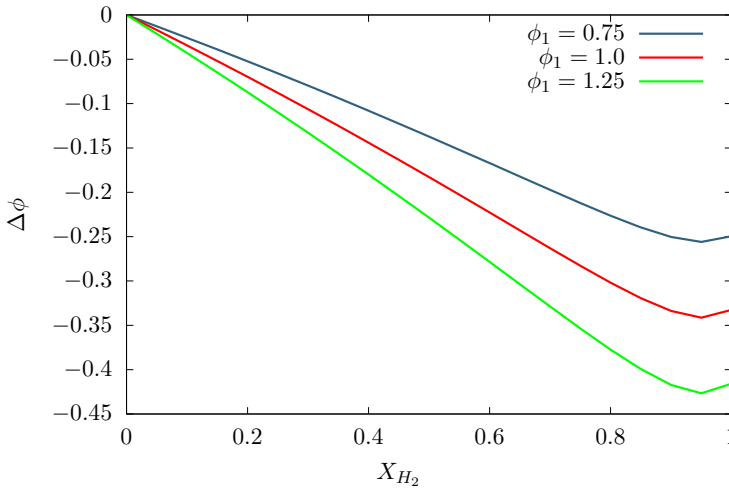


Figura 3.13: Variación de la razón de equivalencia en la premezcla combustible-aire, cuando se agrega hidrógeno, manteniendo geometría y regulación del equipo quemador

Se observa que independientemente de la razón de equivalencia inicial, la adición de hidrógeno genera una reducción en dicho parámetro. Es decir que al

adicionar hidrógeno, el exceso tiene a aumentar, lo cual resulta lógico dado que al sustituir volumen de gas natural por hidrógeno, cada vez se necesita menos aire, pero como se mencionó anteriormente, la disponibilidad y suministro de aire se mantienen, por lo que la quema tiende hacia los excesos positivos de aire cuando se adiciona hidrógeno.

3.5.2. Intercambiabilidad respecto a índices

El análisis teórico de la intercambiabilidad de las distintas mezclas combustibles se hace mediante la comparación con los índices de Wobbe, y de Weaver, particularmente, por los indicadores de Flashback (J_F), Lifting (J_L) y de combustión incompleta (J_I). Según Weaver [44], dos gases son exactamente intercambiables si sucede que sin emplear modificaciones físicas en el quemador, luego de sustituir el gas, no se logra ver o medir cambios al momento de la operación.

Índice de Wobbe, W_b

El índice de Wobbe es un parámetro que ayuda a medir la intercambiabilidad de gases, con respecto al caudal calorífico que estos aportan. Si al mantener intacta la configuración del quemador, particularmente los orificios de salida o inyección, y la presión del suministro, dos gases serán intercambiables cuando su índice de Wobbe sea igual, ya que para un caudal fijo, aportarían la misma energía.

Según Wobbe, el caudal calorífico es proporcional al producto del poder calorífico superior del gas (PCS) y su caudal volumétrico, donde este último es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad relativa del gas, frente al aire. Con esto, se define el índice de Wobbe de la siguiente forma:

$$W_b = \frac{PCS}{\sqrt{G}} \quad (3.12)$$

Conociendo la composición volumétrica del gas natural a lo largo del año, según se explicitó en la sección 3.2, e identificadas las composiciones volumétricas que dan lugar al valor del índice de Wobbe promedio, mínimo y máximo, se calculó la variación del índice de Wobbe al generar mezclas de gas natural con hidrógeno. Los resultados de la variación del índice de Wobbe con el aumento del H_2 se presentan en la figura 3.14. El índice de Wobbe presenta un comportamiento casi parabólico en función del aumento de H_2 en la mezcla, con un mínimo aproximadamente en 80 % de H_2 . Resultados similares también son presentados por de Vries et al [8]. Para la rama izquierda de las curvas,

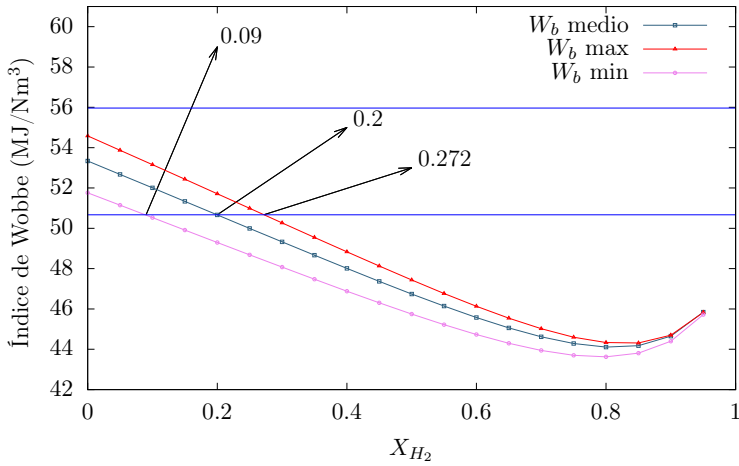


Figura 3.14: Índice de Wobbe en función de la fracción molar de hidrógeno (X_{H_2}). Se muestran las curvas para las composiciones con los poderes caloríficos promedio (gris), mínimo (rosa) y máxima (rojo). Adicionalmente se tienen las líneas azules horizontales, que buscan delimitar la región útil donde el índice de Wobbe aumenta y disminuye un 5 % respecto al promedio, para GN sin H₂. Se asumen condiciones normales de gas a 1 atm y 0°C.

la disminución del W_b se debe a que la mezcla de gases, compuestas por gas natural e hidrógeno, poseen menor capacidad para aportar energía frente al gas natural puro. Esto es razonable pues al agregar hidrógeno en la mezcla, se están sustituyendo moléculas de hidrocarburos y otros por moléculas de hidrógeno, que tienen un poder calorífico volumétrico muy bajo, en comparación con el gas natural. Dicho de otra forma, se necesita un gran volumen para poder equiparar el poder calorífico, o bien muchos moles de hidrógeno, lo cual en la mezcla se ve limitado. Para la rama derecha de la curva, donde W_b aumenta, la causa es que el cociente $\sqrt{G}$ se vuelve menor que la unidad, efecto que pesa más que el valor del PCS disminuya, provocando un aumento en el índice.

Según Ortíz [41], los quemadores industriales así como a nivel doméstico, están preparados para funcionar con gases cuyos índices de Wobbe pueden llegar a variar en un $\pm 5\%$. En el Reino Unido, así como en Estados Unidos, el desvío permitido del índice de Wobbe es de $\pm 4\%$, mientras que la *European Association for the Streamlining of Energy Exchange-Gas (EASEE-gas)* admite una variación de $\pm 7\%$ [42]. En el Reino Unido, de acuerdo con las regulaciones de Gas Safety (Gas Safety (Management) Regulations, GS(M)R), está permitido el uso de gases alternativos con índices de Wobbe en el rango

de 47.20 a 51.41 MJ/Nm³ [42].

Considerando un rango admisible de $\pm 5\%$, se determinó los límites máximos y mínimos de W_b tomando la composición promedio como centro del rango. En la figura 3.14 se incluyen ambos límites. Considerando la composición promedio, el GN admitiría como máximo la adición de 20 % de H_2 en la cual alcanza el límite inferior admisible de W_b . Por otro lado, considerando la composición de GN que al inicio cuenta con el menor el índice de Wobbe, si la adición de H_2 se mantiene por debajo de 9 % el índice de Wobbe permanece con una variación menor a 5 %, es decir, dentro de los límites admisibles. En otro extremo, existen composiciones de GN para las cuales se admiten una adición de hasta 27 % de H_2 para alcanzar el límite inferior admisible de variación de W_b . Para ninguna de las composiciones tratadas el límite superior de un aumento de 5 % del índice es alcanzado, por lo que este caso no resulta problemático o de interés, en lo que respecta a este análisis (pueden haber otros factores que afecten negativamente el comportamiento de la llama en estas condiciones).

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que en Uruguay se utiliza como referencia la norma NAG-602: “Especificaciones de calidad para el transporte y la distribución de gas natural y otros gases análogos” redactada por ENARGAS (Ente Nacional Regulador del Gas) de la República Argentina. En esta norma se establecen límites para el valor del índice de Wobbe, para que el gas a distribuir se encuentre dentro de los estándares de calidad. Se propone un intervalo de valores del índice de Wobbe entre 49.9-56.1 MJ/Nm³ (o bien 47.30-53.20 MJ/Sm³). Considerando estos valores, añadiendo hasta 25 % en promedio, se está dentro de los estándares de calidad propuestos por la norma.

Análisis estadístico del índice de Wobbe.

Haciendo uso de una serie de datos de composición y poder calorífico que abarca los años 2021, 2022 y 2023 se calculó el índice de Wobbe diario, con el objetivo de estimar la distribución de probabilidad, ver figura 3.15. A partir de los datos estadísticos se puede determinar un valor “crítico”, donde no se esperan eventos con valores de W_b menores a una frecuencia establecida.

Particularmente si se establece el criterio en el que no se esperen más de 2 eventos al año con un índice de Wobbe menor al valor crítico, se determina, con un 99.5 % de confianza, que este valor es, $W_{b_{cr}} = 52172 \text{ kJ/m}^3$. Dicho de otra forma, a partir de los datos estadísticos de W_b , solamente dos días al año se puede esperar tener valores de $W_b < 52172 \text{ kJ/m}^3$, en el gas natural suministrado.

Si a partir de $W_{b_{cr}}$ se estima el cambio que sufre W_b al agregar H_2 , se puede

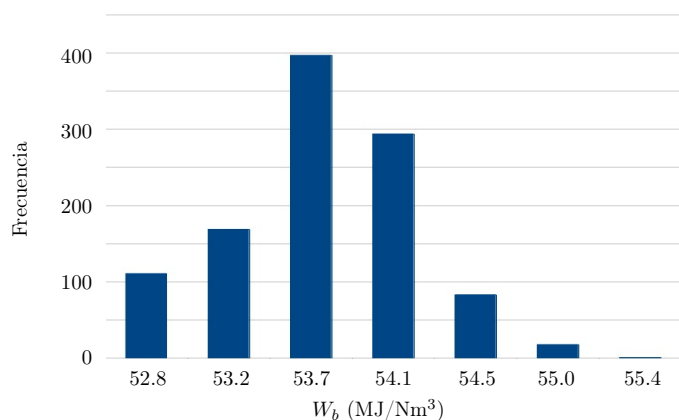


Figura 3.15: Histograma de W_b , obtenido a partir de series diarias de los años 2021 al 2023.

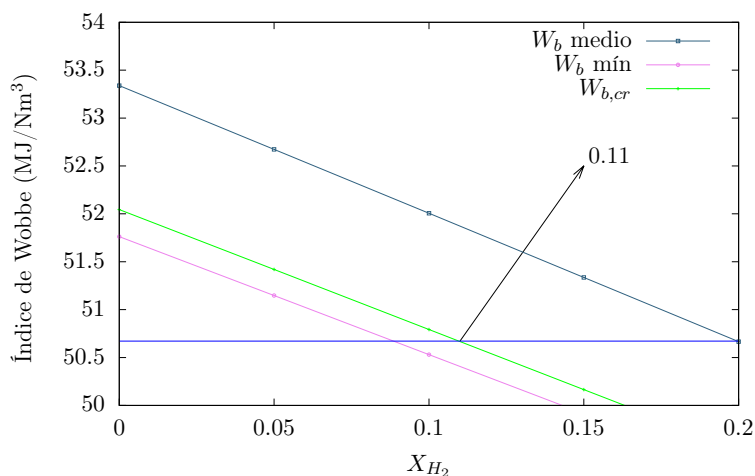


Figura 3.16: Índice de Wobbe en función de la fracción molar de hidrógeno (X_{H_2}). Se muestran las curvas para las composiciones con los poderes caloríficos promedio (gris), mínimo (rosa) y crítico (verde). Adicionalmente se presenta una línea azul horizontal, que delimita el mínimo índice de Wobbe admisible, según el criterio de Ortiz [41]. Se asumen condiciones normales de gas a 1 atm y 0°C.

encontrar un límite para la fracción de hidrógeno en 11 %, en el que W_b está fuera del intervalo del 5 % menos del promedio anual del GN sin H_2 (definido

a partir de la sugerencia de Ortiz [41], que permite una variación del orden del 5 % con respecto al promedio). Se muestra el comportamiento de la mezcla y el origen del valor límite en la figura 3.16.

Como ya se mencionó anteriormente, el índice de Wobbe solo mide la capacidad de las mezclas para aportar energía, obviando otros posibles problemas en el funcionamiento del quemador, y que van relacionados con la llama y su comportamiento. En la siguiente sección se estudian entonces los índices de Weaver, que dan respuesta a los distintos problemas que se podrían observar en el estudio de intercambiabilidad de gases combustibles.

Índices de Weaver

Los índices de Weaver son un grupo de índices que ayudan a determinar la intercambiabilidad de gases combustibles, considerando distintos fenómenos asociados a la combustión, como por ejemplo el retroceso o soplado de la llama, la presencia de puntas amarillas o la combustión incompleta [44]. El cálculo de cada índice, según se desarrollará a continuación, dependen del índice de suministro de aire, J_A , el cual relaciona las cantidades de aire estequiométrico necesario para quemar un volumen determinado de combustible para ambos gases en cuestión. El mismo se define según la ecuación 3.13

$$J_A = \frac{A\sqrt{G_a}}{A_a\sqrt{G}} \quad (3.13)$$

Donde el subíndice a se utiliza para referirse a la propiedad del gas original, donde el quemador funciona correctamente. Cuando la misma propiedad no tiene un subíndice, se refiere al gas sustituto. Tanto para este índice, J_A , como el resto de índices de Weaver, se aplica este criterio. En la ecuación 3.13, A hace referencia al mínimo volumen de aire necesario para quemar completamente una unidad de volumen de combustible.

Índice de flashback, J_F

El índice de *flashback* (J_F), o retroceso de llama, mide que tan propensa es una mezcla de gases a ingresar al sistema de combustión, o bien, que la llama avance hacia los reactivos (mezcla sin quemar). A este fenómeno se le suele conocer como calado de la llama. El mismo se calcula según la expresión 3.14.

$$J_F = \frac{S}{S_a} - 1.4J_A + 0.4 \quad (3.14)$$

Donde S es la máxima velocidad de llama laminar de la mezcla, expresada como una fracción de la velocidad de llama del hidrógeno. Su derivación se

tiene a partir de la ecuación 3.15

$$S = \frac{aFa + bFb + \dots}{A + 5Z - 18.8Q + 1} \quad (3.15)$$

Donde $a, b, \dots$, son las fracciones volumétricas de las especies combustibles en el gas. Z es la fracción de inertes en el combustible, Q es el porcentaje de oxígeno en el gas combustible. Los gases son exactamente intercambiables siempre que $J_F = 0$.

Para el cálculo de S , se puede utilizar la correlación presentada por Weaver o bien calcularla de forma teórica, a partir de mecanismos de reacción detallados. En el presente estudio, el cociente de velocidades de llama se calcula utilizando los resultados obtenidos en la sección 3.4. Esta elección se debe a que las correlaciones no necesariamente pueden reproducir todos los efectos físicos al cambiar las mezclas del combustible, en la velocidad de llama laminar, lo que si se puede determinar mediante mecanismos detallados de reacción.

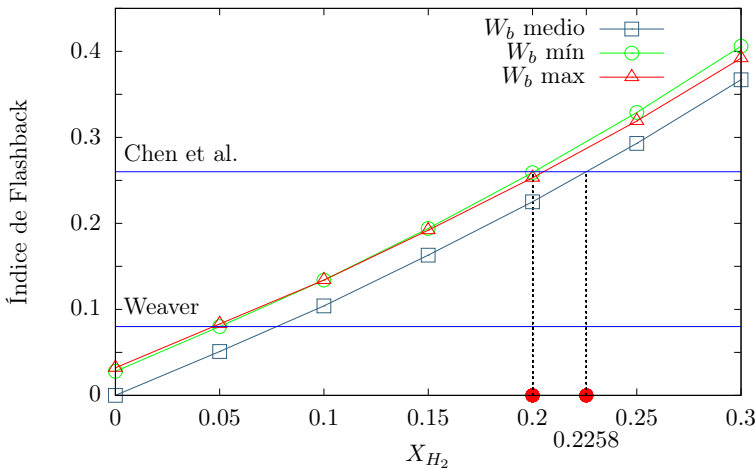


Figura 3.17: Índice de Flashback en función de la fracción molar de hidrógeno.

Al comparar el comportamiento del gas frente a este fenómeno cuando se adiciona hidrógeno se puede notar, en la figura 3.17, que hay un aumento en el índice de *flashback*, por lo que al aumentar el porcentaje de hidrógeno en la mezcla se tiende a formar una llama más propensa al calado, hecho que se relaciona directamente con el aumento de la velocidad de llama laminar. Manteniendo un caudal de alimentación fijo, cuando se aumenta la velocidad de llama, los reactivos pasan a consumirse más rápido, por lo que la llama se estaciona más próxima a la salida del quemador donde entran los reactivos. Si

la velocidad de llama es considerablemente mayor a la velocidad que ingresan los reactivos a la zona de reacción, efectivamente la llama ingresará hacia el quemador.

Tomando como referencia los límites propuestos por Weaver [44] se exige que el índice de *flashback* no supere el valor de 0.08. Bajo este criterio, mezclas con porcentajes mayores al 5 % (para W_b máximo y mínimo), u 8 % de H_2 (para W_b promedio) no serían intercambiables con el gas natural. Esto presenta un límite realmente bajo para la fracción admisible. Como se ve en la figura 3.11, la velocidad de llama se eleva rápidamente por lo que la posibilidad de observar el calado de la llama aumenta. Por otro lado, Chen et al [56]. sugiere un límite mayor, donde $J_F \leq 0.26$, lo que aumenta el valor de la fracción de hidrógeno admisible. En la figura 3.17 también se muestra el índice de *flashback* calculado para las composiciones de Wobbe máximo, mínimo y promedio (para diferentes fracciones de hidrógeno). Se puede observar que al utilizar el criterio de Chen, las mezclas con fracciones de hidrógeno menores a 20 % tienen un índice de *flashback* inferior al máximo admitido y no se esperaría un calado de la llama.

