

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE



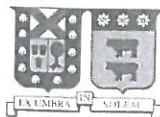
**“Investigación experimental de las zonas de estabilidad
para la combustión de amoniaco en un quemador de
medio poroso inerte”**

MIGUEL ANGEL GRANDÓN DUHALDE

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO T.
PROFESOR CORREFERENTE: DR. (C) CLAUDIO MUÑOZ H.**

SEPTIEMBRE – 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Investigación experimental de las zonas de estabilidad para la combustión de amoníaco en un quemador de medio poroso inerte

Nombre del candidato(a): Miguel Angel Grandón Duhalde

Carrera / Grado: Ingeniero civil mecánico

Campus: Santiago San Joaquín ; **Departamento:** Departamento de ingeniería mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mario Toledo Torres, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 23/09/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 23/09/2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi familia. A mis padres Pedro y Jacqueline por estar siempre presentes en toda mi educación, desde preescolar hasta la educación superior que finalizo con este trabajo. Las enseñanzas que me han brindado son las que me han permitido llegar hasta este punto y ser la persona que soy. Agradecer a mi hermana, que ha formado parte importante de mi vida y siempre nos hemos apoyado mutuamente en situaciones difíciles.

Quiero agradecer a mi polola Sofía, junto a ella pasé gran parte del tiempo que tomó redactar este escrito y fuimos los dos quienes nos acompañamos y motivamos mutuamente mientras escribíamos nuestros respectivos trabajos de fin de grado.

Agradecer a mis profesores Mario Toledo y Claudio Muñoz que siempre se mostraron con la mejor disposición para enseñarme, apoyarme y guiarme en este trabajo. Son excelentes profesionales y docentes, pero sobre todo son grandes personas.

Agradezco profundamente a todo el equipo del LER y particularmente del Laboratorio de Combustión de Amoníaco. A Christian, Paula y el profesor José Duque. Quiero agradecerles su disposición, sus enseñanzas y principalmente su confianza en mí para llevar a cabo las pruebas realicé. Sin ellos este trabajo no habría sido posible.

Finalmente quiero agradecer a mis amigos y colegas que hice a lo largo de toda la universidad. A la “Squad” que siempre estuvo presente en las buenas y en las malas. En celebraciones y en situaciones difíciles. Todos ellos han contribuido en mi formación humana y profesional.

Resumen

En el año 2040, las centrales térmicas a carbón deben ser retiradas o reconvertidas en Chile. Por ello, la industria y la comunidad científica está desarrollando tecnologías que permitan mantener un suministro confiable de energía eléctrica y resiliente frente a la intermitencia de las energías renovables. El presente trabajo se enmarca en el proyecto FONDEF-IDeA ID23I10331: “Prototipo de quemador dual de amoníaco-hidrógeno verde para la descarbonización del sector de generación eléctrica” y aporta al desarrollo de tecnología para el reemplazo del carbón en la generación eléctrica.

Este trabajo se centró en el estudio experimental del proceso de combustión de amoníaco en dos quemadores de medio poroso inerte, uno de cuarzo y otro de acero. Las pruebas realizadas tuvieron como objetivo determinar las zonas estables de operación y los niveles de emisión de CO, NO_x y NH₃.

La estabilidad de la combustión se midió en base al comportamiento del frente de llama. Para mezclas con bajo porcentaje de NH₃ (10%), se generó una zona de estabilidad limitada por flashback en relaciones de equivalencia altas. Con mayor presencia de amoníaco (50%), se redujo el rango estable y se observó desconfinamiento de llama o blow out. La zona de mayor estabilidad para operar con amoníaco se dio en 30% de NH₃. La temperatura más alta se dio en el quemador de acero, con una mezcla de 3 gases con 70% de NH₃ y 10% de H₂, con $\phi=0,9$ en donde se alcanzó más de 1600 °C con una potencia de 2 kW.

Para el caso del quemador de acero las emisiones muestran un incremento del CO al quemar NH₃ con CH₄ (40-290 ppm (@15%O₂)) versus hidrógeno con metano (50-130 ppm (@15%O₂)). Los NO_x disminuyeron a medida que aumentó la concentración de NH₃ en la mezcla y el amoníaco no quemado aumentó al haber mayor concentración de NH₃ en el combustible. Para combustión de metano-amoníaco, con 50% de NH₃ los NO_x fueron de 7200 ppm (@15%O₂) y el NH₃ fue 1100 ppm. Con 90% de NH₃, el nivel de NO_x fue de 2170 ppm (@15%O₂), mientras que las emisiones de NH₃ fueron de 9700 ppm (@15%O₂).

A modo de conclusión, los niveles de emisión de amoníaco son mucho mayores a las 35 ppm que una persona puede estar expuesta por un corto período de tiempo, sin embargo, este trabajo marca un precedente al lograr combustionar de forma estable distintas mezclas de amoníaco con hidrógeno y deja el desafío de seguir mejorando el diseño para lograr menores niveles de emisión.

Abstract

In 2040, all the thermoelectric plants working with coal will be retired or reconverted in Chile. For that reason, the industry and the scientific community are developing technologies which can sustain a reliable source of electric energy and resilient to the intermittence of the renewable energies. The present work is framed in the project FONDEF-IDeA ID23I10331: “Prototype of dual burner of ammonia-hydrogen to decarbonize the electricity generation sector” and contributes to the development of new technology to replace coal in the energy generation industry.

This work is centered in the development of experimental test of combustion of ammonia in two porous media burners, one made of quartz and the other from steel. The tests have the objective of study the stable zone of operation and measure the emissions of CO, NO_x y NH₃.

The stability of combustion was measured based on the behavior of the flame front. For low ammonia blends, the operational range was limited by flame extinction and by flashback in equivalence ratio. With more percentage of ammonia (50%) the stable zone was reduced, blow out was observed. The most stable point to operate with ammonia was 30% of the mixture. The highest temperature was in the stainless-steel burner with a blend of 3 gases with 70% of NH₃, where the temperature reached 1600 °C.

Emission results show an increase of CO when burn ammonia with methane (50-290 ppm (@15%O₂)) versus hydrogen with methane (50-130 ppm (@15%O₂)). The NO_x decreased as the NH₃ concentration increased in the blend and with higher concentration of NH₃ in the fuel the unburned ammonia increased. For methane-ammonia combustion, with 50% of NH₃, the NO_x was 7200 ppm (@15%O₂) and de NH₃ reached 1100 ppm (@15%O₂). With 90% of NH₃, the level of NO_x was 2170 ppm (@15%O₂) while the NH₃ emissions where 9700 ppm (@15%O₂).

In conclusion, the emission levels of ammonia are much higher than the 35 ppm to which a person can be exposed in a short period of time, however this study set a

precedent in Chile by achieving stable combustion of ammonia and hydrogen blends and bring the challenge to improve the design to lower the emissions.