Es importante destacar que el análisis de los índices de Weaver considera proporciones estequiométricas, ya que todos los índices dependen de J_A y este depende de A , que se define como la mínima cantidad de aire necesaria para una combustión completa. Recordando lo tratado en la sección 3.4, se observó que para razones de equivalencia alejadas de la unidad, la velocidad de llama baja, para todas las fracciones de hidrógeno. Sin embargo la velocidad de llama aumentaba con la adición de hidrógeno, resulta razonable esperar que la fracción de hidrógeno admisible aumente, ya que el cambio en el valor de la velocidad resulta más moderado.

Índice de *lifting*, J_L

El índice de *lifting* (J_L) mide que tan probable es que la llama se desprenda del quemador, generando incluso la posibilidad de que haya “*blow-off*” o soplado. Resulta crítico que esto no ocurra, ya que algunos equipos antiguos no tienen detectores de llama y en el caso de que la llama se extinga, cuando el suministro de gas no se interrumpe se libera hacia el ambiente, pudiéndose generar una mezcla reactiva, y bajo las condiciones adecuadas puede reaccionar. En la ecuación 3.16 se describe el cálculo de J_L .

$$J_L = J_A \frac{S(100 - Q)}{\bar{S}_a(100 - Q_a)} \quad (3.16)$$

Donde el cociente de velocidades se calcula del mismo modo que para el índice de flashback. La condición necesaria para que dos gases sean exactamente

intercambiables es que se verifique que $J_L = 1$.

En la figura 3.18 se presentan los resultados de J_L en función del porcentaje de H_2 en la mezcla de gases combustibles. Se puede observar que este índice es creciente con el aumento de la fracción de hidrógeno. Es importante tener en cuenta para la lectura del índice de *lifting* que el soplado se da para valores del índice cae por debajo de la unidad. Es por esto que al aumentar la fracción de hidrógeno en la mezcla, la misma disminuye su tendencia a desprenderse del quemador, lo cual es razonable con el hecho de que una mezcla no puede ser propensa presentar *flashback* y *lifting* simultáneamente ya que son fenómenos de naturaleza opuestas.

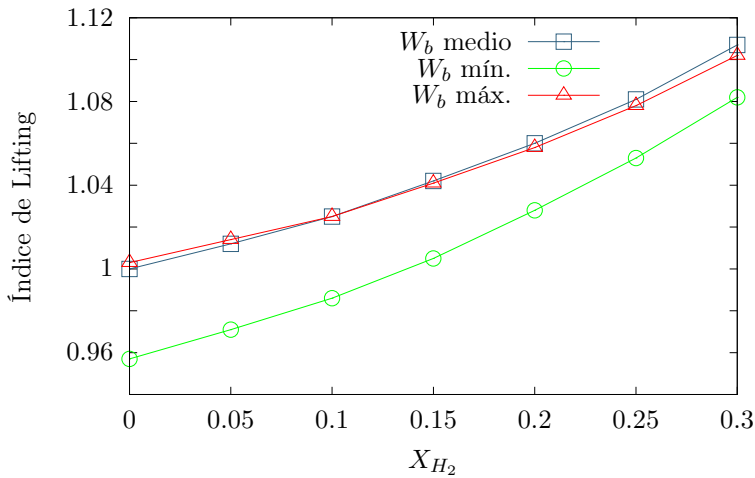


Figura 3.18: Índice de *Lifting* en función de la fracción molar de hidrógeno.

Utilizando el límite propuesto por Weaver, se debe verificar que J_L debe ser mayor que 0.64. Dado que la tendencia del índice es creciente, por lo que todas las mezclas son intercambiables en lo que a este criterio respecta. Nuevamente, el *lifting* se presenta en llamas cuya combustión es lenta, por lo que el flujo de reactivos puede barrer la llama. Dado que para las mezclas estudiadas la velocidad de llama aumenta, el *lifting* no será observable y no es un fenómeno relevante para la aplicación en estudio.

Índice de combustión incompleta, J_I

El índice de combustión incompleta es una expresión que busca comparar la tendencia relativa entre gases, para liberar monóxido de carbono como producto de combustión incompleta. Es altamente importante limitar el valor

de estas emisiones ya que el mismo es nocivo para la salud humana. En la ecuación 3.17, se presenta el cálculo de J_I .

$$J_I = J_A - 0.366 \frac{R}{R_a} - 0.634 \quad (3.17)$$

Donde R hace referencia al cociente entre el número de átomos de hidrógeno, en todas sus formas en el combustible, y los átomos de carbono presentes en el mismo combustible. Cuando dos gases son perfectamente intercambiables respecto a este criterio, sucede que $J_I = 0$.

Partiendo de la composición media del gas natural, la adición de hidrógeno genera una disminución de este índice, según se aprecia en la figura 3.19, por lo que se entiende que la combustión mejora, siendo entonces más completa. Comparando directamente con lo visto hasta ahora, se entiende que esto es correcto; ya que al sustituir parte del combustible por hidrógeno, hay menos carbono por volumen que puede generar CO , y a su vez, como ya se mencionó, los radicales libres que se forman y ven fomentados al agregar H_2 , reaccionan fácilmente con el CO , por lo que al final la cantidad observada disminuye.

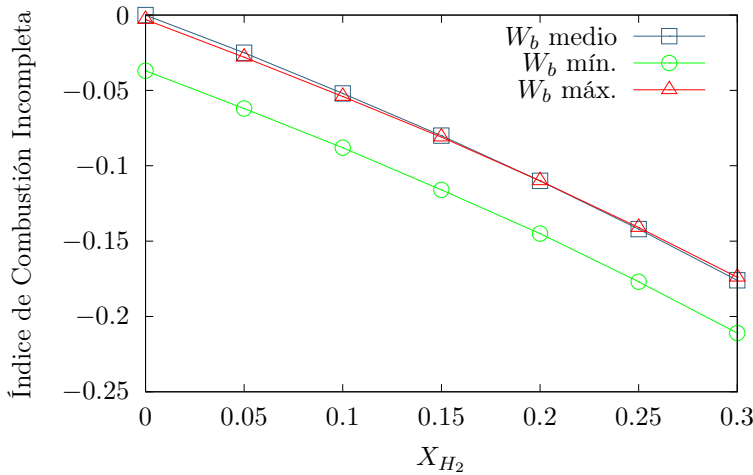


Figura 3.19: Índice de Combustión Incompleta en función de la fracción molar de hidrógeno.

Índice de puntas amarillas.

El índice de puntas amarillas pretende estudiar la tendencia que tiene el gas sustituto a mostrar puntas amarillas al momento de quemar. Este fenómeno se ve fuertemente asociado con el índice de combustión incompleta. Cuando la

mezcla tiene tendencia a quemarse de forma incompleta, es posible que se forme un aglomerado de partículas de carbono (conocido como hollín), que llega a quemarse cerca de los extremos de la llama, donde el mecanismo de oxidación es por difusión, por lo que se observa ese característico color amarillento. El índice que caracteriza la tendencia relativa frente a este fenómeno se calcula mediante la ecuación 3.18

$$J_Y = J_A - 1 + \frac{N - N_a}{110} \quad (3.18)$$

Donde N es el número de átomos de carbono fácilmente liberados cada cien moléculas de hidrocarburos saturados, tales como CH_4 , C_2H_6 y C_3H_8 entre otros. Se entiende que por cada molécula de hidrocarburo saturado, solamente un átomo es fácilmente liberado [44, 57]. Nuevamente, el subíndice a hace referencia al parámetro calculado para el gas de referencia (gas natural original), mientras que el sin subíndice se hace referencia al gas sustituto.

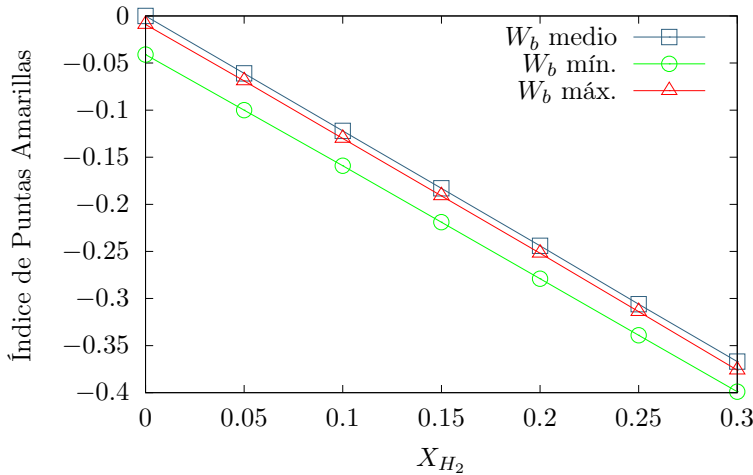


Figura 3.20: Índice de Puntas Amarillas en función de la fracción molar de hidrógeno.

En la figura 3.20 se observa que al aumentar la fracción de hidrógeno, el índice alcanza valores cada vez más negativos, por lo que agregar hidrógeno disminuye las posibilidades de observar puntas amarillas, si se compara con el gas original. Esto está de acuerdo con lo presentado hasta el momento, ya que al agregar hidrógeno se están sustituyendo átomos de carbono por átomos de hidrógeno y disminuyen las fracciones de hidrocarburos saturados. Más aún, el

hidrógeno fomenta la formación de radicales OH , los cuáles colaboran en gran medida en la oxidación del hollín [58].

3.6. Modelado numérico detallado de la combustión de $\text{GN} + \text{H}_2$

En esta sección se presenta el estudio de simulaciones computacionales que tienen en cuenta la Dinámica de los Fluidos Reactivos (comúnmente llamados CFD por sus siglas en inglés, Computational Fluid Dynamics). En particular se utiliza el software Ansys Fluent [59], que cuenta con modelos para simular flujos reactivos, en este estudio se trabajó con un modelo de Partially-Premixed Combustion o Combustión de Premezcla Parcial (*PPC*), por la naturaleza del fenómeno de combustión que se propone evaluar. Bajo la selección de este modelo que simula las interacciones y reacciones químicas, se implementa el modelo $k - \epsilon$ para contemplar la turbulencia de los flujos, y sus respectivos efectos.

Se validan los resultados del modelo comparando con el estudio de Bennett et al. [60]. Con el modelo validado, se estudia el comportamiento de distintas mezclas de gas natural e hidrógeno, con el objetivo de caracterizar los efectos en términos de la naturaleza físico-química de la combustión y su interacción con el flujo de gases combustibles.

A continuación se presenta una síntesis de la teoría que constituye los modelos utilizados. Todos los conceptos son recopilados a partir de la Guía de teoría de Ansys Fluent [61]

Partially-Premixed Combustion

Este modelo permite simular flujos reactivos que en el caso general, consisten en dos entradas; una con una mezcla de combustible y oxidante en condiciones de riqueza $\phi \geq 1$, mientras tanto, la otra entrada consiste en oxidante puro, pudiendo ser las opciones aire u oxígeno puro. Las entradas de oxidante se le denominan primario y secundario, respectivamente.

En general, las mezclas no son uniformes, por lo que no resulta conveniente usar la razón de equivalencia, ϕ , para caracterizar las mezclas locales, en cambio se utiliza la fracción de mezcla. La fracción de mezcla, f , que es un escalar conservativo definido según la ecuación 3.19

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (3.19)$$

Donde el término Z_i denota la fracción másica de la i -ésima especie, los subíndices ox y $fuel$, hacen referencia a la fracción másica, en las condiciones de entrada del oxidante y combustible, respectivamente.

Si se asume que el coeficiente de difusividad es igual para todas las especies, se tiene que la ecuación resulta idéntica para todas las especies, por lo que la fracción de mezcla es igual y puede redefinirse según la ecuación 3.20.

$$f = \frac{\text{masa en la entrada de combustible}}{\text{masa de la mezcla}} \quad (3.20)$$

Dicha consideración resulta válida para los flujos turbulentos, ya que la convección de masa, o la componente turbulenta de la difusión resulta mucho mayor que la difusión molecular, igualando la difusividad para todas las especies¹.

Bajo esta hipótesis, las ecuaciones de conservación de especies se reducen a la ecuación de la fracción de mezcla considerando el promedio ponderado por la masa, conocido como promedio de Favre 3.21.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left[\left(\frac{k}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla \bar{f} \right] + S_m + S_{user} \quad (3.21)$$

Donde k es la conductividad térmica de la mezcla, C_p es el calor específico de la mezcla, σ_t es el número de Prandtl y μ_t es la viscosidad turbulenta. El término S_m , hace referencia a la transferencia de masa desde partículas reactivas o bien gotas de combustible líquido, hacia la fase gaseosa. Finalmente S_{user} es una fuente adicional que eventualmente se podría considerar en caso de tener otro aporte externo de masa. En este estudio los últimos dos términos son nulos.

También se resuelve la ecuación de conservación para la varianza de la fracción de mezcla, $\bar{f'^2}$, escrita según 3.22

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f'^2}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f'^2}) = \nabla \cdot \left(\left(\frac{k}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla \bar{f'^2} \right) + C_g \mu_t (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\epsilon}{k} \bar{f'^2} + S_{user} \quad (3.22)$$

En la cual $f' = f - \bar{f}$, y los valores estándar para σ_t , C_g y C_d son 0.85, 2.86 y 2.0 respectivamente.

¹En general cuando la turbulencia es alta, el efecto difusivo es bajo, sin embargo cuando las fracciones de H_2 son elevadas en la mezcla, es necesario considerar una difusión diferencial, debido a que su coeficiente de difusión es considerablemente más alto que las otras especies.

Junto a estas ecuaciones, la interacción entre la turbulencia y la química del sistema se resuelve mediante el uso de una función de densidad de probabilidad o PDF (por sus siglas en inglés, Probability Density Function).

Probability Density Function. Una PDF se puede interpretar como la fracción de tiempo que un fluido se encuentra en un estado f , o en su cercanía. En la figura 3.21, al observar a mano derecha se ve un gráfico de f en función del tiempo, en el cual se observa que durante una cierta fracción de tiempo, las oscilaciones se tienen comprendidas en un rango Δf . Luego, mano izquierda se grafica $p(f)$, que es la misma PDF. El gráfico es tal que el área bajo la curva en el rango Δf se corresponde con la fracción de tiempo que f ocupa dicho intervalo. Esto se puede escribir según la ecuación 3.23

$$p(f)\Delta f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_i \tau_i \quad (3.23)$$

Donde T es la escala de tiempo considerada, τ_i es la fracción de tiempo que f está en el rango Δf .

En el caso general, la forma de la PDF es desconocida y depende de la turbulencia y como ésta fluctúa, por esto, su forma se aproxima haciendo uso de datos experimentales.

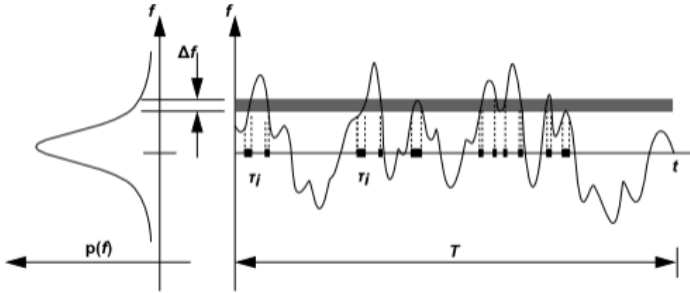


Figura 3.21: Descripción gráfica de una función de densidad de probabilidad. Adaptado de [61]

El valor de distintos escalares ϕ_i en función de la fracción de mezcla, cuando el sistema es no adiabático, se realiza para valores medios según la ecuación 3.24

$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 \phi_i(f, \bar{H}) p(f) df \quad (3.24)$$

En esta última ecuación aparece la entalpía del sistema H , esto es porque como el sistema no es adiabático, la pérdida de energía al exterior del sistema implica cambios en la temperatura respecto al caso adiabático, por lo que se deben esperar cambios en la composición de la mezcla y por lo tanto, en los valores de los distintos escalares a calcular. Al tener que introducir la entalpía y su variación, se hace necesario que resolver la ecuación de transporte y conservación de energía, representada en su versión de entalpías mediante la ecuación 3.25.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{H}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{H}) = \nabla \cdot \left(\frac{k_t}{C_p} \nabla \bar{H} \right) + S_h \quad (3.25)$$

Donde el término S_h hace referencia a los términos fuente asociados a la radiación y la transferencia de calor hacia el exterior por la frontera.

Con el objetivo de ahorrar tiempo computacional, Ansys Fluent calcula las integrales en 3.24 para distintas variables, previo a que se realice la simulación, estos resultados los almacena y genera una tabla, la cual se consulta durante el proceso de calculo en la simulación. Para los casos no adiabáticos que se tratan en este estudio, la tabla adquiere una configuración en tres dimensiones como la que se muestra en la figura 3.22, ya que se necesita una tabla para cada valor de entalpía en el sistema. Cada lámina corresponde a los valores de ganancia o pérdida de calor en el sistema. En particular la de más arriba implica la máxima ganancia, y la inferior es la de mayor pérdida; la lámina de perdida o ganancia nula se corresponde con la tabla que se genera en el caso adiabático, donde la entalpía del sistema permanece constante.

Es a partir de estas tablas, que al momento de la simulación se calculan las fracciones másicas, densidades, y temperaturas.

En adición de las tablas de PDF, se utiliza el modelo de Steady-Diffusion Flamelet para simular las reacciones químicas y la estructura de llama.

Steady-diffusion Flamelet. El concepto de flamelet en el modelado computacional, representa una unidad de llama laminar unidimensional simplificada, donde existe un equilibrio químico y térmico. En este modelo un flujo turbulento, puede descomponerse en la combinación de varios flamelets, que coexisten en la mezcla. Estas estructuras se modelan en base a datos experimentales y diferentes cálculos teóricos. Ansys Fluent permite la adición de mecanismos de reacción detallados para modelar los frentes de llama como laminares y difusivos, con flujos de combustible y oxidantes opuestos.

Al trabajar con este modelo y el de premezcla parcial, como se asume una estructura de llama infinitesimalmente fina, se debe determinar su posición en

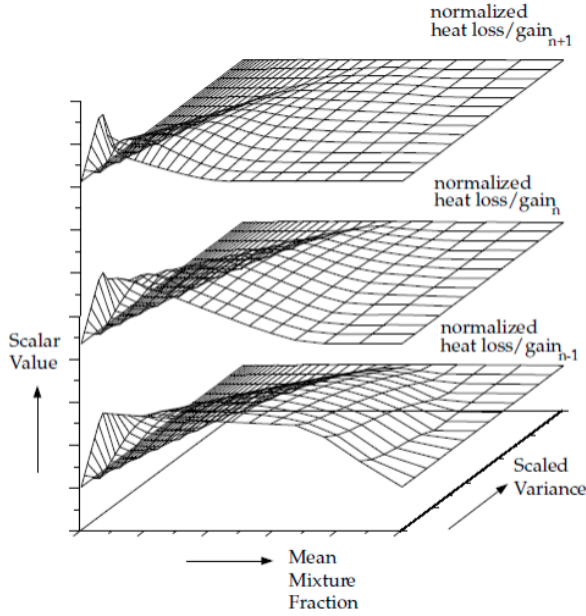


Figura 3.22: Representación visual de la tabla PDF generada para un escalar, como función de la fracción de mezcla, varianza de la fracción de mezcla, y de la ganancia y pérdida de calor normalizada. Adaptada de [61]

el dominio de estudio; para ello se define una variable de progreso de reacción promedio, $\bar{c}$, la cual tomará valores entre 0 y 1, para determinar la posición de la llama. La definición de $\bar{c}$ es una suma normalizada de las fracciones másicas de los productos, por esto, previo a la zona de llama, al haber reactivos, $\bar{c} = 0$, mientras que posterior a la llama, del lado de los productos, $\bar{c} = 1$.

Nuevamente, como la llama es fina y asumida laminar, la misma estará contenida en una zona con un comportamiento turbulento que provocará grandes movimientos o fluctuaciones en su posición; debido a su estructura, la llama será altamente susceptible a deformaciones impuestas por los esfuerzos turbulentos. Bajo estas situaciones, $0 < \bar{c} < 1$, por lo que habrán momentos en los que la llama permanezca más cerca de los reactivos, y momentos en los que estará próxima a los productos.

La ecuación 3.26 permite resolver el transporte de $\bar{c}$ para predecir donde estará la llama y como se comportará.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{c}) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\bar{c}) = \nabla \cdot \left(\left(\frac{k}{C_p} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla \bar{c} \right) + \rho S_c \quad (3.26)$$

Donde Sc_t es el número de Schmidt turbulento y S_c es un término fuente de progreso de reacción; el mismo se puede reescribir como la ecuación 3.27.

$$\rho S_c = \rho_u U_t |\nabla \bar{c}| \quad (3.27)$$

Con ρ_u siendo la densidad de la mezcla sin quemar y U_t la velocidad turbulenta de llama.

Cuando se resuelve la variable de progreso, se pueden calcular los distintos escalares $\bar{\phi}$ mediante una PDF y ponderadas en función de $\bar{c}$ según la ecuación 3.28.

$$\bar{\phi} = \bar{c} \int_0^1 \phi_b(f) p(f) df + (1 - \bar{c}) \int_0^1 \phi_u(f) p(f) df \quad (3.28)$$

Donde los subíndices b y u significan quemado y sin quemar, respectivamente. Se destaca que en el caso de que se tiene una mezcla no adiabática, ϕ_b es una función de la entalpía y la deformación de la llama, y se calcula mediante el equilibrio de una masa f de combustible con una masa $(1 - f)$ de oxidante. Por otro lado, ϕ_u se calcula idénticamente, pero sin que exista reacción química.

Modelado de la turbulencia. Para modelar el flujo turbulento y como este influye en el desarrollo del sistema, se utiliza el modelo $k - \epsilon$ estándar.

Este modelo se basa en dos ecuaciones de transporte que permiten determinar las escalas de longitud y temporales turbulentas. Las ecuaciones 3.29 y 3.30 resuelven la energía cinética turbulenta (k) y su respectiva disipación (ϵ). En la derivación de las ecuaciones, se asume que el flujo es completamente turbulento por lo que la viscosidad molecular es despreciable frente a su contraparte turbulenta.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3.29)$$

Donde G_k es la generación de energía cinética turbulenta debida a los gradientes de velocidad media; G_b es la generación de energía cinética turbulenta debida al empuje; Y_M representa la contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresible, aportado a la tasa media de disipación.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{(\epsilon)^2}{k} + S_\epsilon \quad (3.30)$$

En esta ecuación, $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ y $C_{3\epsilon}$ son constantes, mientras que σ_k y σ_ϵ son los números de Prandtl turbulentos de k y ϵ respectivamente. Por último S_k y S_ϵ son términos fuentes a definir por el usuario.

3.6.1. Validación del método

Dominio de estudio Para comprobar si los modelos propuestos para las simulaciones son adecuados y funcionan correctamente, se utiliza el estudio de Bennett et al. [60] como referencia. En dicho trabajo se propone el estudio de llamas parcialmente premezcladas de metano y aire, con un flujo coaxial de aire. El dominio a simular es el espacio directamente por encima de un mechero Bunsen incluyendo el flujo coaxial mencionado. Al igual que en este trabajo, la simulación se realiza en un dominio axisimétrico. En la figura 3.23 se observa una representación esquemática del dominio considerado.

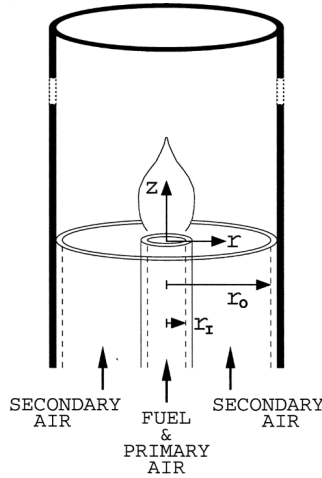


Figura 3.23: Mechero Bunsen a simular. Adaptado de [60]

La región de interés a simular es una zona con simetría de revolución por el eje $r = 0$, z . La misma abarca en su totalidad una región de $r_{max} = 5.10$ cm, $z_{max} = 20.0$ cm. Luego para $z = 0$, la zona comprendida para $r < 0.555$ cm es la salida del mechero, es decir, donde se da la inyección de la premezcla hacia el dominio; en $0.555 \text{ cm} < r < 0.635$ cm se encuentran las paredes del mechero, supuestas adiabáticas; en $0.635 \text{ cm} < r < 4.76$ cm está la zona de inyección de aire secundario.

Se estudia el caso en el que la razón de equivalencia en la inyección de combustible es de $\phi = 2.464$; presentado en detalle en la tabla 3.2.

	ϕ	v_z (cm/s)	Y_{CH_4}	Y_{O_2}	Y_{N_2}	I
Pre-mezcla	2.464	23.71	0.14769	0.23975	0.61256	8.54 %
Aire secundario	0.000	10.48	0.00000	0.232	0.768	7.27 %

Tabla 3.2: Configuración en la entradas de combustible y aire secundario.

Malla utilizada Bennett et al. utilizan un código propio para ajustar el mallado del dominio en función de los gradientes que se desarrollan para distintas variables, buscando afinar el mallado en zonas donde los cambios son grandes, particularmente donde se espera tener la llama.

Es sabido que un mallado más fino conlleva a mejores resultados dado que se es capaz de resolver las ecuaciones en zonas más reducidas, logrando menor pérdida de información y detalle. Dado que un mallado fino viene asociado con un mayor costo de cálculo, se identifican zonas de interés del dominio y se refina la malla, para lograr obtener resultados más precisos, sin aumentar demasiado el tiempo de cómputo. En particular se realiza un mallado similar al propuesto por Bennett et al., pero a falta del código que optimiza el mallado en función de los gradientes de propiedades, se realiza un mallado fino mediante el método de cuerpo de influencia, próximo a la salida del quemador, formando una región 'cónica' alrededor de este. Se realizó la misma simulación variando la densidad de mallado, buscando afinar todo lo posible hasta que los resultados dejaran de variar, asegurando así que los resultados son correctos, y evitando la carga en el sistema, teniendo un proceso de costo computacional moderado.

La malla final se muestra en la figura 3.24. La misma cuenta con un total de 208.847 celdas, 209.386 nodos y 8 particiones.

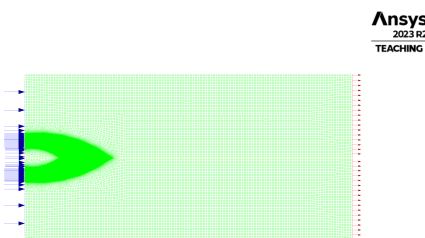


Figura 3.24: Mallado del dominio

Condiciones de borde Las condiciones de borde utilizadas son paredes adiabáticas a menos de la pared que limita el máximo radio del dominio, en

ese caso particular se tomó la condición de una pared isoterma a 400K.

Por otro lado, las entradas se configuran según lo mostrado en la tabla 3.2. Donde la velocidad v_z es la velocidad axial con la que entra la mezcla al dominio, se considera que la velocidad radial v_r y la tangencial, o de swirl v_θ son nulas, y que las magnitudes de entrada son uniformes, totalmente independientes del radio, lo cual no es más que una aproximación, y demostró otorgar los mismos resultados que cuando se supuso el perfil de velocidades desarrollado dentro de un tubo. El parámetro I hace referencia a la intensidad de turbulencia, la cual se calcula según la ecuación 3.31.

$$I = 0.016 Re_{D_H}^{-\frac{1}{8}} \quad (3.31)$$

Un cálculo rápido en la salida de la inyección de la premezcla, y del aire secundario reveló que el número de Froude tomó valores de $Fr_{Premezcla} = 2.18$ y $Fr_{A.S} = 0.13$, por lo que las fuerzas de empuje resultan relevantes en el aire secundario, entonces se simula con la acción gravitatoria y fuerzas de cuerpo activadas, con $\vec{g} = -9.8066\vec{z}$ siendo $\vec{z}$ la dirección del eje z , según se indica en la figura 3.23. Por último, la salida se modeló a presión atmosférica, y con el añadido de que elimine la recirculación de flujo hacia el dominio, evitando la vorticidad a la salida lo cual implica dificultades a la hora de los cálculos.

Seteo del solver En general, se utilizó un método de resolución basado en la presión, con un esquema de dependencia con la velocidad (coupled). El proceso de resolución de cada una de las ecuaciones se llevó a cabo a partir de la discretización espacial de segundo orden upwind, a menos de las ecuaciones de k y ϵ , para las cuales se implementó el método de primer orden.

Resultados y comparación Utilizando estas configuraciones se obtiene un perfil de temperaturas como el mostrado en la figura 3.25

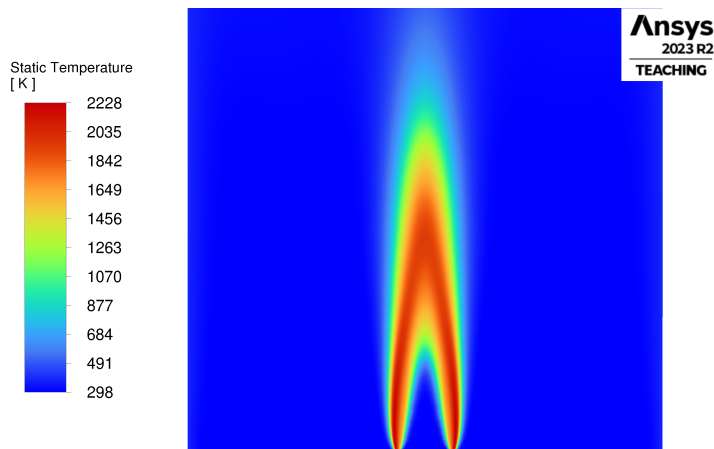


Figura 3.25: Perfil de temperaturas próximo a la región de la llama.

A continuación, se hace una comparación entre variables de interés para caracterizar el funcionamiento del modelo empleado. En las figuras 3.26(A), 3.26(B), 3.26(C), 3.26(D), se muestran los valores alcanzados de las variables de temperatura, velocidad axial, fracción molar de metano y de dióxido de carbono sobre el eje del dominio, tanto para el estudio de comparación, como para los resultados obtenidos bajo la implementación de los modelos anteriormente descritos.

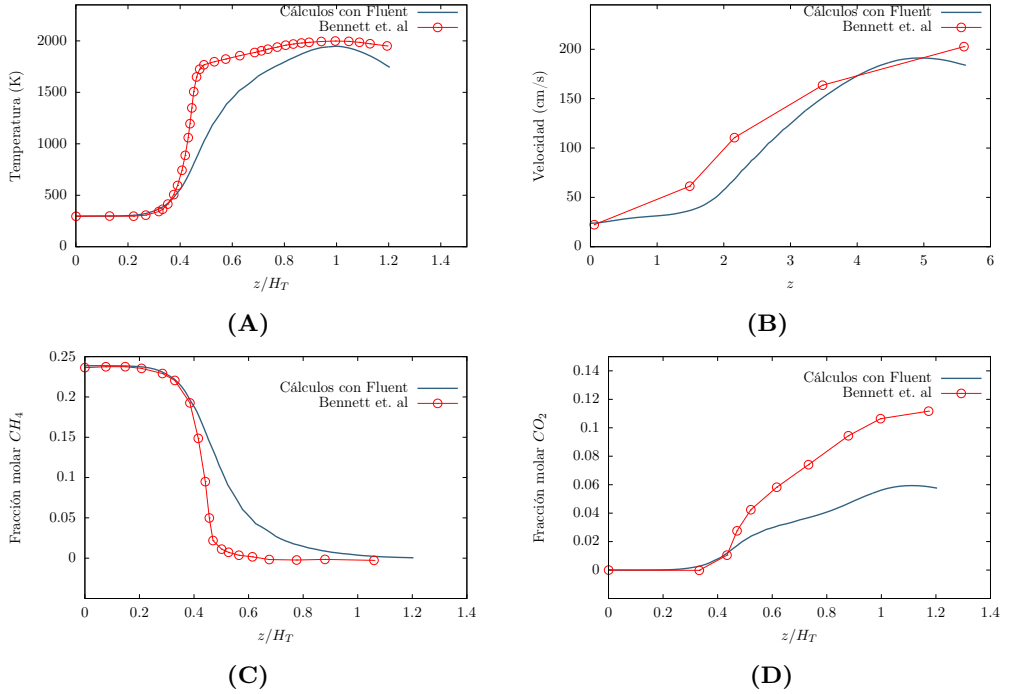


Figura 3.26: **(A)** Temperatura axial en función de la posición adimensionada. **(B)** Velocidad axial en función de la posición. **(C)** Fracción molar de metano en función de la posición adimensionada. **(D)** Fracción molar de dióxido de carbono en función de la posición adimensionada

Las figuras 3.26(A), 3.26(C) y 3.26(D), son en función de la posición adimensionada, $\frac{z}{H_T}$, donde H_T refiere a la posición sobre el eje en la cual se logra la máxima temperatura. En particular, el resultado obtenido por Bennett et. al toma un valor $H_T = 3.8\text{cm}$, mientras tanto, los modelos utilizados para el estudio devuelven $H_T = 4.62\text{cm}$. Luego de esta adimensionalización, se observa que el perfil de temperaturas axiales (figura 3.26(A)) presenta buena similitud al relevado por Bennett et. al. En particular, la forma general de la curva y sus tendencias parecen representarse correctamente por los métodos utilizados. A pesar de esto, se observa que el perfil obtenido por el modelado tiende a estar más atrasado, de modo que el aumento de la temperatura sucede más adelante en el dominio, hecho que también se observa al comparar los valores de H_T .

Por otro lado, en la figura 3.26(B), se observa que los valores de velocidad axiales resultan muy similares entre curvas, presentando tendencias y concavidades sensiblemente parecidas, a pesar del reducido número de puntos con los

que se cuenta para comparar. Se destaca que próximo a $z = 5\text{cm}$, se observa un cambio de concavidad, que resulta en una caída de la velocidad evitando que esta permanezca en aumento para mayores valores de z . Con esto se concluye que el modelo es capaz de modelar el flujo correctamente hasta las zonas aledañas a H_T , presentando alguna discrepancia para $z > H_T$.

Se destaca que el modelo muestra un encendido más tardío en comparación, sin embargo, el resultado es acorde debido a que una vez que enciende y la reacciones comienzan a suceder, el flujo se acelera, mostrando un notable cambio en la pendiente de la figura 3.26(B), y acompañado a esto se tiene un aumento en la temperatura. El sincronismo entre estas dos variables también se ve cuando la velocidad disminuye aguas abajo, donde la temperatura también decae.

En la figura 3.26(C), se refleja que la tasa de consumo de metano se modela adecuadamente, ya que los perfiles de fracción molar son semejantes. Se observa el mismo retraso, o bien una pendiente menor entre gráficos; esto se refleja en menores tasa de consumo de metano, lo cual de cierta forma está en concordancia con lo visto en la figura 3.26(A). Si la descomposición del CH_4 es tardía, la evolución de la temperatura también se verá amortiguada.

Por último, se menciona que la figura 3.26(D) evidencia diferencias en las fracciones molares de CO_2 entre resultados. En particular, los resultados obtenidos a partir de la simulación numérica exhiben un crecimiento más lento, pudiendo explicar que la combustión no se ha desarrollado completamente, y que en particular no lo hace al mismo ritmo que lo que se muestra en el estudio de Bennett.

En general, los métodos implementados son intrínsecamente diferentes, además, se basan en cálculos y predicciones realizadas a partir de mecanismos de reacción esencialmente iguales, pero de distintas extensiones y complejidad, por esto, diferencias en los resultados son de esperarse. Sin embargo, se entiende que los resultados obtenidos a partir de la utilización de este método son adecuados para estudiar el comportamiento de la llama.

3.6.2. Casos de estudio

Geometría

En general, hay datos o variables que no son fácilmente medibles en la situación experimental, por ello se propone hacer estudios computacionales de la situación real, buscando obtener resultados semejantes, de modo que se pueda observar y relevar más información a partir de esta herramienta.

Como se verá en detalle en la sección 3.7, los experimentos son realizados

en un mechero Bunsen. El mismo cuenta con la posibilidad de regular tanto el caudal de gas, así como estrangular la entrada de aire primario (aire de premezcla).