Glosario

Elementos químicos:

C₂H₆: Etano

CH₄: Metano

CO₂: Dióxido de carbono

H₂: Hidrógeno molecular

N₂: Nitrógeno molecular

NH₃: Amoníaco

NO: Monóxido de nitrógeno

NO_x: Óxidos de nitrógeno

O₂: Oxígeno molecular

Otras abreviaciones:

EPP: Elemento de Protección Personal

H₂V: Hidrógeno verde

HR: Humedad Relativa

Hp: Caballo de fuerza

MM: Masa molar

MPI: Medio poroso inerte

$\dot{m}_{\text{flux}}$: Flujo másico específico

PCI: Poder Calorífico Inferior

PCS: Poder Calorífico Superior

PEMFC: Celdas de membrana de intercambio de protones (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

ppi: Poros por pulgada cuadrada (Pores per square inch)

ppm: Parte por millón

R_{ac} : Relación aire-combustible

rpm: Revoluciones por minuto

R_u : Constante universal de los gases ideales

SGA: Sistema Globalmente Armonizado

slpm: Litro estándar por minuto (Standard Liters Per Minute)

SOFC: Celda de óxido sólido (Solid Oxide Fuel Cell)

USD: Dólar estadounidense

φ : Relación de equivalencia

Índice

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract	iv
Glosario	v
Índice	vii
1 Introducción	1
1.1 Objetivo general	4
1.2 Objetivos específicos	4
2 Marco teórico	5
2.1 Combustión	5
2.2 Combustibles	6
2.2.1 Metano	7
2.2.2 Hidrógeno	7
2.2.3 Amoníaco	9
2.2.4 Propiedades de los combustibles	11
2.3 Ecuaciones de combustión	11
2.4 Quemador	15
2.4.1 Quemador de medios porosos	15
2.5 Regímenes de operación en quemador de medios porosos	18
2.6 Revisión de trabajos recientes	19
3 Diseño y procedimiento experimental	23
3.1 Consideraciones en el manejo de gases	23
3.1.1 Elementos de protección personal	24

3.2	Diseño del laboratorio	27
3.2.1	Sistemas de extracción de aire	29
3.2.2	Sistema de alimentación de gases combustibles	30
3.3	Set up experimental	32
3.4	Descripción del procedimiento experimental	46
3.5	Experimentos realizados en quemador de cuarzo	49
3.6	Experimentos realizados en el quemador de acero.....	50
3.7	Procedimiento de procesamiento de datos.....	51
3.7.1	Temperatura	52
3.7.2	Emisiones de gases (CO, NO _x , NO y O ₂).....	52
3.7.3	Emisiones de NH ₃ no quemado (slip)	53
4	Presentación y análisis de resultados	54
4.1	Quemador de cuarzo	54
4.1.1	Zonas de estabilidad operacional	54
4.1.2	Temperaturas alcanzadas por los puntos estables	57
4.1.3	Emisiones de gases.....	61
4.2	Quemador de acero inoxidable	62
4.2.1	Máximos alcanzados y perfiles de temperatura	62
4.2.2	Niveles de emisión de gases.....	68
5	Conclusiones y recomendaciones	76
	Bibliografía	79
	ANEXOS	84
	Anexo 1:	84
	Anexo 2	85

Anexo 3	89
Anexo 4	90
Anexo 5	92
Anexo 6	94
Anexo 7	95

1 Introducción

Según la NASA, el año 2024 fue el año más cálido desde que comenzaron los registros de temperatura de la tierra (NASA, 2025). El mundo se acerca mucho más rápido de lo esperado a superar el límite de 1,5 °C acordado en el acuerdo de París de 2015 (ONU, 2015). En Chile, se han tomado medidas por parte del Estado para enfrentar esta crisis, dentro de las que prima reducir las emisiones del sector de generación eléctrica, en particular las centrales térmicas a carbón. Por otro lado, se ha visto un aumento de instalaciones de energía solar, tanto fotovoltaicas como de concentración, y eólicas, las cuales contribuyen a la reducción en la cantidad de gases efecto invernadero emitidos a la atmósfera. La asociación gremial de Generadoras de Chile tiene estadísticas anuales sobre la energía generada por las distintas fuentes. En la Figura 1 se muestra el aumento de las energías renovables no convencionales, el 2014 solo el 2,7% de toda la generación eléctrica en Chile provenía de estas fuentes, mientras que en el 2023 este número aumentó a 31,6%. Sin embargo, las energías renovables tienen un problema y es la variabilidad con que entregan su energía. La intensidad del viento no es constante y el sol, si bien tiene ciclos más previsibles, es en la noche cuando se tiene la mayor demanda de energía eléctrica y las centrales solares no generan.

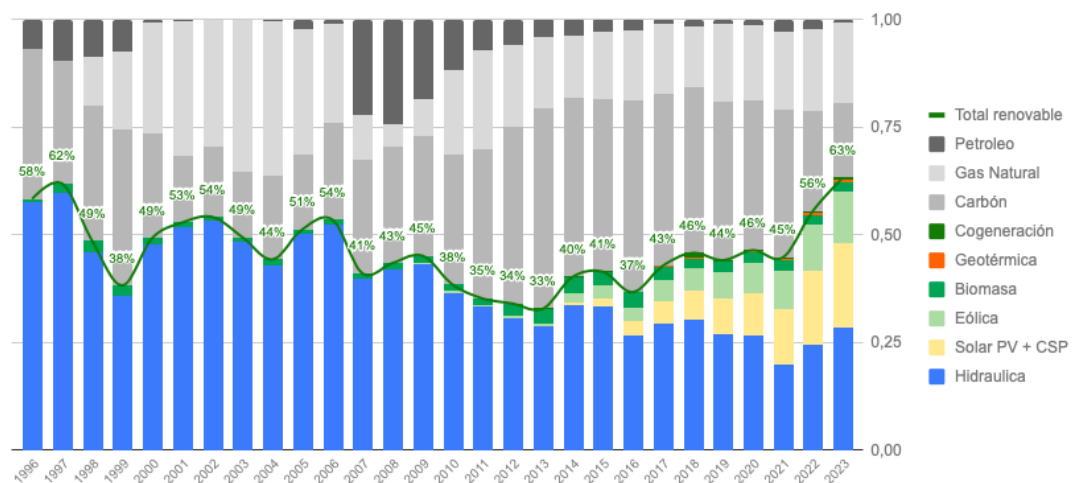


Figura 1: Gráfico de participación relativa en el mercado eléctrico por fuente de generación (Generadoras de Chile, 2024).

Si bien es un aumento prometedor, todavía existe un 36,7% que corresponde a combustibles fósiles: gas natural (18,9%) y carbón (17,2%) (Generadoras de Chile, 2024). De las fuentes de energías anteriores, el carbón es el más contaminante y se espera que para el año 2040 todas las centrales de este tipo sean retiradas o reconvertidas (Ministerio de Energía, 2020).

De las 28 termoeléctricas que operaban en Chile en el año 2019 ya se han cerrado 11 y 9 están programadas para cierre o reconversión antes de diciembre de 2025. Sin embargo, existen 8 centrales que todavía no tienen fecha exacta de cierre. Éstas están ubicadas en Mejillones (2), Coronel (1) y en Huasco (5). Sin embargo, las empresas involucradas junto con otras organizaciones se encuentran trabajando para adelantar 10 años el cierre de todas las centrales a carbón (Fajardo, 2024)

Dentro de ellas, las centrales operadas por Guacolda, en Huasco, planean convertirse durante los próximos años a una central mixta que opere con carbón y con amoníaco verde, lo que permitiría reducir las emisiones de gases efecto invernadero antes de ser retirada del mercado eléctrico nacional.

Frente a esta problemática que involucra una reducción en las emisiones de CO₂ y un aumento en la confiabilidad de la red eléctrica para responder a cambios en la demanda, los combustibles limpios se presentan como los candidatos ideales que son capaces de resolver ambos desafíos.