Se decide hacer una malla representativa al mechero y la zona circundante al mismo según las figuras 3.27 y 3.28. La malla a utilizar consiste de una zona extendida que representa el tubo del mechero, por donde circula la mezcla previo a salir del mismo. La mezcla entra en la zona rectangular mayor que representa el lugar donde se espera tener la llama. Como se puede visualizar, la región presenta un mallado no uniforme, realizado según lo que se trató anteriormente, donde se busca una mayor densidad próximo a la zona donde se espera a tener la llama. En dicha región (1) se presenta la mayor densidad de mallado, luego se reduce hacia la región (2), finalmente en la región (3) el mallado se vuelve más grueso debido a que se entiende que dicha zona no es de interés dado que las reacciones importantes debieron suceder anteriormente, y lo único relevante allí sería el flujo de los productos, cuya variación debería ser acotada por lo que resulta necesario un mallado extensivamente fino. En total, la malla presenta 213410 celdas, con un tamaño mínimo de 1.42 mm^2 .

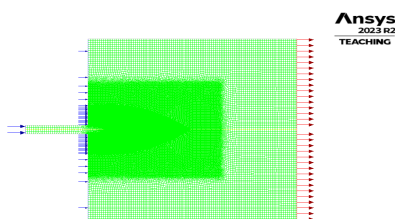


Figura 3.27: Malla utilizada para los casos de estudio.

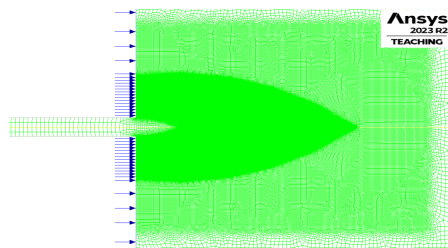


Figura 3.28: Vista ampliada de la malla, se aprecia mayor detalle de las estructuras de refinamiento.

Configuración de las simulaciones

Previo a poder realizar las simulaciones se debió determinar las condiciones de operación del mechero. Resulta necesario conocer tanto el caudal volumétrico que la cañería de gas es capaz de erogar, y a su vez la razón de equivalencia que la geometría permite obtener en la premezcla.

Caudal volumétrico de gas natural Con el gas quemador operando únicamente con suministro de gas natural, se propone medir el caudal entregado por la cañería. En primer lugar, se entiende que el caudal debería ser constante

en el tiempo pues lo es la geometría y la presión de suministro. Utilizando un totalizador de gas, se dejó en apertura plena la válvula reguladora de flujo de gas, así como la apertura para el ingreso de aire en la premezcla, luego se tomaron medidas de volumen en el totalizar en intervalos de cinco minutos al cabo de una hora. Se pudo afirmar que el caudal es constante y que con la instalación dispuesta el caudal de gas resultó en 52 L/h bajo condiciones de 1 atm y 10°C.

Configuración y condiciones de borde Una vez que se conoce la razón de equivalencia con la que trabaja el quemador en apertura plena, se proponen simulaciones para fracciones de hidrógeno variables. La base de todo lo siguiente está en lo tratado en el apartado 3.5.1, donde se destaca que al adicionar hidrógeno cambia la composición y el flujo volumétrico de combustible, pero el aire arrastrado hacia la premezcla permanece constante, por lo que varía la razón de equivalencia con la que trabaja el quemador.

A continuación, las simulaciones se realizan según la hipótesis anterior, por lo que generando una mezcla sin hidrógeno cuya razón de equivalencia sea la calculada, y a partir de mantener el flujo volumétrico de aire se agrega hidrógeno, por lo que a su vez varía ϕ . Se estudian los casos de 0, 5, 10, 20 y 30 % de hidrógeno en volumen de combustible.

Las condiciones de borde impuestas son entradas de velocidad para la mezcla (A), cuyos valores se pueden consultar en la tabla 3.3. Por otro lado, se impuso una condición de presión atmosférica en (B), que corresponde a la zona próxima a la salida del quemador y donde podría haber arrastre de aire secundario hacia el frente difusivo, de igual modo se configuró una salida a presión atmosférica (C). El dominio se sobredimensionó de modo que se puedan poner paredes rígidas (D) a los laterales del dominio, esto es viable porque al considerar grandes extensiones radiales se evitan los efectos de borde sobre objeto de interés. Finalmente, la pared del mechero se consideró como adiabática (E). Nuevamente se obvió el efecto de la radiación, y en particular se calcularon las intensidades de turbulencia de acuerdo a la ecuación 3.31.

%H ₂	X_{fuel}	X_{aire}	X_{CH_4}	$X_{C_2H_6}$	X_{CO_2}	X_{O_2}	X_{N_2}	X_{H_2}	Velocidad (m/s)
0	0.11614	0.88386	0.10935	0.00383	0.00134	0.18561	0.69987	0.0	1.97225
0.05	0.11584	0.88416	0.10906	0.00382	0.00133	0.18567	0.69433	0.00579	1.97158
0.1	0.11554	0.88446	0.10878	0.00381	0.00133	0.18574	0.68879	0.01155	1.97091
0.15	0.11524	0.88476	0.10850	0.00380	0.00133	0.18580	0.68328	0.01729	1.97025
0.2	0.11495	0.88505	0.10823	0.00379	0.00132	0.18586	0.67781	0.02299	1.96959
0.3	0.11437	0.88563	0.10768	0.00377	0.00132	0.18598	0.66694	0.03431	1.96830

Tabla 3.3: Composiciones y velocidad en la inyección para cada caso.

Resultados A continuación se presentan los resultados de los distintos casos analizados. Bajo las mismas ideas que se presentaron anteriormente, se busca comparar las variables como temperatura, velocidad, tasas de consumo, y ver el comportamiento y forma de las curvas a medida que se agrega hidrógeno.

En la tabla 3.4 se presentan los valores de temperatura máxima en el dominio (T_{max}), así como la temperatura máxima sobre el eje ($T_{max,eje}$), y la posición sobre la cual ocurre (H_T).

x_{H_2}	T_{max} (K)	$T_{max,eje}$ (K)	H_T (m)
0	1775.53	1739.55	0.0922
0.05	1836.06	1747.04	0.0922
0.1	1851.25	1752.04	0.0919
0.20	2049.23	1759.88	0.98
0.3	2034.86	1759.94	0.0932

Tabla 3.4: Temperatura máxima en el dominio y sobre el eje junto a su posición para cada fracción de hidrógeno.

En la figura 3.29 se observan las distribuciones axiales de temperatura para distintas fracciones de hidrógeno. En general, se tienen distribuciones similares con leves diferencias entre curvas, a menos de la distribución correspondiente al caso de 20 % de hidrógeno.

Independientemente del desplazamiento que se evidencia en la curva a 20 % de hidrógeno, se tienen los mismos máximos de temperatura para todas las fracciones, así como se observan las mismas derivadas o tasas de crecimiento de temperatura a lo largo del eje.

Hacia el final del dominio se tienen oscilaciones sobre la cola derecha de la curva, donde se asume que su presencia es debido a un refinamiento de malla deficiente, donde la imprecisión llevó a variaciones entre nodos contiguos, presentándose en el gráfico como oscilaciones. Si bien esto no sucede en la principal zona de interés del fenómeno, se destaca como un detalle a mejorar para futuros estudios.

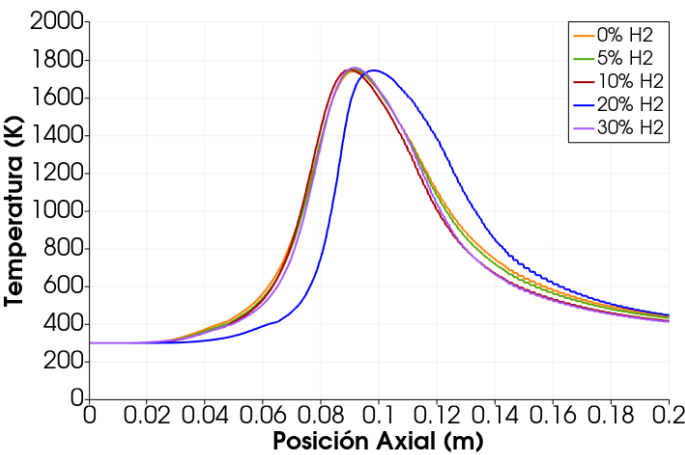


Figura 3.29: Distribuciones de temperatura sobre el eje. Se presentan curvas para distintas fracciones de hidrógeno.

Del mismo modo, en la figura 3.30 se tienen las curvas de velocidad axial sobre el eje del dominio. Análogamente, se observan curvas similares donde se ve un mayor apartamiento para la curva de 20 % de hidrógeno.

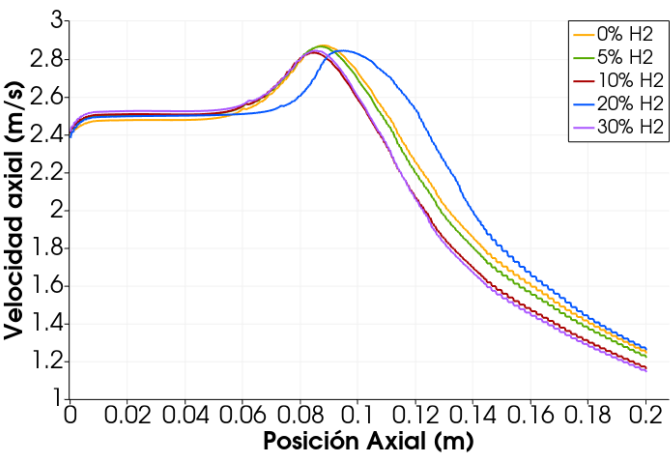


Figura 3.30: Distribuciones de velocidad axial sobre el eje. Se presentan curvas para distintas fracciones de hidrógeno.

Estas curvas se caracterizan por presentar dos etapas de crecimiento en la velocidad, donde se tiene una primera subida de la velocidad para las primeras coordenadas axiales, y un posterior incremento hacia los 5 cm por encima del

mechero; este comportamiento ya se vió tanto en la validación, así como en el estudio de Bennett et. al [60], donde un aumento en la velocidad se acompaña con un aumento en velocidad.

Se vuelve a destacar el comportamiento oscilatorio hacia el final de las curvas de velocidad, donde se concluye que si bien no es la principal zona de interés, se debería haber hecho un mayor refinamiento de malla, o bien retardar hacia más adelante en el dominio el cambio de densidad en la malla.

Tanto para la temperatura como para la velocidad sobre el eje se notaron curvas principalmente similares donde no se tienen grandes variaciones en comportamientos o máximos. Esto lleva a pensar a que la presencia del hidrógeno en la mezcla influye en cambios en la dirección perpendicular, provocando cambios en la estructura radial de la llama.

Con el objetivo de diferenciar los efectos de la adición de hidrógeno, se presenta la figura 3.31 donde se visualizan distintos contornos de temperatura, tasa de liberación de calor, concentración de OH y CH_2O para las distintas fracciones de hidrógeno. En particular, se toman las especies OH y CH_2O debido a que son trazadoras de reacciones de alta y baja temperatura, respectivamente.

Se presentan las iso-lineas de variable de progreso ($c = 0.9$) y razón de equivalencia ($\phi = 1.0$). La variable de progreso es característica del modelado de combustión de premezcla parcial, la misma separa el dominio en las zonas en las que no hay reacción, donde $c = 0$, y las zonas donde las reacciones ya ocurrieron y se tienen productos de combustión completa mayoritariamente, donde $c = 1.0$. Considerando que para valores intermedios de la variable de progreso las reacciones están en pleno desarrollo, se elije graficar la iso-linea donde $c = 0.9$ como valor característico, donde se habrán alcanzado la mayoría de las reacciones principales. Si además se tiene en cuenta que el frente de llama es más bien una región acotada de delgado espesor, se concluye que la curva la variable de progreso presenta un gradiente alto, por lo que en poca distancia se pasa de una zona con reactivos, a una zona con productos. Por esto, resulta razonable caracterizar la posición del frente de llama con la variable de progreso en un valor intermedio como $c = 0.9$, donde se dan las reacciones más importantes y se tiene un estado de "quasi-equilibrio".

Por otro lado, se presenta la curva de $\phi = 1.0$, buscando ver como la presencia del hidrógeno afecta a la zona donde se da la combustión estequiométrica. Debido a que se tiene premezcla parcial bajo condiciones de $\phi > 1.0$, las reacciones inician con excesos negativos de combustible. Conforme la mezcla se aleja del quemador, y actúan la mezcla y difusión, aire secundario participa en las reacciones, configurando una franja donde la combustión se da en rela-

ción estequiométrica, lo cual representa el proceso que caracteriza una mezcla difusiva.

En la figura 3.31 se muestran contornos de temperatura, tasa de liberación de calor (HRR), y la concentración de OH y CH_2O , presentadas para distintas fracciones de hidrógeno. Las figuras se disponen tal que en las filas varía la fracción de hidrógeno, mientras que en las columnas se tienen mapas de las distintas variables organizadas como semiplanos, de modo que se logra ver una imagen simétrica del mapa, aún pudiendo comparar variables semejantes como la temperatura con el HRR, así como la concentración de OH y CH_2O .

La curva de nivel de la variable de progreso, $c = 0.9$, permite identificar la posición del frente de llama; se observa que al agregar hidrógeno dicho contorno se acerca a la salida del mechero ($z = 0$), lo cual es un comportamiento esperado con la adición de hidrógeno y que se corresponde con su capacidad para acelerar las reacciones y en particular aumentar la velocidad de llama; de acuerdo a lo ya discutido en el presente trabajo, un incremento en la velocidad de llama acerca el frente de reacción hacia la mezcla reactiva, lo cual se visualiza como un acortamiento general de la llama, fenómeno que se visualiza mirando el tramo interno del contorno sobre el eje (ramas próximas al mechero y punta interna del cono), cuando no se agrega hidrógeno el extremo de la llama está próximo a 3.5 cm del mechero, mientras que para 30 % de hidrógeno se tiene el extremo en $z = 3$ cm.

A su vez, al observar el contorno de la variable de progreso, se observa que su forma varía al agregar hidrógeno, y en particular muestra menos curvatura con el aumento de este último. La curvatura en el perfil es más exagerada en los casos de bajo hidrógeno en mezcla, destacándose el caso a 0 % H_2 , donde para las primeras coordenadas el perfil resulta estrecho, para luego ensancharse. Dicha curvatura o cambio en la concavidad del contorno se corresponde con la forma que adquiere el frente de llama por efecto de la participación del aire secundario que participa de las reacciones mediante un mecanismo difusivo. Al agregar hidrógeno, el aire necesario para la combustión disminuye, por lo que menos aire ingresa hacia el frente de llama por lo que su deformación se ve reducida; a su vez, dicho caso es el de menor velocidad de llama, por consiguiente, las reacciones demoran más en suceder, el combustible tiene más tiempo para mezclarse y termina englobando más aire.

Por otro lado, al observar el conjunto de contornos de temperatura, HRR, concentración de OH y CH_2O , se observa una marcada segregación entre la zona en la que se forma el CH_2O y el OH . En particular, la formación de CH_2O se corresponde con las reacciones de baja temperatura y a su vez se da en la zona donde se da la mayor liberación de calor. Esto último se corresponde con

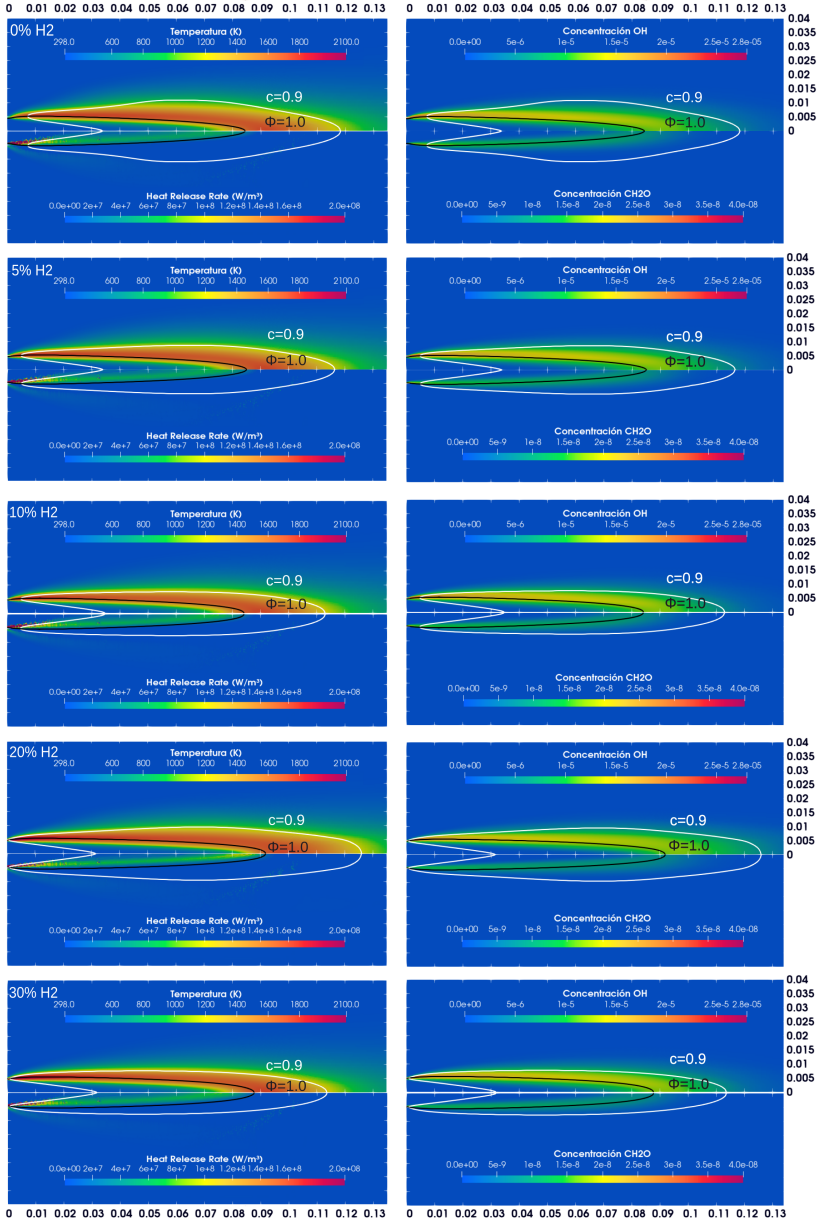


Figura 3.31: Contornos de temperatura, heat release rate, concentración de CH_2O y OH para distintas fracciones de hidrógeno. La escala es en metros.

un elevada número de reacciones químicas que descomponen muchas especies, por lo que se libera la mayor cantidad de calor. Luego, la mayor concentración de CH_2O se observa por debajo de la línea de $\phi = 1.0$, mientras que el OH se corresponde con reacciones de alta temperatura, apareciendo en mayor medida por encima de la línea de $\phi = 1.0$, donde la llama se ve gobernada por el proceso característico de una llama difusiva, en la que la mezcla es pobre; en paralelo con esto, en la zona de mayor OH , se tiene la mayor temperatura, ocurriendo justo después de que se libere el calor.