Los combustibles limpios se definen los como los que su producción y combustión son neutras o incluso negativas en términos de emisiones de carbono (SoCalGas, 2021). Dentro de estos combustibles se encuentra el hidrógeno verde, el amoníaco verde o el gas natural renovable.

El hidrógeno verde, es probablemente el combustible limpio que ha acaparado la mayoría de la atención a nivel nacional. Tanto así que existe una iniciativa gubernamental para fomentar la producción en suelo nacional. Esta es la llamada “Estrategia nacional de hidrógeno verde”, documento elaborado por el ministerio de energía y que en sus 5 capítulos explica la oportunidad que tiene Chile con este

combustible y el plan de acción que se debe llevar a cabo para convertirse en un líder mundial en su producción (Ministerio de Energía, 2020). El hidrógeno verde es la molécula gaseosa de hidrógeno (H_2) pero producida de forma que no se liberan gases de efecto invernadero, principalmente CO_2 , en su proceso de obtención.

El amoníaco verde es otro combustible limpio a destacar. Tiene un origen similar al hidrógeno verde, pues la forma convencional de producir amoníaco es mediante el proceso de Haber-Bosch, el cual utiliza el nitrógeno separado del aire e hidrógeno, siendo la producción de hidrógeno el proceso que concentra el consumo de combustibles fósiles. Por ende, a partir de H_2V , también se genera amoníaco verde (Sauma, 2023). El amoníaco al igual que el H_2V , no posee carbono en su estructura química por lo que no emite CO_2 en su combustión.

Por su parte, el gas natural renovable es un gas obtenido de fuentes no fósiles, en particular producto de descomposición de materia orgánica. El proceso de su obtención es a través del biogás, que es una mezcla de gases producto de la digestión anaeróbica de materia orgánica. Este gas luego es purificado para eliminar el contenido de otros gases, y se puede usar como sustituto al gas natural (Environmental Protection Agency, 2024).

Sin embargo, no es sencillo implementar de la noche a la mañana plantas termoeléctricas a amoníaco, hidrógeno, o biogas. El hidrógeno y el amoníaco, son combustibles que su interés se ha despertado en los últimos 10 años, y no cuentan con experiencia de uso a gran escala. Además son muy caros en comparación al carbón o al gas natural.

Para hacer más gradual la transición energética, es viable utilizar mezclas de combustibles, de forma de abaratar precios y comprender mejor la operación con amoníaco e hidrógeno. Estas mezclas permiten desarrollar tecnología de forma gradual y aumentar de forma progresiva la cantidad de amoníaco/hidrógeno en el combustible. Una tecnología que se ajusta a esta necesidad, son los quemadores de medios porosos inertes, que mejoran la combustión en general y se ha probado que funcionan para estos combustibles.

El gas natural ya es considerado hoy en día como un combustible de transición hacia una economía más verde. Si bien sigue siendo un combustible fósil, es más limpio que el carbón y el petróleo.

Es en este contexto que se enmarca el proyecto: “Prototipo de quemador dual de amoniaco-hidrógeno verde para la descarbonización del sector de generación eléctrica”, junto con las pruebas experimentales a llevar a cabo en este trabajo de título.

1.1 Objetivo general

En el marco del proyecto FONDEF-IDeA ID23I10331 denominado “*Prototipo de quemador dual de amoniaco-hidrógeno verde para la descarbonización del sector de generación eléctrica*” el presente trabajo de título tiene como objetivo general investigar experimentalmente las zonas de operación estable para la combustión de amoniaco en un quemador de medio poroso inerte, caracterizándolas mediante parámetros como la relación de equivalencia y el flujo másico específico.

1.2 Objetivos específicos

1. Reconocer el estado del arte para los procesos de combustión de amoniaco en reactores de medio poroso inerte.
2. Realizar pruebas experimentales de combustión de amoniaco, y sus mezclas con hidrógeno y metano, en reactor de medio poroso inerte, variando la relación de equivalencia y el flujo másico específico.
3. Determinar zonas de estabilidad para la combustión de amoniaco y sus mezclas, midiendo las temperaturas de combustión y emisiones de gases producto.
4. Analizar los resultados obtenidos y presentar conclusiones.

2 Marco teórico

2.1 Combustión

La combustión es un fenómeno físico que involucra una reacción química altamente exotérmica, compuesta por un dos reactantes, un combustible y un comburente u oxidante. Además, para que exista la reacción de combustión se necesita un tercer elemento, calor. Si desaparece uno de estos tres ingredientes, la reacción de combustión se frena. El estudio de la combustión involucra 4 grandes disciplinas científicas: la termodinámica, la cinética de reacciones, la mecánica de fluidos y los fenómenos de transporte (Law, 2006).

Existen varias formas de clasificar la combustión, las cuales son:

- Combustión de mezcla premezclada o no premezclada. Esta forma de diferenciar describe la manera en que los dos reactantes son llevados a la zona de combustión. Dado que la reacción de combustión ocurre a nivel molecular, variar la forma en que se mezclan los dos flujos de reactantes, tiene repercusiones en la propia reacción como en la forma de la llama. Para combustión premezclada, ambos flujos de reactantes se mezclan a nivel molecular antes de llegar al frente de combustión. Esto propicia una combustión completa, en donde el combustible reacciona de mejor manera con el aire. Una combustión no premezclada, se caracteriza porque el aire que reacciona con el combustible proviene de los alrededores de la llama o es inyectado a la zona de combustión por un flujo diferente al del combustible. Este fenómeno está presente de forma natural al quemar cualquier tipo de combustible fuera de un reactor y suele ser común verlo en la vida cotidiana en fogatas, encendedores, entre otros (Law, 2006).
- Otra forma de clasificar la combustión es si la llama es laminar o turbulenta. Al igual que en el análisis de un flujo, las llamas pueden presentar características laminares o turbulentas que dependen si el flujo se mueve a través de líneas de

corriente sin mezclarse entre ellas (laminar) o el caso contrario que es una llama turbulenta.

- Además, se puede clasificar la combustión según la relación de equivalencia de la mezcla aire combustible (φ). La relación de equivalencia es que tan cerca se encuentra una combustión de la estequiometría. Para una relación de equivalencia de 1, se tiene que la mezcla aire-combustible trabaja perfectamente en la estequiometría. Para un $\varphi < 1$ la mezcla es pobre en combustible, y un $\varphi > 1$ la mezcla es rica en combustible. En el punto 2.3 se abordará con mayor detalle esta definición.

2.2 Combustibles

Los combustibles son uno de los reactantes que están involucrados en la combustión. Tienen diferentes composiciones químicas, pero en general están basadas en carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Su propiedad más importantes es el poder calorífico. Éste corresponde, a la cantidad de calor liberado cuando un combustible se quema en un proceso de flujo estacionario. Existen dos formas de definir el poder calorífico. El PCS es el poder calorífico superior, en este caso se considera que de los gases de escape, el vapor de agua condensa y aporta ese calor. Mientras que el poder calorífico inferior PCI considera el vapor de agua a la misma temperatura que los demás gases de escape, por ende su valor siempre es menor al PCS.

Se pueden dividir en 3 grandes grupos de combustibles según su estado de la materia en que se encuentren. Estos son: Sólido, líquido y gaseoso.

Combustibles sólidos:

A nivel industrial, el carbón es el principal combustible sólido, pues se continúa utilizando a gran escala en la generación eléctrica. Su combustión es la más contaminante, pues genera cenizas y material particulado.