Se destaca que todas las subfiguras fueron generadas a partir de una misma escala de colores, con el objetivo de identificar similitudes y diferencias. Al observar detenidamente, no se logran identificar grandes diferencias, por lo que no se logran detectar grandes cambios al agregar fracciones de hidrógeno, aunque si se logran identificar ciertos comportamientos y tendencias como los mencionados.

Sumado a esto, en la figura 3.32 se muestran curvas en detalle para las distribuciones radiales de temperatura, concentración de OH y CH_2O para distintas alturas axiales ($Z= 0.5$ cm , $Z=4$ cm, $Z=8$ cm), con el objetivo de evaluar cuantitativamente los perfiles extraídos de la figura 3.31

En general, se observa que dada una variable y altura, el desarrollo de las curvas es aproximadamente independiente de la fracción de hidrógeno, donde la mayor diferencia se dan en los máximos que se alcanzan en cada caso, aunque los perfiles son general muy similares.

La zona de mayor interés resulta en $Z=0.5$ cm, donde se está próximo a la salida del mechero. Se observa que al agregar hidrógeno, se llega a una mayor formación de OH , lo cual se corresponde con mayores reacciones de alta temperatura y que se ve reflejado en la temperatura allí alcanzada, la cual no solo aumenta con el hidrógeno, si no que es la mayor entre todas las alturas. Esto último refuerza la idea de que la adición de hidrógeno en la mezcla favorece que las reacciones ocurran más rápidamente, por lo que la llama se estaciona próximo a la salida del mechero y allí mismo logra mayor intensidad.

En el caso del CH_2O se tiene el efecto opuesto, donde la adición de hidrógeno repercute en una disminución consistente de la concentración de CH_2O . Este resultado era de esperarse de acuerdo a los modelados realizados en la sección 3.3.

Se destaca que dadas algunas inconsistencias presentes en los cálculos, así como imprecisiones debido al mallado, resulta pertinente profundizar en un mayor ajuste del modelo así como profundizar en la implementación y calidad de la malla.

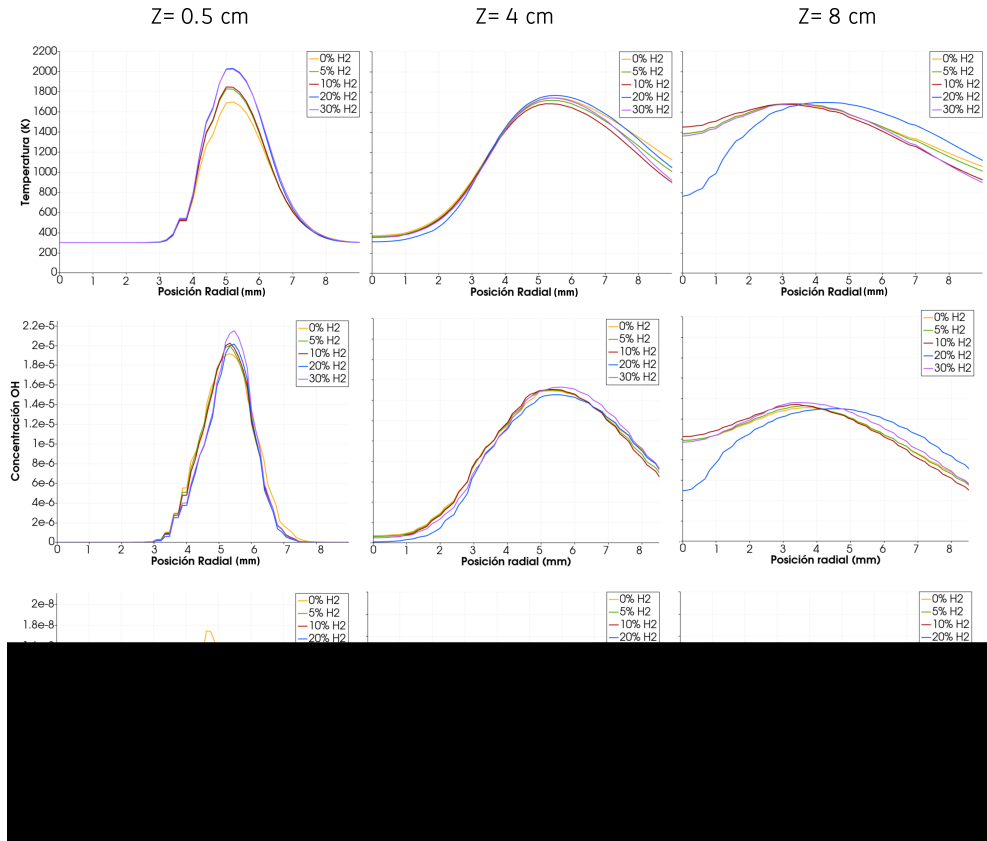


Figura 3.32: Distribuciones radiales de temperatura, concentración de OH y CH_2O para distintas fracciones de H_2 y distancias axiales (alturas).

3.7. Estudio experimental

3.7.1. Introducción

Una vez determinado el límite de H_2 admisible para que los gases sean intercambiables desde una perspectiva teórica y a partir del modelado del fenómeno, se ensayan diversas mezclas en un banco experimental con la finalidad de constatar los resultados de los modelos y evaluar el desempeño real de la combustión en quemadores atmosféricos.

Diversos autores ya han evaluado el comportamiento de las mezclas desde una óptica experimental. Zhang et al. [62] ha trabajado en un estudio donde evalúa 17 quemadores domésticos para cocina, utilizando los índices de Wobbe, AGA y Weaver para predecir la estabilidad de la combustión y las emisiones

para diferentes constituciones de gas de alimentación. Compara los resultados experimentales con las predicciones para analizar la aplicabilidad de estos índices en este tipo de sistemas. Un detalle no menor que se menciona en el trabajo, es la diferencia entre los quemadores utilizados por AGA para la determinación de los índices (década de 1950) y los analizados en su trabajo. Zhang pone en duda la aplicabilidad de los índices de Weaver y AGA. Sin embargo concluye que el índice Wobbe puede predecir adecuadamente entrada de calor, y las emisiones de CO y NO_x pueden mantenerse en límites razonables para los gases estudiados. Sin embargo menciona que para la predicción de la estabilidad de la combustión, los criterios definidos por los índices deben ajustarse en valores específicos. En particular propone un rango determinado para el índice de desprendimiento de llama de Weaver, el de combustión incompleta y el índice de desprendimiento de AGA.

Zhan et al. [63] realizan un estudio experimental de mezclas de gas natural e hidrógeno en un calentador instantáneo de agua, trabajando con porcentajes de hidrógeno desde 0 a 40 %, con un control de aire independiente y diversas potencias (entre 0.7 y 2.3kW). En su análisis determinan variaciones en la forma de la llama, emisiones de CO y NO_x, así como la temperatura del quemador. Como resultados obtuvieron que a medida que aumenta la fracción de hidrógeno en la mezcla, primero aumenta la altura de la llama y luego se reduce. En cuanto a la temperatura, el comportamiento es opuesto. También concluyen que este tipo de equipos puede ser utilizado con mezclas de hasta 40 % de hidrógeno. En cuanto a las emisiones, el CO en los gases de combustión disminuye gradualmente con el aumento de la proporción de hidrógeno en la mezcla, mientras que la emisión de NO_x fluctúa ligeramente cuando la proporción de mezcla de hidrógeno es inferior al 20 %, pero luego disminuye gradualmente.

Se monta un banco de ensayos para analizar de forma práctica el comportamiento real de un sistema de combustión atmosférico de laboratorio, mechero Bunsen. Se analiza la estabilidad de la llama, indicios de problemas de intercambiabilidad (calado, soplado y puntas amarillas) y se determina la velocidad de llama laminar para diversas mezclas de GN+H₂ y excesos de aire primario. Además se monitorea las emisiones de CO sobre la llama así como la temperatura de los humos a una distancia fija sobre la punta del quemador.

3.7.2. Banco de ensayos

El banco de ensayos, montado específicamente para analizar el comportamiento de estas mezclas de gases, tiene la capacidad de generar mezclas desde 0 a 100 % de hidrógeno en gas natural. Además es posible controlar el flujo de

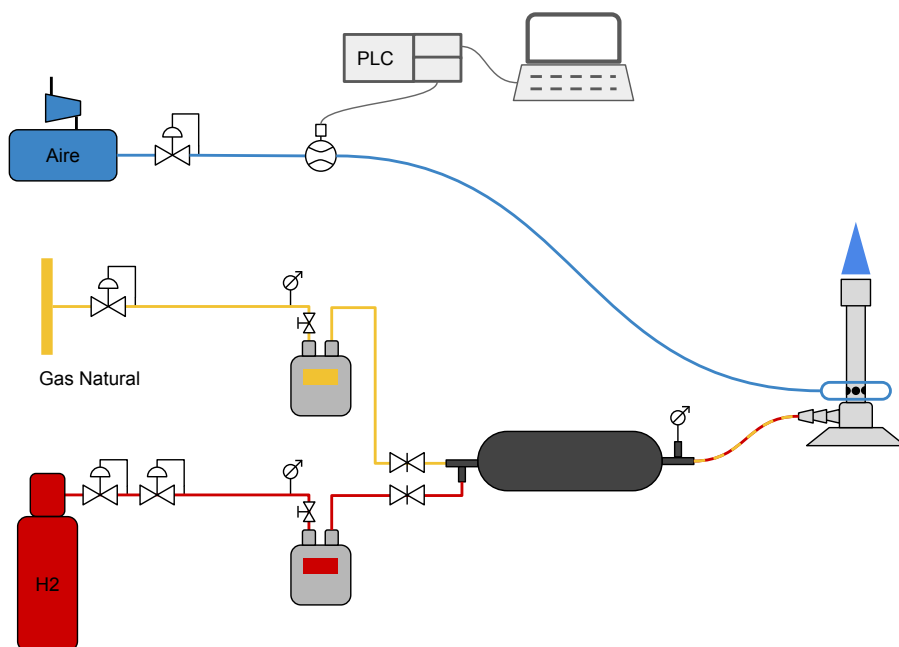


Figura 3.33: Esquema de la instalación experimental.

aire inyectado al quemador, por lo que es posible controlar el exceso de aire (o riqueza de la mezcla) primario en el quemador. La figura 3.33 esquematiza los elementos principales de la instalación, mientras que la figura 3.34 presenta una imagen general del banco.

El gas natural es alimentado directamente de la red de distribución de Montevideo, el cual ingresa al laboratorio a 20mbarg. La línea cuenta con un contador de gas (totalizador volumétrico) exclusivo para el banco de ensayos, así como manómetro (junto al contador) y termómetro ambiente para poder cuantificar el consumo de GN. El hidrógeno es alimentado desde un cilindro a alta presión ubicado en un nicho exterior al edificio. La presión del H₂ se reduce en dos etapas desde la presión del cilindro a 20mbarg, presión a la cual ingresa al laboratorio y es utilizado para generar las mezclas. Al igual que la línea de GN, la instalación de H₂ cuenta con un contador de gas y manómetro de forma tal de cuantificar el consumo de gas. Aguas abajo de los contadores, ambas líneas cuentan con válvulas de aguja para regular el flujo de cada gas de forma independiente y de esta forma generar las mezclas deseadas. Luego de la regulación de flujo, ambos gases ingresan a un reservorio con la finalidad de



Figura 3.34: Imagen general de la instalación experimental.

homogeneizar la mezcla previo a ser utilizada en el quemador. La instalación en su conjunto además cuenta con diversas llaves de corte de ambos gases y de la mezcla, manómetros. Para la extracción de gases de combustión se cuenta con una campana con flujo de aire inducido, eliminando así posibles focos de ignición ante eventuales fugas de gases combustibles. El laboratorio cuenta además con rejillas de entrada de aire para asegurar la correcta calidad del aire ambiente. Se cuenta además con un sensor de metano con corte automático de la entrada de GN al laboratorio.

Para la dosificación de aire primario en el mechero Bunsen se diseñó e imprimió una pieza que permite inyectar el aire de forma controlada. La regulación de aire se realiza por medio de un compresor, válvula reguladora y controlador de flujo másico marca Burkert, modelo 8741, el cual permite regular el flujo de aire entre 0 y 1.8 Nm³/h.

3.7.3. Descripción de ensayos

El mechero Bunsen empleado tiene un consumo nominal de 70 Ncm³/h de gas natural, con diámetro de 11 mm e inyector de 0.5 mm. En la toma de aire, la cual es normal aspirada, se adaptó para controlar la dosificación de aire primario. Además se diseñó y fabricó un direccionador de flujo de aire secundario, con la finalidad de minimizar las perturbaciones que puedan surgir de corrientes de aire. Tanto el dosificador de aire como el direccionador de flujo son piezas impresas en PLA material. En la figura 3.35 se presentan una fotografías del mechero Bunsen utilizado y las piezas antes mencionadas.

Con la capacidad de regular los tres gases participantes (GN, H₂ y aire) es posible controlar el exceso de aire (o riqueza de combustible) para cada mezcla de GN e H₂ a analizar. Es decir, para cada mezcla de gases combustibles se ensaya el desempeño de la combustión para diversas riquezas.

Para cada uno de estos puntos se determinan o cuantifican las siguientes características:

- Inspección visual y fotográfica. Se analiza la estabilidad de llama, eventualidad de calado o soplado de la mismas, así como fluctuaciones, puntas amarillas, ruido u otros fenómenos que denoten problemas en la intercambiabilidad.
- Velocidad de llama laminar a partir de imagen fotográfica del cono formado por la llama según se describe a continuación.
- Emisiones de CO. Se monitoréa la fracción de CO a menos de 50 cm del frente de llama del quemador.



((a)) Imagen del mechero Bunsen con adaptación para dosificar ingreso de aire primario.



((b)) Mechero con direccionador de aire secundario y dosificador de aire primario.

Figura 3.35: Imágenes de mechero y adaptaciones para el control de aire primario y secundario.

- Temperatura en punto fijo a 13 cm del quemador. Se determina la temperatura del flujo de gases en un punto fijo para todas las combinaciones de mezclas de gases combustibles y excesos de aire primario.
- Registro numérico del flujo de aire máximo antes del soplado de la llama.

Determinación de mezcla de gases combustibles y riqueza de la premezcla

Cada punto analizado (mezcla de $\text{GN} + \text{H}_2$ y aire) permanece en condiciones constantes durante al menos 5 minutos con la finalidad de contabilizar el consumo inicial y final de ambos gases combustibles en los totalizadores correspondientes. La fracción volumétrica de cada gas en mezcla de $\text{GN} + \text{H}_2$ se determina a partir de los flujos volumétricos determinados para cada gas aplicando las ecuaciones 3.32 y 3.33, para lo cual se requiere conocer la presión y temperatura de los mismos.

$$[H_2] = \frac{\dot{V}_{H_2}}{\dot{V}_{GN} + \dot{V}_{H_2}} \quad (3.32)$$

$$[GN] = 100 - [H_2] \quad (3.33)$$

Donde $\dot{V}_i$ corresponde al flujo volumétrico en condiciones normales de cada gas, el cual se determina por medio de la ecuación 3.34.

$$\dot{V}_i = \left(\frac{V_{final} - V_{inical}}{t_{final} - t_{inical}} \right) \left(\frac{P + 101.325}{101.325} \right) \left(\frac{273}{T} \right) \quad (3.34)$$

Donde V y t final e inicial corresponden a las mediciones de volumen y tiempo inicial y final del punto en análisis, P y T la presión manométrica y temperatura (K) en condiciones del ensayo.

Para determinar la riqueza (el exceso de aire) de la premezcla en el quemador, además de conocer el flujo de aire (fijado por el fluxómetro) es necesario conocer la composición del gas combustible, la cual depende de la mezcla antes mencionada y de la composición del gas natural. La composición del gas natural, como fue mencionado anteriormente, varía con el tiempo. Para el análisis experimental se utilizó un promedio de composición del gas durante los días que transcurrieron los ensayos, detallada en la tabla 3.5.