Combustibles líquidos:

Principalmente son combustibles derivados del petróleo. Generan contaminantes pero no al nivel del carbón, aunque algunos pueden generar material particulado.

Combustibles Gaseosos:

Son los combustibles más limpios en términos de su combustión, pues el gas es más fácil que se mezcle con el oxígeno (aire) ambiental y así facilita la combustión.

Para esta investigación, se trabajó con 3 combustibles gaseosos: Metano, hidrógeno y amoníaco.

2.2.1 Metano

El metano CH_4 es una molécula formada por un átomo de carbono y 4 átomos de hidrógeno. Es el principal componente del gas natural. Además de ser un combustible es un potente gas de efecto invernadero. Una importante fuente de producción de metano liberado a la atmósfera es la materia orgánica en descomposición, y es en ese escenario en que el biometano mencionado anteriormente, tiene cabida para aprovechar este gas como combustible, evitando liberarlo directamente a la atmósfera (Pegov, 2008).

2.2.2 Hidrógeno

Está formado por un protón y un electrón y su forma estable es como molécula diatómica (H_2) y se encuentra en estado gaseoso a temperatura ambiente. (Centro Nacional del Hidrógeno, 2024).

Se ha desarrollado una forma de clasificarlo basado en colores, según su impacto ambiental:

- Hidrógeno gris: Es el generado con gas natural y que libera a la atmósfera el dióxido de carbono generado durante su producción. 90% de la producción actual es clasificado hidrógeno gris (Morante, y otros, 2020).
- Hidrógeno negro o café: Producido a partir de carbón mineral y que no se capturan los gases de efecto invernadero derivados al igual que el hidrógeno gris (Morante, y otros, 2020).
- Hidrógeno azul: Se basa en la captura de las emisiones de CO₂ que se generan en el proceso productivo del hidrógeno. Su modo de producción es similar al hidrógeno gris, cambiando solamente la manera en que se trata el dióxido de carbono. Su definición exacta para diferenciarlo del gris es. “hidrógeno generado de fuentes no renovables que emite menos de 4,37 kgCO₂ eq/ kgH₂ o bien. (36,4 CO₂ eq /MJ)” (Morante, y otros, 2020).
- Hidrógeno verde: No se liberan gases de efecto invernadero en su producción, es decir, para fabricarlo solo se emplean fuentes de energías renovables. Se utiliza la reacción química de la electrólisis, en donde se separa la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno. Y la electricidad empleada para la separación del agua es la que debe provenir de fuentes de energías renovables para ser considerado hidrógeno verde (Ministerio de Energía, 2020)..

La mayor ventaja de Chile en la producción de Hidrógeno verde, son los costos nivelados de energía, que representan los más bajos de todo el mundo con 1,7 kg/USD. Además se espera que estos costos continúen bajando durante las próximas dos décadas hasta llegar a 0,8 kg/USD. Estos valores son estimaciones hechas por McKinsey and Company pero entregan información de lo que se puede llegar a lograr en el futuro (Ministerio de Energía, 2020).

Sin embargo, la densidad es su principal problema. A 300 K y 100 kPa es de 0,08 kg/m³ por lo que se necesitarían volúmenes mucho más grandes para poder almacenar una cantidad similar de energía que un hidrocarburo. Como referencia el petróleo diésel grado B1 tiene una densidad de 850 kg/ m³ (ENAP, 2024). Incluso al comprimir el hidrógeno a 300 bar, su densidad aumenta a 22,7 kg/ m³, todavía muy inferior al diésel.

Es por eso que se ve en el amoníaco una forma de almacenar y utilizar el hidrógeno verde producido.

2.2.3 Amoníaco

El amoníaco es un compuesto químico formado por un átomo de nitrógeno y 3 de hidrógeno (NH_3). A temperatura ambiente es un gas incoloro, de olor característico, muy picante y tóxico para los seres humanos. En torno al 90% de todo el amoníaco industrial es producido mediante el proceso de Haber-Bosch que es extensivo en el uso de combustibles fósiles. En la Figura 2 se muestra un esquema del proceso Haber Bosch. Mediante reactores y catalizadores se separa el hidrógeno del metano y el nitrógeno del aire, para posteriormente unirlos en un reactor a 450°C y 300 bar de presión.

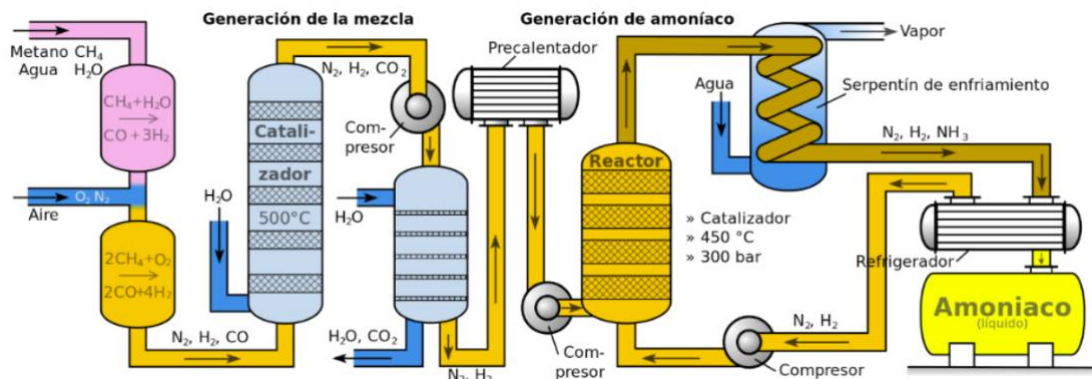


Figura 2: Esquema de producción del proceso Haber Bosch. (San Martín, 2024)

En este proceso, el mayor consumo de combustibles fósiles se da en el metano utilizado para generar el hidrógeno, pero ese hidrógeno puede ser obtenido sin emitir CO_2 a la atmósfera. Esto no quiere decir que el proceso Haber Bosch sea la única forma de producir amoníaco, pues existen los siguientes métodos

- Síntesis electroquímica: Consiste en inducir una reacción a través de una corriente eléctrica y reducir electroquímicamente el nitrógeno molecular. La ventaja que presenta es trabajar a temperaturas y presiones atmosféricas,

aunque el principal desafío de esta tecnología es encontrar un material catalizador de bajo costo y duradero.

- Síntesis fotocatalítica: esta forma de producir NH_3 se basa en la activación de catalizadores mediante calor. Este calor es entregado por la luz solar y se debe emplear un mecanismo de concentración para alcanzar las temperaturas requeridas (400-500 °C) por el proceso. (San Martín, 2024).

Actualmente, la mayoría de la producción del amoníaco (en torno al 80%) está destinada a la fabricación de fertilizantes, el 20% restante se utiliza en la producción de adhesivos, plásticos, tintas, resinas, productos farmacéuticos, cosméticos, acabados en textiles, papel, metales y como suplemento de alimento para ganado (Fuster, Arteaga, & Farías, 2022).

El principal interés en el amoníaco radica en que es visto como una alternativa al hidrógeno verde y permite solucionar algunos de los problemas que presenta el H_2 . En primer lugar, el amoníaco posee una densidad mucho mayor al hidrógeno, en estado gaseoso y a presión atmosférica, el amoníaco es 9 veces más denso que el hidrógeno. Sumado a ello, el punto de fusión del amoníaco es de 239,85 K (-33,3°C) versus el hidrógeno de 20,35 K (-252,8°C) (Çengel & Ghajar, 2011), lo que permite transportar amoníaco licuado con más facilidad que el hidrógeno. Como líquido saturado, el amoníaco tiene un poder calorífico inferior de en base volumétrica de 12,8 MJ/L y del hidrógeno es 8,4 MJ/L, es decir, el amoníaco es más eficiente volumétricamente para ser usado como combustible.

Además, el amoníaco presenta otras ventajas: Sus fugas son más fáciles de detectar que las de hidrógeno, resulta menos inflamable y cuenta con una infraestructura global desarrollada en su producción y tratamiento. No obstante, presenta desafíos en su implementación y el principal es la toxicidad. Tanto es su riesgo para la salud humana que no se puede estar expuesto diariamente a más de 22 ppm durante una jornada de trabajo. Otro desafío es su baja velocidad de llama laminar y su alta energía mínima de activación. Estos dos parámetros provocan que sea un combustible más difícil de quemar que el H_2 .

Es importante destacar que el amoníaco verde no viene a reemplazar al hidrógeno verde, mas bien viene a complementarlo, pues el amoníaco puede ser un vector de transporte de H_2 , además de ser combustiónados en simultáneo.

2.2.4 Propiedades de los combustibles

Para comparar distintos combustibles es necesario manejar información sobre sus propiedades. Éstas están evaluadas a 300 K de temperatura (26,85 °C) y 100 kPa de presión (0,987 atm).

Tabla 1: Propiedades del amoníaco, hidrógeno y metano (Valera-Medina, Owen-Jones, David, Xiao, & Bowen, 2018)

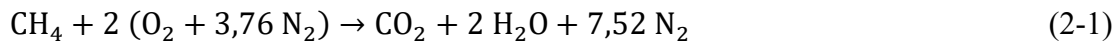
Combustible	Amoníaco	Hidrógeno	Metano
Masa Molar	17,03 kg/kmol	2,016 kg/mol	16,04 kg/kmol
Densidad	0,73 kg/m ³	0,08 kg/m ³	0,66 kg/ m ³
Poder calorífico Inferior	18,8 MJ/kg	120 MJ/kg	50.05 MJ/kg
PCI en base volumétrica para líquido saturado	12,82 MJ/L	8,48 MJ/L	21,36 MJ/L
Velocidad de llama laminar cerca a estequiometría	0,07 m/s	3,51 m/s	0.38 m/s
Energía mínima de ignición	8.0 mJ	0,011 mJ	0.280 mJ
Temperatura de autoignición	657 °C	500-577 °C	586 °C K
Temperatura de llama adiabática (con aire)	1577 °C	2210 °C	1950 °C

2.3 Ecuaciones de combustión

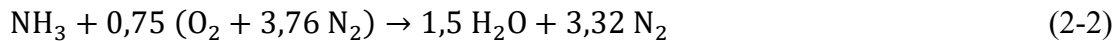
Tal como se mencionó en el apartado de la combustión, ésta es una reacción química de oxidación, por lo que posee dos reactantes, el combustible y el oxidante (aire). En este trabajo se utilizaron mezclas de dos o más combustibles. Cada uno de forma

independiente cuenta con su reacción de combustión, y es la combinación de éstas la que entrega una ecuación expandida para evaluar mezclas de combustibles. Las ecuaciones presentadas son en su forma estequiométrica ($\varphi = 1$). Por lo que para relaciones de equivalencias menores, se debe considerar un exceso de aire y para $\varphi > 1$ se debe considerar menos aire del presentado a continuación. Este efecto de déficit de aire no fue estudiado en este trabajo, por lo que no se presentarán esas ecuaciones. Sin embargo, es importante mencionar que combustión incompleta también se puede desarrollar en condiciones estequiométricas o con exceso de aire, puesto que la cinética de reacciones, puede provocar reacciones secundarias que impidan la transformación de los reactantes en los productos principales. Las 3 ecuaciones estequiométricas iniciales para los 3 combustibles son la 2-1, 2-2 y 2-3:

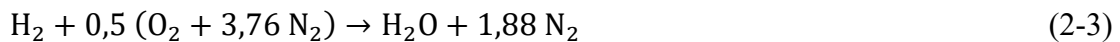
Metano (CH_4):



Amoníaco (NH_3):



Hidrógeno (H_2):



Es importante destacar que en los experimentos se trabajó con todos estos compuestos en estado gaseoso y a bajas presiones (en torno a 1 bar) , por lo que es válido utilizar la aproximación de la ley de gases. Con esto en mente, las fracciones molares de los gases dentro del combustible, se pueden determinar en base a los flujos volumétricos de los gases. La ecuación 2-4, 2-5 y 2-6 muestran la fracción molar del amoníaco, metano e hidrógeno respectivamente, en función de los flujos de combustible. Para mezclas de combustibles de dos gases, el tercero simplemente toma valor cero.

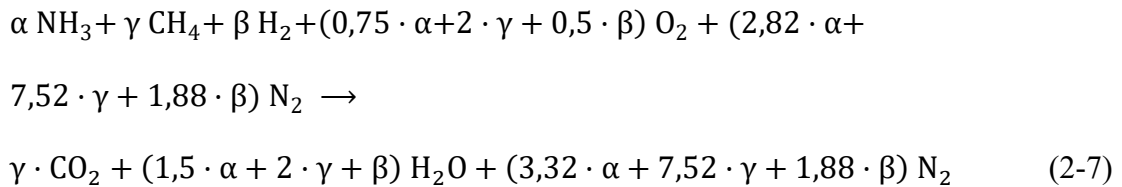
$$\alpha = \frac{\dot{V}_{\text{NH}_3}}{\dot{V}_{\text{NH}_3} + \dot{V}_{\text{H}_2} + \dot{V}_{\text{CH}_4}} \quad (2-4)$$

$$\beta = \frac{\dot{V}_{H_2}}{\dot{V}_{NH_3} + \dot{V}_{H_2} + \dot{V}_{CH_4}} \quad (2-6)$$

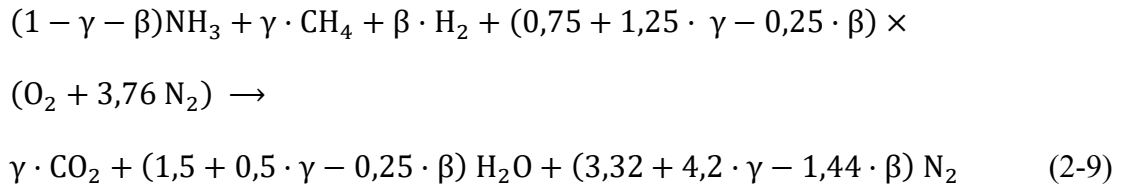
$$\gamma = \frac{\dot{V}_{CH_4}}{\dot{V}_{NH_3} + \dot{V}_{H_2} + \dot{V}_{CH_4}} \quad (2-5)$$

Donde $\dot{V}_{NH_3}$, $\dot{V}_{CH_4}$ y $\dot{V}_{H_2}$ corresponden a los flujos volumétricos de amoníaco, hidrógeno y metano respectivamente. α , β y γ se utilizarán para referirse a la fracción de amoníaco, hidrógeno y metano respectivamente, para facilitar la lectura durante el desarrollo.