Especie	Fracción volumétrica
CH_4	89.54
C_2H_6	6.36
C_3H_8	1.79
$I - C_4H_{10}$	0.34
$N - C_4H_{10}$	0.42
$I - C_5H_{12}$	0.08
$N - C_5H_{12}$	0.06
C_6H_{14}	0.03
CO_2	0.60
N_2	0.77
α_q (mol O_2 /mol GN)	2.16

Tabla 3.5: Composición promedio del GN durante el transcurso de los ensayos experimentales

De este modo, la cantidad de oxígeno necesaria para la combustión estequiométrica (α_q) del gas natural es 2.16 mol O_2 /mol GN , mientras que la del hidrógeno es 0.5 mol O_2 /mol H_2 . La riqueza de la premezcla se determina mediante la ecuación 3.35.

$$\phi = \frac{(\alpha_{q,GN} \dot{V}_{GN} + \alpha_{q,H_2} \dot{V}_{H_2}) 4.76}{\dot{V}_{Aire}} \quad (3.35)$$

Determinación experimental de la velocidad de la llama laminar (S_L) con mechero Bunsen

Según Turns [53], la llama de premezcla de un mechero bunsen se caracteriza por tener una llama doble, refiriéndose a una región a la llama de premezcla rica en su zona interior, y una llama difusiva en su exterior. Por lo tanto, cuando se desarrolla la llama, se puede identificar una zona cónica que es donde se estabiliza el frente de llama, representado en la Figura 3.36. Si se mira la llama desde un punto de vista macroscópico, se puede asumir como una zona muy caliente en el espacio que aportará calor a los reactivos (mediante diferentes mecanismos de transferencia) y esto permitirá que alcancen la energía de activación. Como no hay direcciones preferenciales, el aporte de calor será uniforme y el frente de llama tenderá a avanzar en dirección normal a la superficie de la llama. Por lo tanto, dado que en el mechero el flujo de reactivos alcanza la llama con un ángulo de ataque θ , para que ésta se estabilice, la componente de la velocidad de reactivos, normal a la superficie de la llama, tiene que ser igual en módulo y opuesta en dirección al avance del frente de llama. Por lo tanto se debe cumplir la ecuación 3.36.

$$\vec{S}_L = S_L \hat{n} = \vec{v}_{u,n} = |\vec{v}_u| \sin(\theta) \hat{n} \quad (3.36)$$

De esta forma, el módulo del vector representa el valor de la velocidad y se puede obtener con la versión escalar de la expresión anterior, según la ecuación 3.37.

$$S_L = |\vec{v}_u| \sin(\theta) \quad (3.37)$$

Una evaluación sencilla del perfil de la llama se puede realizar mediante imagen de sombra (shadowgraph). Se impone una luz de alta luminosidad a la llama y se observa la sombra proyectada en una superficie plana. Debido a cambios de densidad en el frente de llama (que se manifiesta cerca de los gradientes de temperatura), el pasaje de la luz se ve afectado y se refleja una sombra que corresponde a la proyección del cono de premezcla. en la superficie en la que se proyecta. El mismo se puede observar en la figura 3.37.

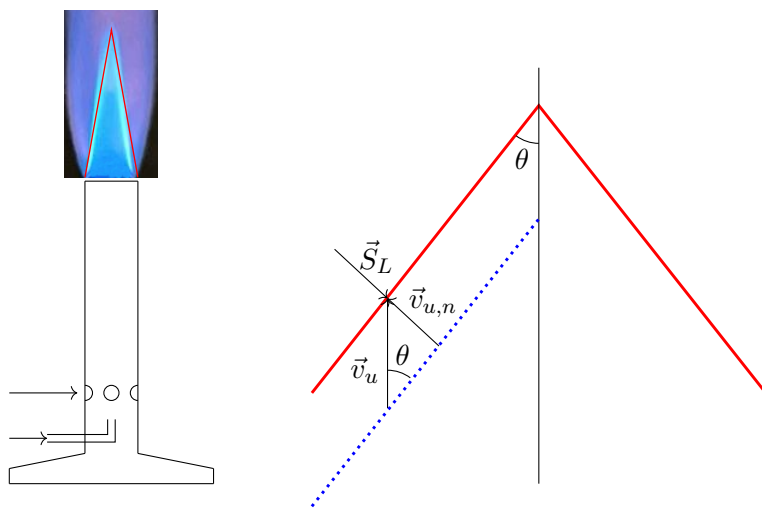


Figura 3.36: Esquema del frente de llama en un mechero Bunsen.

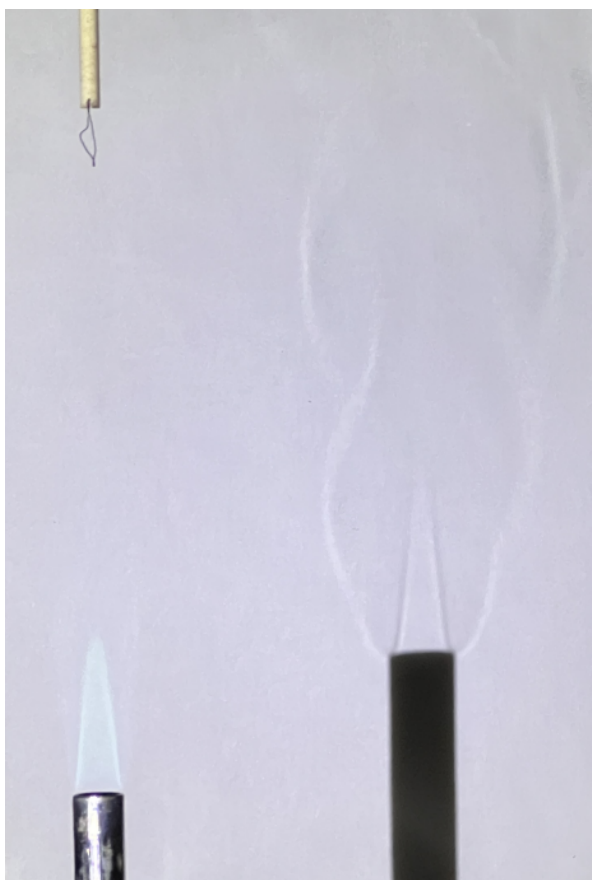
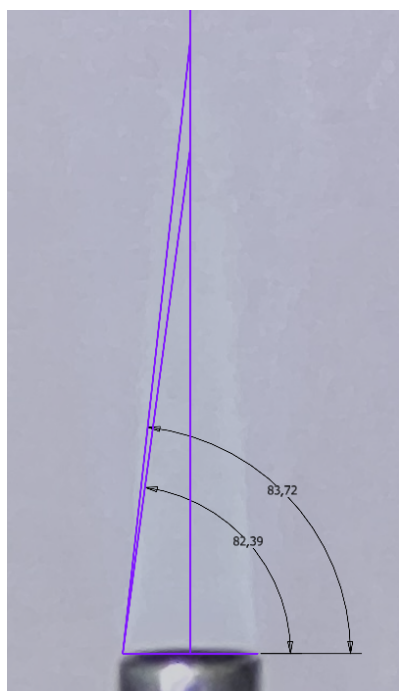
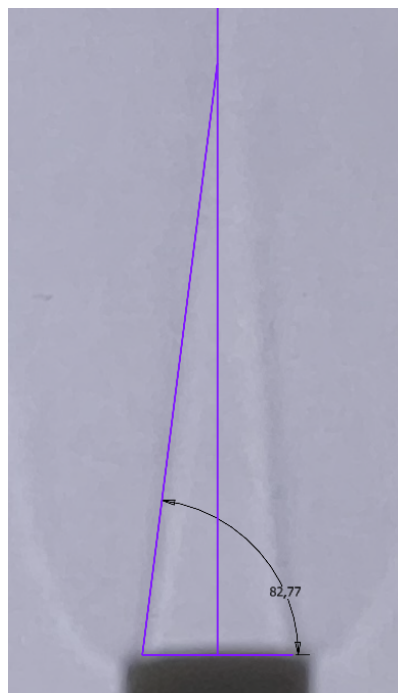


Figura 3.37: Imagen de la llama y la sombra de la misma.

Con la fotografía del cono proyectado en la sombra se realiza un estudio geométrico utilizando el software Inventor para determinar con precisión el ángulo de interés. La determinación de θ a partir de las imágenes no resulta sencillo para todos los puntos de análisis, siendo más factible determinar el ángulo β , formado entre la boquilla del quemador y el cono, según se aprecia en la figura 3.38.



((a)) Imagen del cono de la llama y determinación de ángulos.



((b)) Imagen de la sombra del cono y determinación de ángulo.

Figura 3.38: Imágenes de los conos directo en la llama y de la sombra.

Incertidumbre

El cálculo de la incertidumbre de las variables de estudio, caudal, exceso de aire y velocidad de llama, se fundamenta en la metodología establecida por la Guía para la Expresión de la Incertidumbre en las Mediciones (GUM). Esta metodología permite evaluar la incertidumbre mediante la propagación de errores asociados a las diferentes variables medidas, considerando tanto las fuentes de error sistemático como aleatorio. A través de este enfoque, se cuan-

tifica la contribución de cada variable medida al resultado final, garantizando una estimación completa asociada a los parámetros evaluados. Para cada parámetro evaluado, es necesario identificar las fuentes de error potenciales (como resolución del instrumento, condiciones ambientales o interpolaciones) y determinar cómo estas contribuyen al resultado final mediante la propagación de incertidumbres.

Para determinar la incertidumbre de los caudales de los tres gases (gas natural, hidrógeno y aire) se contempló la incertidumbre declarada en la calibración y la resolución de los instrumentos. Adicionalmente se realizó un ajuste lineal con los datos de calibración y se determinó la incertidumbre de dicha regresión lineal.

Para determinar la incertidumbre combinada en el cálculo de la riqueza de la premezcla (ϕ) se aplicó la ley de propagación de la incertidumbre, ecuación 3.38, siendo las derivadas parciales las explicitadas en las ecuaciones 3.39 a 3.41. Finalmente, los resultados se expresan con un factor de cobertura $k = 1$. Es decir, los resultados consideran la contribución individual de incertidumbres con un nivel de confianza del 68 % (una desviación estándar).

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right)^2} \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \dot{V}_{GN}} = \frac{4.76}{\dot{V}_{Aire}} \alpha_{q, GN} \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \dot{V}_{H_2}} = \frac{4.76}{\dot{V}_{Aire}} \alpha_{q, H_2} \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \dot{V}_{Aire}} = - \frac{\left(\alpha_{q, GN} \dot{V}_{GN} + \alpha_{q, H_2} \dot{V}_{H_2} \right) 4.76}{\dot{V}_{Aire}^2} \quad (3.41)$$

La determinación de la velocidad de la llama también cuenta con gran incertidumbre. A la propia incertidumbre de los caudales y consecuentemente de la velocidad de los gases se le suma la incertidumbre de la determinación del ángulo del cono, siendo esta la más compleja de cuantificar y dependiente del tratamiento de imágenes. Por lo tanto, para estimar la velocidad de la llama y la incertidumbre se toman tres ángulos por cono, siendo un ángulo a partir de la sombra de la llama y dos ángulos (máximo y mínimo) a partir de la imagen de la llama (ver figura 3.38). Consecuentemente se calculan tres velocidades de llama laminar a partir de estos ángulos.

3.7.4. Resultados

Velocidad de llama

Los resultados obtenidos de velocidad de llama laminar, y su incertidumbre, determinada experimentalmente se presenta en el gráfico de la figura 3.39, donde también se presentan las curvas de velocidad de llama laminar para mezclas de 0 y 50 % de H_2 , determinadas teóricamente con Cantera (sección 3.4). Según se aprecia en el gráfico, el método experimental utilizado da como resultado valores menores de velocidad de llama laminar en comparación con los resultados teóricos. No obstante, la tendencia o comportamiento, donde las velocidades son máximas próximas a las mezclas estequiométricas se obtuvieron también experimentalmente. Adicionalmente, los resultados experimentales también lograron representar de forma parcialmente adecuada la tendencia creciente de la velocidad de llama con el aumento de la fracción de H_2 en la mezcla.

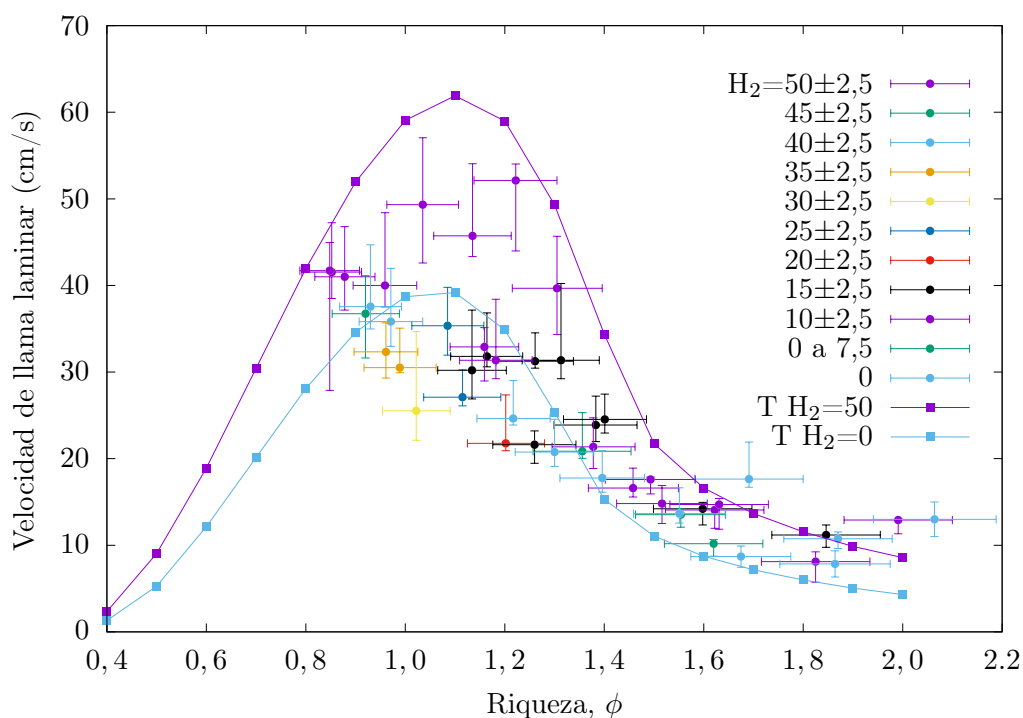


Figura 3.39: Gráfico de la velocidad de llama experimental en función de la riqueza, parametrizada con la fracción de H_2 en la mezcla.

Temperatura de gases

La temperatura de los gases a 130 mm de la boquilla del mechero presenta una dependencia con la fracción de H₂ en la mezcla y con la riqueza representadas en las figuras 3.40 y 3.41. A partir de los gráficos se aprecia una tendencia decreciente de la temperatura con el aumento del contenido de H₂, y un aumento de la temperatura con el aumento de la riqueza (para valores de ϕ entre 1 y 2 aproximadamente). Ambas tendencias están asociadas al mismo efecto, siendo este la reducción de la altura del cono de la llama. Por un lado, el aumento del contenido de H₂ genera un aumento en la velocidad de la llama y consecuentemente una reducción en la altura del cono. Por otro lado, cuanto más próxima es la riqueza de la mezcla a valores estequiométricos ($\phi=1$) mayor es la velocidad de llama por lo que también es menor la altura del cono. La altura del cono, sumado a la difusión de aire secundario, generan que cuanto menor sea la altura del cono primario de llama, y consecuentemente la pluma secundaria sea de menor altura, la temperatura en el punto de medición también sea menor.

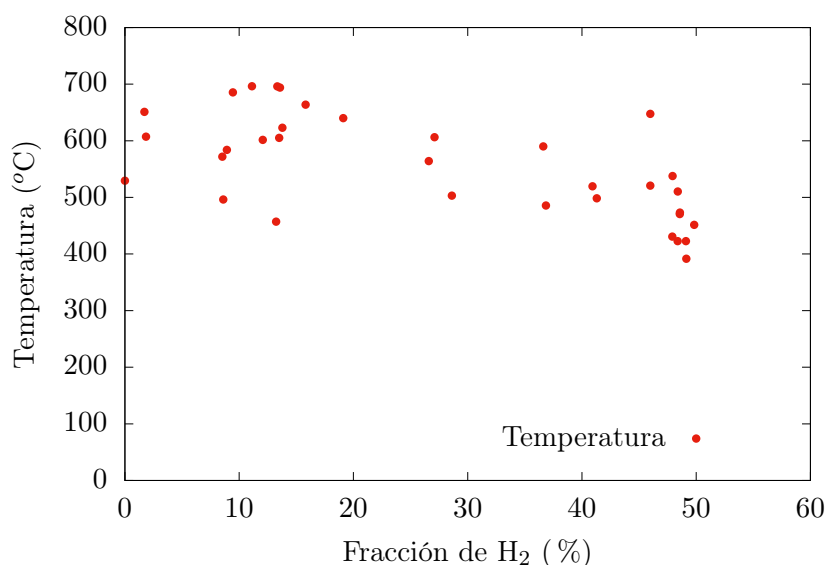


Figura 3.40: Gráfico de la temperatura en función de la fracción de H₂ a 130mm de altura respecto al quemador.

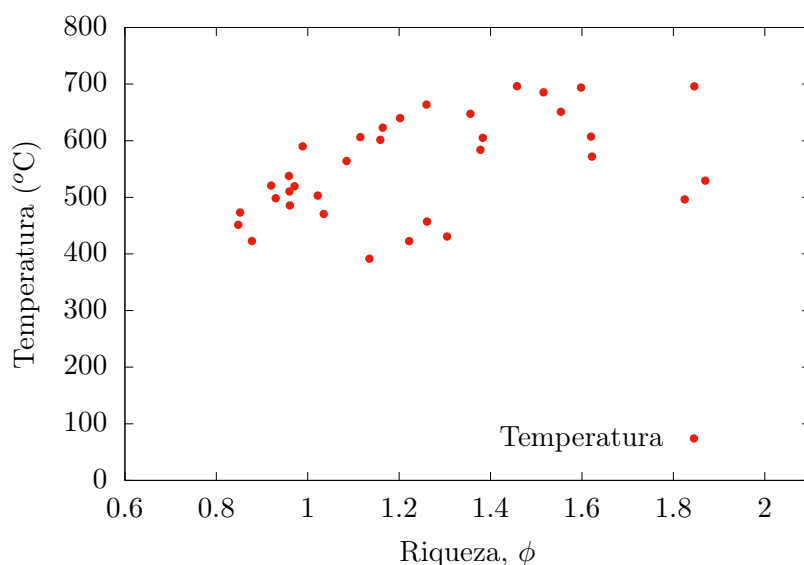


Figura 3.41: Gráfico de la temperatura en función de la riqueza a 130mm de altura respecto al quemador.

Emisiones de CO

En cuanto a las emisiones de CO determinadas con el analizador de gases, se destaca que si bien no se realizó un registro riguroso de composición de CO en todas las corridas, las mediciones realizadas, en puntos diversos de composición y riqueza, dieron siempre fracciones de CO menores a 4 ppm, cumpliendo así lo establecido por el Reglamento de Instalaciones Fijas de Gases Combustibles.

Casos límite y problemas de intercambiabilidad

Uno de los principales resultados de trabajo experimental es el hecho de haber logrado utilizar exitosamente un quemador atmosférico diseñado para GN con una mezcla de gases combustibles de 50 % GN + 50 % H₂.