Si combinamos los 3 combustibles y trabajamos con las fracciones molares en la mezcla como α , β y γ , se obtiene la ecuación 2-7:



Al trabajar con 3 combustibles, se puede escribir el tercero en función de las fracciones molares de los otros dos. Siendo el principal objeto de estudio de este trabajo el amoníaco, éste se dejará en función de los otros dos:



De esta forma se tiene una ecuación para relacionar las fracciones molares de todos los combustibles independiente si se trabaja con dos o tres de ellos.

Las ecuaciones anteriores son para mezclas estequiométricas, en donde se supone que todo el combustible tiene su oxidante medido exactamente para que combustione todo. Esta condición no se da siempre en la combustión, ya que puede haber exceso de combustible o exceso de aire. Para determinar si una mezcla es rica o pobre en combustible, es necesario conocer en primer lugar su relación aire-combustible y en

segundo lugar la relación aire-combustible estequiométrica de dicha combustión. La relación aire-combustible se puede escribir como en la ecuación 2-10:

$$R_{ac} = \frac{\dot{V}_{aire}}{\dot{V}_{NH_3} + \dot{V}_{CH_4} + \dot{V}_{H_2}} \quad (2-10)$$

Para encontrar el caso estequiométrico, se debe tomar de la ecuación 2-9 los términos que corresponden al aire y los que corresponden a los combustibles. Se aprecia que a cada mol de aire, le acompaña el término $(0,75 + 1,25 \gamma - 0,25 \beta)$. Este término al igual que la ecuación 2-9 considera que se está trabajando con un mol de combustible, por lo que la relación aire combustible estequiométrica se puede escribir de la forma de la ecuación 2-11:

$$R_{ac,S} = \frac{\dot{V}_{aire}}{\dot{V}_{NH_3} + \dot{V}_{CH_4} + \dot{V}_{H_2}} = \frac{4,76 \cdot (0,75 + 1,25 \gamma - 0,25 \beta)}{1} \quad (2-11)$$

Donde “4,76” aparece porque la ecuación 2-9 está desarrollada en base a los moles de oxígeno y por cada mol de O_2 en el aire hay 4,76 moles totales.

Al conocer la relación de aire-combustible estequiométrica, es posible calcular la relación de equivalencia (φ), que entrega información si la combustión es rica o pobre. En la ecuación 2-12 se muestra la relación de equivalencia que es el resultado de unir las ecuaciones 2-10 y 2-11.

$$\varphi = \frac{R_{ac,S}}{R_{ac}} = \frac{4,76 \cdot (0,75 + 1,25 x_{CH_4} - 0,25 x_{H_2})}{\frac{\dot{V}_{aire}}{\dot{V}_{NH_3} + \dot{V}_{CH_4} + \dot{V}_{H_2}}} \quad (2-12)$$

Se desprende de la ecuación 2-12 que si $\varphi = 1$ se tiene una combustión estequiométrica, mientras que cuando $\varphi > 1$ la mezcla es rica en combustible. Caso contrario ocurre cuando $\varphi < 1$ y se considera una mezcla pobre.

En el cálculo de muchas ecuaciones se utilizan constantes y ecuaciones adicionales que estarán referenciadas en el anexo 1 para no interferir con las ecuaciones importantes de este trabajo.

2.4 Quemador

El quemador es el lugar en donde se lleva a cabo la reacción de combustión. Debe tener una forma característica para propiciar una propagación de llama continua y estable, sin que ésta se extinga o retroceda por la tubería de alimentación. Existe una gran variedad de quemadores, su diseño varía dependiendo del combustible que se utilice, el tamaño, el costo, la utilización del calor de la combustión, etc.

2.4.1 Quemador de medios porosos

Hoy en día, en un mundo en donde se buscan soluciones eficientes, que ahorren combustible y que impacten en la menor medida posible el medio ambiente, una tecnología que cada vez toma más relevancia es la combustión en medios porosos. Utria y colaboradores describen la combustión de medios porosos como:

La combustión en MPI consiste en el proceso de propagación de la zona reacción exotérmica química de un gas a lo largo de un sólido químicamente inerte. Existe una participación tanto del medio poroso como del gas reactante en este proceso, en donde tres zonas características se pueden identificar dentro del medio poroso. Una zona que se encuentra delante del frente donde los gases reactantes se mezclan en forma natural y se precalientan aprovechando el calor desprendido por el medio poroso. La segunda zona es muy estrecha y representa la zona de reacción química, la que se mueve en la misma dirección o en contra del flujo de gas y donde se libera una gran cantidad de la entalpía, la que es absorbida por el medio poroso y conducida hacia la primera zona, es decir, la zona de entrada del gas fresco. En esta última zona, gracias a la inmensa superficie específica que tiene el medio poroso, la energía es cedida por ella al gas entrante y trasladada por convección hacia la zona de la reacción. De esta forma se realiza una regeneración del calor en el sistema, lo que lleva al exceso de la entalpía en la zona de reacción química y un lento aumento de la temperatura en el frente, la que puede superar a la temperatura adiabática. La tercera zona, la que se encuentra detrás del frente, contiene los productos de

combustión, los que intercambian activamente el calor por convección con el medio poroso (Utria, González, & Toledo, 2013).

Como esta memoria está enmarcada en un proyecto multidisciplinario, parte de las pruebas a realizar fueron en un quemador de cuarzo sin aislamiento, tal como el que se muestra en la Figura 3, pues con el mismo quemador se realizaron pruebas de chemiluminiscencia para identificar los tipos de reacciones secundarias que ocurren al interior del quemador.

La otra parte de las pruebas se realizó en un quemador de acero inoxidable con aislamiento interno y externo. En la Figura 4 se muestra este quemador. Este diseño está pensado para ser más robusto y poder trabajar con mayores caudales de combustible y así alcanzar mayores temperaturas sin comprometer el quemador.



Figura 3: Quemador de cuarzo de MPI utilizado en las pruebas. A la izquierda apagado, a la derecha encendido



Figura 4: Quemador de medios porosos de acero inoxidable. A la derecha apagado y a la izquierda al momento del encendido antes que se confine la llama

Una forma de caracterizar la diferencia de tamaño entre quemadores y el calor generado por uno, es a través de la potencia. Mide el poder calorífico total que ingresa al quemador, no la potencia efectiva que se está quemando por lo que representa una potencia teórica si todo el combustible se quema. Ésta se calcula con la ecuación 2-13 mostrada a continuación.

$$P = \sum_{i=1}^N \dot{V}_i \text{PCI}_i \rho_i \quad (2-13)$$

Su unidad de medida es kW. $\dot{V}_i$ es el caudal del gas. PCI_i es el poder calorífico del gas. Y ρ_i es la densidad del gas.

Otra parámetro importante de estudio es el flujo másico. Son proporcionales con la potencia, pues ambos incluyen el término del caudal de gases y la densidad de cada uno, pero el flujo másico mide la cantidad de materia que consume el quemador en unidad de tiempo. La ecuación 2-14 muestra su cálculo.

$$\dot{m} = \sum_{i=1}^N \dot{V}_i \rho_i \quad (2-14)$$

Su unidad de medida es kg/s y al igual que para la potencia, V_i es el caudal del y ρ_i es la densidad del gas.