En cuanto a problemas de intercambiabilidad, a pesar del aumento de la velocidad de llama a medida que aumenta la fracción de H₂, no hubo ocurrencia de calado, fenómeno el cual era esperable. Por el contrario, el fenómeno identificado fue el soplado de la llama. Este fenómeno ocurrió con el aumento del flujo de aire, para todas las mezclas de gases combustible (a diferentes flujos de aire). Debido a que se inició cada corrida con riquezas de mezcla primaria mayores a uno (excesos de aire negativo), el aumento sucesivo del flujo de aire

generó un aumento tanto en la velocidad de gases premezclados en la salida del quemador, así como un aumento en la velocidad de la llama. De este modo, a medida que aumenta el flujo de aire se reduce la altura del cono de la llama. Finalmente se alcanzó el soplado de la llama. Este fenómeno se alcanzó debido a la posibilidad de regular el flujo de aire. El mismo quemador, trabajando en su condición de diseño, con aspiración natural de aire, no alcanza el soplado de la llama.

3.8. Conclusiones

Este capítulo abordó cómo la presencia de H₂ afecta el desempeño de la combustión en quemadores diseñados para trabajar con GN. Dado que la adición de H₂ genera una serie de alteraciones en las propiedades de combustión, se hace imprescindible analizar su comportamiento con rigurosidad para establecer condiciones en las que las mezclas GN+H₂ puedan ser intercambiables con GN puro sin comprometer la eficiencia o la seguridad de los equipos.

Modelando la combustión en reactores de mezcla homogénea, con un mecanismo detallado de reacción y tiempo suficiente para la evolución de las reacciones, se observó que al aumentar la fracción de H₂ en la mezcla con GN, ocurren los siguientes fenómenos:

- Incremento en la temperatura de llama adiabática.
- Reducción de las emisiones de CO₂, sustituidas por un aumento de H₂O.
- Aumento en emisiones de NO_x, especialmente en sistemas adiabáticos por el incremento de temperatura.
- Disminución de emisiones de CO en sistemas adiabáticos e isotermos.
- Reducción de emisiones contaminantes como CH₃CHO, CH₂O y CH₆O.

Analizando la cinética química de las reacciones, en base a un mecanismo detallado de reacciones, se concluye que la presencia de H₂ en la mezcla reduce el tiempo de residencia necesario que evolucionen todas las reacciones. Es decir, a medida que aumenta la fracción de H₂ en la mezcla GN+H₂, el tiempo necesario para llegar al equilibrio químico es menor.

Por otro lado, la velocidad de llama laminar aumenta a medida que se incrementa la fracción de H₂ en la mezcla de gases combustibles. La velocidad de llama también tiene una gran dependencia con la riqueza (o exceso de aire) de la premezcla combustible y aire, presentando un pico de velocidad próxima a mezclas estequiométricas. El aumento de la velocidad de la llama al adicionar

H₂ es una de las principales limitantes para trabajar con fracciones elevadas de H₂. El aumento en la velocidad de la llama genera alteraciones en la forma y ubicación de la llama, hasta ocasionar el calado y consecuentemente daños en los equipos.

La intercambiabilidad con GN está limitada principalmente por el riesgo de calado. El análisis de índices de intercambiabilidad y las variaciones de la composición de GN a lo largo del tiempo, permitieron establecer los siguientes límites de H₂:

- Mezcla de hasta 9 % de H₂ en volumen para cualquier composición de GN.
- Fracciones de hasta 11 % en volumen para el 99.5 % de los días en el año.
- Fracción de hasta 20 % de H₂ para la composición promedio de GN.

Estos límites permiten operar de forma segura sin modificar los equipos de combustión domésticos, asegurando que no haya riesgo de soplado, combustión incompleta o presencia de puntas amarillas.

El estudio realizado por CRFD complementó los análisis previos tanto cuantitativa como cualitativamente, permitiendo observar fenómenos como la aceleración de las reacciones, representado principalmente por las deformaciones en la estructura de la llama. Además, esto permitió comparar diversos indicadores clave, como los trazadores de reacción (OH y CH₂), además de poder separar e identificar zonas características de la llama. Se concluye entonces:

- La adición de H₂ provoca variaciones en la estructura y forma de la llama, fomentando una llama más corta y esbelta.
- Las zonas donde se dan las reacciones de alta temperatura, y donde además se tienen mayores temperatura tienden a desplazarse hacia la salida del mechero, hecho que resulta compatible con el esperado fenómeno de flashback.

En el banco experimental, se ensayaron exitosamente mezclas GN+H₂ con hasta un 50 % de H₂ en un mechero Bunsen, regulando el flujo de aire de premezcla. Todas las combinaciones de mezcla de GN y H₂, con riqueza entre 0.85 y 2.0, mostraron estabilidad de llama, sin problemas de puntas amarillas ni calado, con emisiones de CO menores a 4 ppm a 30 cm del quemador. Estos resultados muestran que, bajo ciertas condiciones controladas, es posible mantener una combustión estable y segura en rangos amplios de H₂. Por otro lado, la metodología utilizada para determinar la velocidad de llama a partir de la sombra del cono formado por la llama dio resultados menores a los teóricos.

Capítulo 4

Impacto en la Matriz Energética del Uruguay

La inyección de hidrógeno, producido por electrolisis del agua, inyectado a la red de gas natural, genera una reducción en la importación del hidrocarburo y un aumento en la demanda de energía eléctrica. Considerando que se utiliza energía eléctrica generada a partir de fuentes renovables para generar el hidrógeno, esta sustitución de gases repercute en una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Siendo este uno de los objetivos principales de utilizar mezclas de gas natural e hidrógeno.

Por lo tanto, a partir de los consumos diarios de gas natural a nivel nacional, proporcionados por Gasoducto Cruz del Sur, y considerando que el hidrógeno se obtiene por hidrólisis, se evalúa cómo impactaría en la demanda energética eléctrica y también en la importación de gas natural, la adición de hidrógeno en distintos niveles.

A partir de los consumos diarios de tres años (2021 a 2023) se determinaron los consumos mensuales y el promedio mensual del período. Los consumos volumétricos utilizados se estandarizaron a un valor de poder calorífico de referencia (9300 kcal/Sm^3); esto se realiza para tener una métrica adecuada con respecto al estándar de calidad impuesto, ya que la tarifa del consumo se ajusta según el valor de poder calorífico del gas consumido.

Con los mismos argumentos de intercambiabilidad anteriormente discutidos, el aporte energético de dos gases intercambiables debe ser igual, o al menos semejante. En la ecuación 4.1 se describe el aporte energético por un volumen de gas.

$$E = (PCS \cdot V)_{gas} = cte. \quad (4.1)$$

Bajo la premisa de imponer la igualdad de aporte energético, es decir, satisfacer la misma demanda de energética, y sabiendo que el poder calorífico de la mezcla de gas natural con hidrógeno disminuye con el aumento de este último, para entregar la misma energía se deberá aumentar el volumen total de gas (mezcla) suministrado.

Por otro lado, realizando mezclas volumétricas de gas es sencillo observar las relaciones:

$$V_{GN} = (1 - x) \cdot V_{gas} \quad (4.2)$$

$$V_{H_2} = (x) \cdot V_{gas} \quad (4.3)$$

Donde x es la fracción volumétrica o molar de hidrógeno en la mezcla. En la figura 4.1 se presenta el consumo mensual esperado de gas natural en Sm^3 al adicionar hidrógeno; basado en los requerimientos de años anteriores. La curva correspondiente a 0% de H_2 representa el consumo de gas natural promedio de cada mes. A medida que aumenta la fracción de H_2 en la mezcla se reduce el consumo de GN, aunque no en la misma proporción debido a que el PCS de ambos gases es diferente.

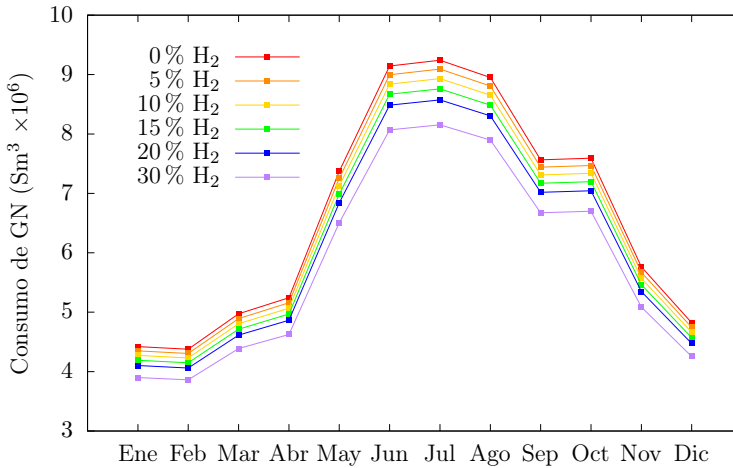


Figura 4.1: Consumo mensual de gas natural cuando el mismo se mezcla con hidrógeno en distintas fracciones.

Tal como es de esperarse, el gráfico muestra instancias en el año en las que la demanda es notablemente superior. Esto ocurre en los meses de invierno, principalmente junio y julio, cuando el clima es frío y el consumo de gas natural a nivel residencial aumenta considerablemente, principalmente por motivos de acondicionamiento térmico.

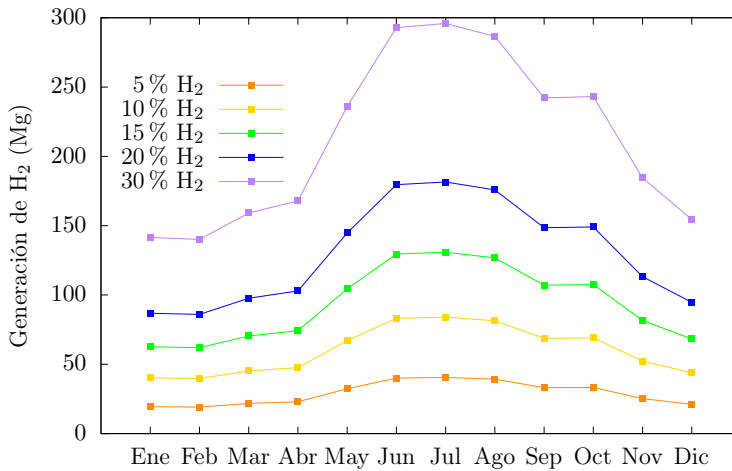


Figura 4.2: Generación de hidrógeno en masa, mes a mes, según la fracción agregada en la mezcla.

Las cantidades de hidrógeno necesarias para satisfacer la demanda mensual, en función de la fracción de dicho gas en la mezcla, se representan en el gráfico de la figura 4.2. Se observan momentos del año, como en invierno, en los cuales la demanda de hidrógeno se duplica respecto al consumo del valle, como muestra ser los meses de verano.

Considerando que el hidrógeno a inyectar en la red de gas natural se obtiene por electrólisis de agua, es posible determinar el consumo de energía eléctrica necesaria para satisfacer dicha demanda. Idealmente, para generar 1kg de hidrógeno a 25°C y 1atm se necesitan 8.9kg de agua líquida y 39kWh de energía, la cual es empleada para romper los enlaces en la molécula. Sin embargo, estos procesos siempre tienen ineficiencias que hacen que el rendimiento, referido al poder calorífico superior del hidrógeno, sea entre 50 y 85 %, bajo el uso de electrolizadores actuales [64, 65]. Debido a esto, para determinar la demanda de energía eléctrica se considera que el requerimiento es de 50kWh/kg. En la figura 4.3 se presenta la demanda de energía eléctrica mensual requerida para diferentes fracciones de hidrógeno en la mezcla.

El consumo eléctrico anual del Uruguay, promedio para el período 2021-2023, fue de 12155GWh. Además, la generación de hidrógeno, considerando una mezcla de 20 %, requeriría un consumo eléctrico de 78GWh al año. Por lo tanto, la generación de hidrógeno para ser inyectado en la red de gas natural repercutiría en un aumento de 0.64 % del consumo total de energía eléctrica. Respecto a los excedentes de energía eléctrica, o más precisamente respecto a

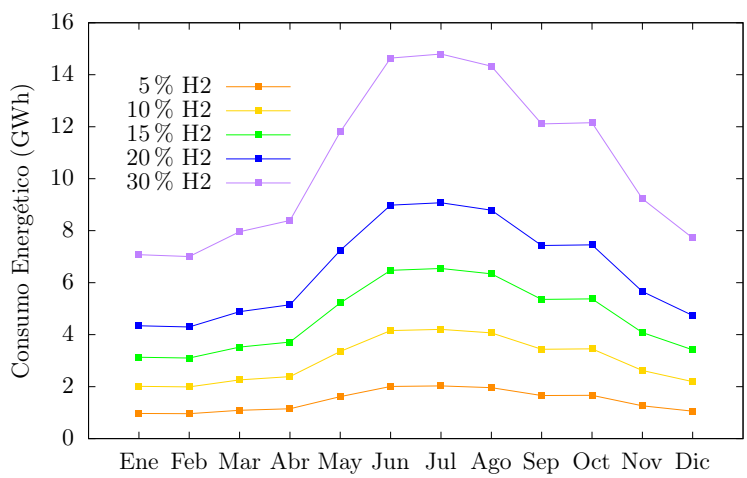


Figura 4.3: Consumo energético (GWh), mes a mes, según la fracción agregada en la mezcla.

Tabla 4.1: Ahorro anuales de emisiones de CO₂, según la fracción de hidrógeno en la mezcla.

	% H ₂	5	10	15	20	30
Ahorro de CO ₂ (Mg)		2526	5239	8161	11316	18448
Ahorro respecto al sector residencial (%)		0.66	1.38	2.14	2.97	4.85
Ahorro respecto al sector industrial (%)		0.25	0.51	0.80	1.10	1.80
Ahorro respecto a emisión total nacional (%)		0.03	0.07	0.11	0.16	0.25

la energía exportada en los años 2022 y 2023, el consumo de energía para la producción de H₂ significaría 5.5 % o 32 % respectivamente.

Por otro lado, a partir de los resultados expresados en la figura 4.1, calculando la diferencia entre la curva a 0 % de H₂ (gas natural puro), y otra a un nivel dado, se obtiene el ahorro en gas natural, es decir, gas natural que no se quema, y consecuentemente ahorro en emisiones de dióxido de carbono y gases de efecto invernadero. Esto permite cuantificar una de las ventajas del hidrógeno verde para reducir emisiones. La evolución mensual de ahorro de emisiones se presenta en la figura 4.4. Por ejemplo, inyectando H₂ hasta alcanzar un 20 % en la mezcla genera un ahorro de 7.2 % en la importación de GN.

Considerando el ahorro potencial anual de emisiones de GEI, comparado con las emisiones generadas actualmente en el país, la inyección de H₂ a la red de gas natural no genera ahorros significativos. En la tabla 4.1 se presentan los

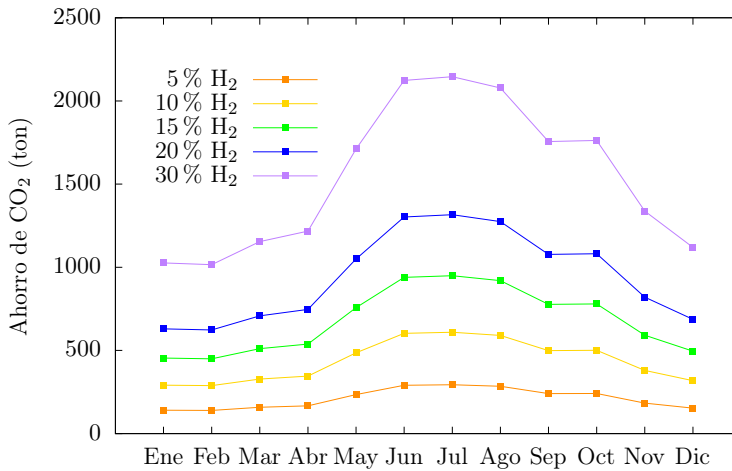


Figura 4.4: Cantidad de dióxido de carbono no emitido, mensualmente, de acuerdo a los ahorros de GN generados por la adición de distintos porcentajes de hidrógeno.

resultados de ahorro de CO₂ en función de la fracción de hidrógeno, así como el ahorro porcentual respecto a las emisiones de CO₂ generadas en el sector residencial, industrial y total nacional. La principal razón del bajo impacto de esta medida es el bajo consumo de gas natural sumado a que el gas natural es el hidrocarburo de menores emisiones de CO₂ por unidad de energía.

Nótese que este cálculo de ahorro de emisiones de CO₂ contabiliza únicamente las emisiones generadas en la combustión de los gases, dejando por fuera emisiones de gases de efecto invernadero vinculadas a otras etapas del proceso, como la producción de energía eléctrica, distribución de gas natural, entre otras. Para determinar con mayor severidad los impactos ambientales (entre ellos el aporte al cambio climático) de las distintas alternativas es necesario realizar un análisis de ciclo de vida, el cual considere todas las etapas de los procesos y mayor espectro en impactos analizados.

Capítulo 5

Conclusiones generales

El presente estudio abordó la viabilidad técnica de inyectar hidrógeno verde en la red de gas natural de Uruguay, evaluando aspectos clave como la compatibilidad de materiales, el desempeño de la combustión en aplicaciones residenciales y el impacto en la matriz energética. Las conclusiones principales de cada área de análisis son las siguientes:

Compatibilidad de Materiales

- Se concluye que, desde la estación de transferencia en adelante, los materiales de los ductos son compatibles con mezclas GN+H₂, cumpliendo con las normativas internacionales (ASME B31.12) y garantizando tensiones circunferenciales menores al 30 % del SMYS.
- Sin embargo, la implementación requiere:
 - Inspecciones detalladas para detectar y mitigar fisuras y grietas.
 - Sustitución de componentes no compatibles (ej., materiales metálicos no austeníticos o uniones bridadas antiguas).
 - Actualización de tramos sin historial documentado, asegurando su integridad estructural.
- La experiencia internacional indica que las conversiones deben realizarse de forma gradual, partiendo de mezclas con 2-5 % de H₂ y evaluando fugas tras 3000 horas de operación.