En este trabajo, más que el flujo másico, se utilizará como referencia el flujo másico específico para el desarrollo de los experimentos. Éste es una variación del flujo másico que considera la sección transversal por la que fluye. Tal como la ecuación 2-15 lo indica, se obtiene dividiendo el flujo másico en el área de la sección transversal del quemador (área por donde fluyen los gases). Su unidad de medida es kg/s·m². La utilidad de usar el flujo másico específico es que al normalizar el flujo másico por unidad de área, permite comparar cálculos entre quemadores de distintas dimensiones.

$$\dot{m}_{\text{flux}} = \frac{\dot{m}}{A} \quad (2-15)$$

Además del flujo másico específico, existe una magnitud que está directamente ligada a la cantidad de gas que ingresa al quemador, teniendo en cuenta el medio poroso. Ésta es la llamada velocidad de filtración y se calcula con la ecuación 2-16:

$$V_f = \frac{\dot{V}_{\text{gases}}}{A \cdot 0,4} \quad (2-16)$$

Donde $\dot{V}_{\text{gases}}$ es la suma de los flujos volumétricos de los gases medidos en m³/s). “A” es el área del quemador (sección transversal interna) medida en metros cuadrados. 0,4 es la porosidad del quemador y viene dado por el volumen de llenado de las esferas.

La incorporación de la porosidad es útil cuando se trabaja con diferentes medios porosos en un quemador, pero al trabajar con el mismo medio poroso para ambos quemadores, este parámetro se modificó proporcionalmente al flujo másico.

2.5 Regímenes de operación en quemador de medios porosos

En un quemador de medios porosos, la combustión no siempre se comporta de la misma forma. Diferentes fenómenos químicos pueden producir una combustión estable (el caso deseado para quemadores en régimen estacionario) u otros fenómenos denominados flashback, extinción y blow-out, los cuales se explicarán a continuación.

- **Combustión estable:** Es el caso buscado en la combustión de medios porosos para la operación. Es lo que se describe en el punto 2.6.1 como la “segunda zona”. Consiste en una pequeña franja dentro del quemador donde ocurre la reacción química y se libera gran cantidad de calor. Cuando la combustión es estable, el denominado frente de llama no avanza ni aguas arriba ni aguas abajo y se queda fijo en un lugar del quemador.
- **Flashback:** Este fenómeno ocurre cuando el frente de llama se confina en el medio poroso, pero comienza a retroceder aguas arriba por el quemador. En quemadores de medios porosos suele moverse a velocidades que permiten la reacción humana, pero es peligroso porque si el frente retrocede mucho, se genera un retroceso de llama que llega hasta las líneas de alimentación de gases, pudiendo potencialmente provocar una explosión.
- **Extinción:** Ocurre cuando la reacción de combustión no puede sostenerse a sí misma con los flujos de combustible y aire suministrados. La llama se va apagando lentamente, lo cual se puede ver a simple vista en el quemador de cuarzo, y las temperaturas muestran una disminución sostenida en el tiempo.
- **Blow-out:** Refiere al fenómeno en que el frente de llama logra confinarse, pero con el pasar del tiempo comienza a moverse aguas abajo. Esto produce que el frente de llama se “desconfine” y salga de la zona porosa, para convertirse en una llama libre. De esta forma, no se aprovechan los beneficios de la combustión en medios porosos.

2.6 Revisión de trabajos recientes

Producto del creciente interés en el mundo científico por los combustibles limpios, en los últimos años se ha visto un importante aumento en publicaciones científicas acerca del amoníaco, en particular en su combustión. Valera-Medina y colaboradores, hicieron una revisión general de la literatura en combustión de amoníaco, como también un análisis de factibilidad en la implementación de su uso. Existen varias formas de

aprovechar la energía química almacenada en el NH_3 entre las que destacan los siguientes ejemplos (Valera-Medina et al, 2018):

- Celdas de combustible: Son dispositivos donde el combustible no es quemado, sino transformado electroquímicamente. De esta forma, la energía de la reacción se transforma en energía eléctrica. Existen desarrollos de tres tipos de celdas de combustibles con amoníaco. Celdas de óxido sólido (SOFC), celdas alcalinas y celdas de membrana de intercambio de protones (PEMFC).
- Motores reciprocantes: Es un motor compuesto por pistones en donde la combustión se realiza a alta presión de manera intermitente en un ciclo de 2 o 4 tiempos. Un estudio de Gross y Song, desarrolló mezclas de amoníaco con combustible a base de dimetil eter (DME). En el estudio se encontró que la mejor mezcla en términos de potencia generada, es 40% de NH_3 y 60% de DME, logrando a 3000 rpm 2,3 hp versus los 6 hp producidos en mismas condiciones utilizando diesel (Gross & Charng Kong, 2012).
- Turbinas de gas: Es una turbomáquina donde la combustión se realiza de forma continua a alta presión. El instituto de energía renovable de Fukushima desarrolló una microturbina de 50 kW que opera con mezclas de kerosene-amoníaco. Para mezclas de 38% de amoníaco, la potencia disminuyó a 17 kW y para 30% se redujo a 21 kW. Si bien es una reducción considerable, se demuestra que es factible trabajar con mezclas de amoníaco con otros combustibles para facilitar la combustión. Sin embargo, el principal desafío son las emisiones de NO_x , que se incrementan directamente proporcional a la cantidad de amoníaco inyectado, llegando a 600 ppm en el caso de 38% de amoníaco (Kurata, y otros, 2015).

Otra aplicación de la tecnología de combustión de amoníaco es en quemadores estacionarios o industriales, pensado para hornos o centrales de potencia. Es en estas aplicaciones que se presentan como alternativa los quemadores de medios porosos inertes que permiten un mayor rango de operación estable, haciéndolos ideales para combustibles con menor inflamabilidad como el amoníaco. Rocha y colaboradores (Rocha, Ramos, Costa, & Bai, 2019) desarrollaron pruebas de laboratorio en un

quemador de medios porosos usando esponjas de 40 poros por pulgada (ppi) y aguas abajo uno de 10 ppi. Las pruebas realizadas fueron con una razón de equivalencia $\varphi = 0,8$, se ensayaron dos mezclas, CH_4 y NH_3 , y H_2 y NH_3 y abarcando los rangos de fracción de amoníaco en la mezcla de 0,3 - 0,8 α para la mezcla metano-amoníaco y α entre 0,5 - 0,8 para la mezcla de hidrógeno amoníaco.

El objetivo principal de ese trabajo era estudiar los gases de escape de la combustión y validar modelos numéricos de cinética reacciones químicas. Por este motivo es que no se desarrollaron pruebas con otras razones de equivalencia.

Las conclusiones principales de los experimentos fueron que se generan grandes cantidades de NO_x para ambas mezclas, alcanzando su peak en $\alpha = 0,5$ para la mezcla $\text{NH}_3 - \text{CH}_4$, con 3100 ppm de emisión a un 6% de oxígeno normalizado. Para mezclas de $\text{NH}_3 - \text{H}_2$, el peak fue con una fracción de amoníaco de $\alpha = 0,5$ y 0,8, y el valor medido fue de un máximo de 3400 ppm normalizado al 6% de oxígeno también. Los NO_x son gases que se generan como subproducto de la combustión por la reacción entre el nitrógeno y el oxígeno. Además, los modelos cinéticos capturaron la tendencia de las emisiones de NO_x , pero lo sobre predijeron en 3 de los modelos cinéticos simulados. Otra discrepancia entre las simulaciones y los experimentos, fue que en las pruebas una parte del amoníaco no se combustionó, mientras que los modelos predecían una oxidación completa del amoníaco. Para poder darse cuenta que parte del amoníaco no era combustionado, se llevaron a cabo mediciones de este gas en el flujo de gases de escape. Los resultados fueron un máximo de emisiones de amoníaco en una fracción del 80% de la mezcla, llegando a valores de 500 ppm con un nivel de oxígeno normalizado al 6%. (Rocha, Ramos, Costa, & Bai, 2019)

Otro estudio similar en quemadores de medios porosos, es el desarrollado por Vignat y colaboradores. El quemador desarrollado se conforma por dos medios porosos: circonia-alúmina estabilizada con itria (YZA) para el medio poroso con menor tamaño de poro (40 ppi) y carburo de silicio para el de mayor tamaño de poro (10 ppi).