Comportamiento de Combustión e Intercambiabilidad

- Las mezclas GN+H₂ reducen el tiempo de residencia necesario para alcanzar el equilibrio químico y aumentan la velocidad de llama laminar. Este comportamiento mejora la eficiencia de la combustión, pero incrementa el riesgo de calado en altas concentraciones de H₂.
- Se establecieron los siguientes límites de H₂ para garantizar la intercambiabilidad sin modificar equipos domésticos:
 - Mezcla de hasta 9 % en volumen, segura para cualquier composición de GN.
 - Fracciones de hasta 11 % en volumen, seguras el 99.5 % de los días del año.
 - Fracción de hasta 20 % en volumen, segura para la composición promedio del GN.
- Estudios de simulación (CRFD) confirmaron que el H₂ altera la estructura de la llama, haciéndola más corta y desplazando las zonas de alta temperatura hacia la salida del quemador, lo que es compatible con el fenómeno de *flashback*.
- En pruebas experimentales realizadas en un mechero Bunsen con dosificación de aire primario controlado, se ensayaron de forma satisfactoria mezclas con hasta un 50 % de H₂, las cuales mantuvieron estabilidad de llama, sin presencia de puntas amarillas ni ocurrencia de *flashback*, con emisiones de CO menores a 4 ppm. La velocidad de llama laminar, determinada a partir de la sombra del cono, constató la tendencia creciente de la velocidad tanto con el aumento de la fracción de H₂ en la mezcla como la proximidad a la premezcla estequiométrica. El aumento progresivo del flujo de aire primario generó el soplado de la llama.

Impacto en la Matriz Energética

- La inyección de H₂ en la red de GN reduciría la importación de gas natural y las emisiones de CO₂ derivadas de su combustión, aunque su impacto global es limitado debido al bajo consumo de GN en Uruguay.
- Inyectar un 20 % de H₂ generaría:
 - Un ahorro del 7.2 % en importación de GN.

- Una reducción del 2.97 % en emisiones de CO₂ respecto al generado por el sector residencial o del 0.16 % respecto a las emisiones nacionales totales.
- La producción de H₂ mediante electrólisis requeriría un consumo eléctrico adicional de 78 GWh/año para una mezcla al 20 %, representando un aumento del 0.64 % en la demanda eléctrica nacional actual.

Consideraciones Finales

- La inyección de hidrógeno verde en la red de gas natural es técnicamente viable en Uruguay, pero requiere adaptaciones específicas en infraestructura, protocolos de seguridad y monitoreo constante.
- Si bien los beneficios en términos de reducción de emisiones son modestos, la propuesta fortalece la integración de hidrógeno como vector energético y apoya la descarbonización progresiva del país.
- Se recomienda complementar este estudio con un análisis de ciclo de vida para evaluar de manera integral los impactos ambientales y socioeconómicos del uso de mezclas GN+H₂ en la red.
- Finalmente, la implementación de proyectos piloto, en zonas donde se pueda aislar ciertos sectores de la red de distribución, permitiría validar estos hallazgos en condiciones reales, identificando limitaciones operativas y optimizando el diseño para escalas mayores.

Bibliografía

- [1] University of Oxford. Our world in data - energy - energy mix. <https://ourworldindata.org/energy-mix>, 2021.
- [2] Luís Augusto Barbosa Cortez, Electo Eduardo Silva Lora, and Edgardo Olivares-Gómez. *Biomassa para energia*. Editora da Unicamp, 2008.
- [3] Naciones unidas. Objetivos de desarrollo sostenible. www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/, 2019.
- [4] M. R. Allen, O. P. Dube, W. Solecki, F. Aragón-Durand, W. Cramer, S. Humphreys, M. Kainuma, J. Kala, N. Mahowald, Y. Mulugetta, R. Perez, M. Wairiu, and K. Zickfeld. Global warming of 1.5°C. an ipcc special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Technical report, Cambridge University Press, 2018.
- [5] DNE-MIEM. Balance energético 2019, 2019.
- [6] Irfan Ahmad Gondal. Hydrogen integration in power-to-gas networks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44:1803–1815, 2019.
- [7] Alberto Benato and Anna Stoppato. Pumped thermal electricity storage: A technology overview. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6:301–315, 2018.
- [8] Harmen de Vries, Anatoli V. Mokhov, and Howard B. Levinsky. The impact of natural gas/hydrogen mixtures on the performance of end-use equipment: Interchangeability analysis for domestic appliances. *Applied Energy*, 208:1007–1019, 2017.

- [9] M. Melaina, O. Antonia, and M. Penev. Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: A review of key issues. *Contract*, 303:275–3000, 2013.
- [10] Mohamed A. Habib, Gubran A.Q. Abdulrahman, Awad B.S. Alquaity, and Naef A.A. Qasem. Hydrogen combustion, production, and applications: A review. *Alexandria Engineering Journal*, 100:182–207, 2024.
- [11] H. Mathurkar. *Minimum ignition energy and ignition probability for Methane, Hydrogen and their mixtures*. PhD thesis, Loughborough University, 2009.
- [12] Hydrogen odorant. Technical report, BEIS, 2019.
- [13] Burcin Cakir Erdener, Brian Sergi, Omar J. Guerra, Aurelio Lazaro Chueca, Kwabena Pambour, Carlo Brancucci, and Bri Mathias Hodge. A review of technical and regulatory limits for hydrogen blending in natural gas pipelines, 2 2023.
- [14] José Ovejero García. *DOCUMENTOS IEDS SOBRE CIENCIA Y TECNOLOGÍA*. 2016.
- [15] Julio C. Villalobos, Adrian Del-Pozo, Bernardo Campillo, Jan Mayen, and Sergio Serna. Microalloyed steels through history until 2018: Review of chemical composition, processing and hydrogen service. *Metals*, 2018.
- [16] M W Melaina, O. Antonia, and M. Penev. Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: A review of key issues. technical report nrel/tp-5600-51995, national renewabler energy laboratory. *Contract*, 303, 2013.
- [17] S. Castagnet, J.C. Grandidier, M. Comyn, and G. Benoît. Mechanical testing of polymers in pressurized hydrogen: Tension, creep and ductile fracture. *Experimental Mechanics*, 52:229–239, 2012.
- [18] KJ Alvine, TA Kafentzis, SG Pitman, KI Johnson, D Skorski, JC Tucker, TJ Roosendaal, and ME Dahl. An in situ tensile test apparatus for polymers in high pressure hydrogen. *The Review of Scientific Instruments*, 85:105110, 2014.
- [19] Sylvie Castagnet, Jean-Claude Grandidier, Mathieu Comyn, and Guillaume Benoît. Hydrogen influence on the tensile properties of mono and multi-layer polymers for gas distribution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(14):7633–7640, 2010.

- [20] M.H. Klopffer, P. Berne, S. Castagnet, M. Weber, G. Hochstetter, E. Espuche, and I. Lyon. Polymer pipes for distributing mixtures of hydrogen and natural gas: Evolution of their transport and mechanical properties after an ageing under an hydrogen environment. In *18th World Hydrogen Energy Conference*, 2010.
- [21] N. C. Menon, A. M. Kruizenga, A. Nissen, K. Brooks, K. J. Alvine, and C. S. Marchi. Behaviour of polymers in high pressure environments as applicable to the hydrogen infrastructure. In *Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference*, 16, 2016.
- [22] American Petroleum Institute. Specification 5l line pipe, 46th ed., 2018.
- [23] ASTM International. Standard specification for pipe, steel, black and hot-dipped, zinc-coated, welded and seamless, 2018.
- [24] ASTM International. Standard specification for seamless carbon steel pipe for high-temperature service, 2022.
- [25] American Society of Mechanical Engineers (ASME). Gas transmission and distribution piping systems. ASME code for pressure piping B31, 2010.
- [26] American Society of Mechanical Engineers (ASME). Hydrogen piping and applications. ASME code for pressure piping B31, 2019.
- [27] ASTM International. Standard method for measurement of fracture toughness, 2020.
- [28] Pedro Lam. Gaseous hydrogen effects on the mechanical properties of carbon and low alloy steels. 2006.
- [29] Mariano A. Kappes and Teresa Perez. Hydrogen blending in existing natural gas transmission pipelines: A review of hydrogen embrittlement, governing codes, and life prediction methods, 6 2023.
- [30] European Industrial Gases Association AISBL. EIGA IGC doc 121/14: Hydrogen pipeline systems, 2014.
- [31] Various. Hydrogen pipeline systems. Technical Report HPA-2022-001, European Industrial Gases Association, 2022.
- [32] H.J. Cialone and J.H. Holbrook. Sensitivity of steels to degradation in gaseous hydrogen. *Hydrogen embrittlement: prevention and control*, 1988.

- [33] Andrew Wedgner and Janko König. Permeation studies on polyethylene pipes at different temperatures.
- [34] Miguel Arregui. El clavo histórico del gas por cañería en montevideo. *El Observador*, 5 2019.
- [35] Xiao Xing, Weixing Chen, and Hao Zhang. Atomistic study of hydrogen embrittlement during cyclic loading: Quantitative model of hydrogen accumulation effects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(7):4571–4578, 2017.
- [36] Rodrigo Vásquez Torres, Pablo Tello Guerra, Jose Fuster Justiniano, Rocío Farías Hermosilla, Enrique Espinoza Cáceres, and Nicolás Machuca Lazo. Inyección de H₂ a red de gas natural. Technical report, Ministerio de Energía de Chile, 2021.
- [37] Kevin Topolski, Evan P Reznicek, Burcin Cakir Erdener, Chris W San Marchi, Joseph A Ronevich, Lisa Fring, Kevin Simmons, Omar Jose Guerra Fernandez, Bri-Mathias Hodge, and Mark Chung. Hydrogen blending into natural gas pipeline infrastructure: Review of the state of technology, 2022.
- [38] NGC+ Interchangeability Work Group. White paper on natural gas interchangeability and non-combustion end use, 2005.
- [39] Alexander Shkarovskiy, Anatolii Koliienko, and Vitalii Turchenko. Interchangeability And Standardization Of The Parameters Of Combustible Gases When Using Hydrogen. *Architecture and Engineering*, 7(1):33–45, 2022.
- [40] Keeman Lee, Jong Min Kim, Byeonghun Yu, Chang Eon Lee, and Seungro Lee. Effect of various gas compositions on gas interchangeability and combustion characteristics for domestic appliances. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27:1191–1201, 2013.
- [41] Juan Manuel Ortiz. Intercambiailidad del gas natural, 2014.
- [42] Stanislav Honus, Shogo Kumagai, Ondřej Němček, and Toshiaki Yoshioka. Replacing conventional fuels in usa, europe, and uk with plastic pyrolysis gases – part i: Experiments and graphical interchangeability methods. *Energy Conversion and Management*, 126:1118–1127, 2016.

- [43] Wanneng Dai, Chaokui Qin, Jixu Tang, Zhaojian Lu, and Zhenqun Li. A study on the interchangeability of biogas-lpg mixed gases with biogas and lpg qualities. *ICMREE2011 - Proceedings 2011 International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment*, 1:280–283, 2011.
- [44] E.R. Weaver. Formulas and graphs for representing the interchangeability of fuel gases. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 46:2193, 1951. Intercambiabilidad de gases.
- [45] David G. Goodwin, Harry K. Moffat, Ingmar Schoegl, Raymond L. Speth, and Bryan W. Weber. Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. <https://www.cantera.org>, 2023. Version 3.0.0.
- [46] Eliseo Ranzi, Carlo Cavallotti, Alberto Cuoci, Alessio Frassoldati, Matteo Pelucchi, and Tiziano Faravelli. New reaction classes in the kinetic modeling of low temperature oxidation of n-alkanes. *Combustion and Flame*, 162:1679–1691, 5 2015.
- [47] ELISEO RANZI, ALESSIO FRASSOLDATI, ALESSANDRO STAGNI, MATTEO PELUCCHI, ALBERTO CUOCI, and TIZIANO FARAVELLI. Reduced kinetic schemes of complex reaction systems: Fossil and biomass-derived transportation fuels. *International Journal of Chemical Kinetics*, 46:512–542, 9 2014.
- [48] Warumporn Pejpichestakul, Eliseo Ranzi, Matteo Pelucchi, Alessio Frassoldati, Alberto Cuoci, Alessandro Parente, and Tiziano Faravelli. Examination of a soot model in premixed laminar flames at fuel-rich conditions. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37:1013–1021, 2019.
- [49] Junfeng Zhang and Kirk R. Smith. Emissions of carbonyl compounds from various cookstoves in china. *Environmental Science & Technology*, 33:2311–2320, 7 1999.
- [50] Parag Rajpara, Rupesh Shah, and Jyotirmay Banerjee. Effect of hydrogen addition on combustion and emission characteristics of methane fuelled upward swirl can combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43:17505–17519, 9 2018.
- [51] Hejitian Pan, Sajie Geng, Huan Yang, Guohong Zhang, Hao Bian, and Yinhe Liu. Influence of h2 blending on nox production in natural gas combustion: Mechanism comparison and reaction routes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48:784–797, 1 2023.

- [52] Madeleine L. Wright and Alastair C. Lewis. Emissions of no *<i>x</i>* from blending of hydrogen and natural gas in space heating boilers. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 10, 5 2022.
- [53] S.R. Turns. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. McGraw-Hill Education, 2011.
- [54]
- [55] Chuanzhi Luo, Zongming Yu, Yue Wang, and Yuhua Ai. Experimental investigation of lean methane–air laminar premixed flames at engine-relevant temperatures. *ACS Omega*, 6:17977–17987, 7 2021.
- [56] Zhi Guang Chen, Chao Kui Qin, Yang Jun Zhan, and Ju Qiu. Analysis of chinese natural gas interchangeability predicted by weaver indices. *Advanced Materials Research*, 724-725:1017–1020, 8 2013.
- [57] Daniel A Flórez-Orrego. Métodos para el estudio de la intercambiabilidad de una mezcla de gas natural y gas natural-syngas en quemadores de premezcla de régimen laminar: Un artículo de revisión.
- [58] C.Z. Cludi. *HPA Adsorvido e Morfologia de Materiais Particulados Resultantes de Processos de Combustão*. Master’s thesis, Universidade de Campinas, 2003.
- [59] Ansys. Ansys® academic research fluent, release 23.2.0, 2023.
- [60] Beth Anne V. Bennett, Charles S. McEnally, Lisa D. Pfefferle, and Mitchell D. Smooke. Computational and experimental study of axisymmetric coflow partially premixed methane/air flames. *Combustion and Flame*, 123:522–546, 2000.
- [61] Ansys. Ansys fluent theory guide, Jul 2023.
- [62] Yangjun Zhang, Chaokui Qin, Huijuan Xing, and Pengjun Liu. Experimental research on performance response of domestic gas cookers to variable natural gas constituents. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 10:41–50, 2013.
- [63] Xinyi Zhan, Zhiguang Chen, and Chaokui Qin. Effect of hydrogen-blended natural gas on combustion stability and emission of water heater burner. *Case Studies in Thermal Engineering*, 37:102246, 2022.

- [64] B Kroposki, J Levene, K Harrison, P K Sen, and F Novachek. Electrolysis: Information and opportunities for electric power utilities. 9 2006.
- [65] S. Shiva Kumar and V. Himabindu. Hydrogen production by pem water electrolysis – a review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3):442–454, 2019.
- [66] Riccardo Amirante, Elia Distaso, Paolo Tamburrano, and Rolf D. Reitz. Laminar flame speed correlations for methane, ethane, propane and their mixtures, and natural gas and gasoline for spark-ignition engine simulations. *International Journal of Engine Research*, 18:951–970, 11 2017.

Apéndice A

Determinación experimental de la velocidad de llama y razón de equivalencia

Para cada condición de funcionamiento del mechero Bunsen se puede determinar la razón de equivalencia del quemador relacionando la velocidad de llama laminar calculada por dos métodos, experimental y empíricamente, ambas dependientes de la riqueza.

Por un lado se puede determinar la velocidad de llama laminar de forma experimental, a partir del procesamiento de imágenes del cono formado por la llama en un mechero Bunsen, según se detalla en la sección 3.7. El caudal de mezcla que sale del quemador está compuesto por gas natural y el caudal de aire asociado, el cual que dependerá de la razón de equivalencia que se busca determinar. El mismo se puede escribir según la ecuación A.1.

$$\dot{V}_{tot} = \dot{V}_{fuel} \left(1 + \frac{4,76\alpha_q}{\phi} \right) \quad (\text{A.1})$$

Donde α_q es la relación molar entre oxígeno y combustible para el caso estequiométrico. De este modo, determinando el ángulo θ a partir del tratamiento de imágenes se obtiene una correlación entre S_L y ϕ .

Por otro lado, existen correlaciones empíricas que relacionan ambos parámetros, como la presentada por Amirante et al. [66] (ecuación A.2).

$$S_{L0} = (1 + \nu\chi_1^{\tau_1}) (1 + \nu\chi_2^{\tau_2}) W \phi^{\eta(1-\chi_1)^{\epsilon_1}(1-\chi_2)^{\epsilon_2}} e^{-\xi(\phi-\sigma-\Omega_1\chi_1-\Omega_2\chi_2)^2} \quad (\text{A.2})$$

Donde $\nu, \chi, \tau, \eta, \epsilon, \zeta, \sigma, \Omega$ son constante asociadas a los gases. Aquellas sin sub-índices corresponden a metano, mientras que las que tienen subíndice 1 y 2 corresponden a etano y propano, respectivamente.

Finalmente, la velocidad de llama se calcula según la ley de potencias A.3.

$$S_{L0}(\phi) = S_{L0}(\phi, \chi_1, \chi_2) \left(\frac{T_u}{T_o} \right)^\alpha \left(\frac{P_u}{P_o} \right)^\beta \quad (\text{A.3})$$

Donde T_u, P_u son la temperatura y presión de los reactivos, T_o, P_o son las temperatura y presión de referencia, α, β son polinomios de segundo grado en ϕ .

Para la condición de apertura máxima de quemador se cuantificó un flujo de gas natural de 52 l/h, generando un ángulo θ de 15° , dando como resultado de este análisis una riqueza aproximada de 1,25 como solución. Se destaca que la ecuación contiene en realidad dos soluciones, donde la segunda es próxima al estequiométrico y se descartó como la posible solución dado que haciendo las simulaciones se demostró que bajo dichas condiciones la llama se sopla.