En él se combustionaron mezclas de hidrógeno con amoníaco en un amplio rango de condiciones, pues el objetivo principal de estos experimentos era determinar el rango

de inflamabilidad para mezclas pobres de amoníaco-hidrógeno exclusivamente. Las mezclas pobres presentan ciertos beneficios al combustionar amoníaco. En los resultados obtenidos, se encontró un límite de estabilidad en torno a $\varphi = 0,55$ para mezclas de un 60 y 70% de amoníaco. También se encontró que esta región de estabilidad de llama se redujo a medida que se adiciona más amoníaco a la mezcla. A la fecha de publicación de este artículo no había sido posible estabilizar llamas con 100% de amoníaco (Vignat, Akoush, Boigné, Toro, & Ihme, 2022).

Con respecto a los gases de escape, se encontró que al trabajar con mezclas pobres de combustible, la emisión de NH_3 no quemado fue bastante baja. Transitando entre 2 y 35 ppm para relaciones de equivalencia de 0,6 a 0,7 y aumentando a más de 1500 ppm para mezclas de $\varphi = 0,55$. Estas mediciones fueron normalizadas a niveles de O_2 del 15%. El otro gas medido fueron los NO_x . Los índices obtenidos para estos gases fueron entre 800 y 3000 ppm. Estos valores también están normalizados a un 15% de O_2 y el valor de 3000 ppm fue registrado con un flujo másico específico de $0,3 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$ y una mezcla de 70% de NH_3 y 30% H_2 . Éste es un valor alto pensado en instalaciones industriales, puesto que la Agency for Toxic Substances and Disease Registry (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades) ha establecido un límite de 25 ppm para una jornada de 8 horas semanales para el NO (monóxido de nitrógeno) y 5 ppm durante 15 minutos para el NO_2 (dióxido de nitrógeno), los cuales son los principales compuestos dentro de los NO_x . (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2016).

Este estudio continuó y se publicaron nuevos resultados en otro artículo. Se utilizó un diseño de quemador optimizado, en donde se utilizaron 3 medios porosos diferentes en el sentido del flujo de los gases. Primero se empleó YZA de 40 ppi, aguas abajo carburo de silicio dividido en 2 bloques. El primero de 3 ppi y el último de 10 ppi. Gracias a este diseño optimizado, se pudo estabilizar mezclas de 100% de amoníaco en su composición.

Esta investigación, trabajó en el rango de razón de equivalencia de 0,55 a 1,4 por lo que las zonas de operación fue de mezclas pobres y mezclas ricas. Este cambio la

relación de equivalencia fue lo que más afectó los resultados de las emisiones. Con un flujo másico de $0,3 \text{ kg/m}\cdot\text{s}^2$ las emisiones de NH_3 estuvieron entre las 100 ppm (@15% O_2) ($\varphi=1,1$) y las 6000 ppm (@15% O_2) ($\varphi = 0,8$) y para el monóxido de nitrógeno, el nivel más alto fue de 2500 ppm (@15% O_2) en $\varphi = 0,9$. A medida que la mezcla era más rica en combustible, disminuyó el nivel de emisión de NO, siendo desde $\varphi = 1,2$ un nivel menor a 100 ppm (@15% O_2) y cada vez más cercano a cero mientras aumenta φ . Además de las emisiones, se pudo cuantificar la densidad energética del quemador, que fue de 62 MW/m^3 (Vignat, y otros, 2023).

En el mundo se han realizado avances considerables en la combustión de amoníaco, lo que muestra la viabilidad de implementar estas soluciones en Chile. Sin embargo, todavía existen interrogantes y desafíos, como las emisiones de gases tóxicos y la masificación de la tecnología.

3 Diseño y procedimiento experimental

En esta investigación, se busca combustionar amoníaco a distintas razones de equivalencia, flujos másicos y composiciones de mezcla combustible, con el fin de encontrar zonas de operación estable y analizar las emisiones de gases. Para ello, se diseñó el prototipo del primer quemador sin aislamiento sumado a ser una estructura transparente, para poder ver las reacciones de combustión y los subproductos de ésta en tiempo real. En busca de trabajar con mayores potencias se desarrolló un quemador de acero, al ser más robusto, permitieron trabajar con mayores flujos másicos y como consecuencia mayores potencias.

3.1 Consideraciones en el manejo de gases

Trabajar con amoníaco presenta desafíos importantes producto de la toxicidad para los seres humanos. Según la legislación chilena, su límite de exposición ponderado son 22 ppm y su límite de exposición temporal son 35 ppm (Ministerio de Salud, 2000), por

lo que la instalación donde se llevarán a cabo las pruebas, debe cumplir con estándares que garanticen la seguridad de los operarios en todo momento, incluso ante situaciones no previstas. La propia naturaleza de los experimentos de combustión de gases, implica el trabajo con elementos combustibles e inflamables. Esto también fue considerado en el diseño de la instalación.

Existe una clasificación de sustancias elaborada por el Sistema Globalmente Armonizado (SGA o GHS por sus siglas en inglés) que permite identificar rápidamente el nivel de peligrosidad en diferentes ámbitos de ciertos elementos químicos. En base a esa clasificación, las empresas comercializadoras de gases industriales elaboran hojas de seguridad para informar al comprador de los peligros asociados a dichos gases. En el anexo 2 se encuentra un extracto de la hoja de seguridad de cada gas donde está toda la información detallada de que rótulos debe llevar cada cilindro de gas, como manipularlo y otros peligros asociados.

Lo esencial del amoníaco es su toxicidad e inflamabilidad. Al ser tóxico para los seres humanos, se debe evitar su inhalación cuando se trabaje con él. La piel también se ve afectada al entrar en contacto con NH_3 dada su corrosividad. En términos de inflamabilidad no se clasifica en la categoría más alta del SGA, pero igual está catalogado como un gas inflamable.

Para el caso del hidrógeno y el metano, se debe hacer hincapié en la inflamabilidad. Estos dos gases tienen velocidades de llama superiores al amoníaco y energías de autoignición menores, por lo que una fuga tiene más probabilidad de transformarse en una explosión a un incendio.

3.1.1 Elementos de protección personal

Para proteger a las personas que trabajen en el laboratorio, se emplearon distintos EPP. Se debió proteger la cara, el cuerpo y las manos. Para la cara se empleó una máscara protectora de cara completa (véase Figura 5), de marca 3M, modelo 6900. Los filtros utilizados fueron 3M 6004. Éstos filtros están diseñados especialmente para proteger contra amoníaco y metilamina..



Figura 5: Máscara 3M 6004 para protección de amoníaco

Para el cuerpo se utilizó un traje completo fabricado por Chemmax. Su modelo es el 3 CT3S430. Este traje está diseñado con los más altos estándares de calidad y cumple con las siguientes normas: EN 13982 Tipo 5, EN 13034 Tipo 6, EN 14605 Tipo 3 y 4, EN 1149, EN 1073 y EN 14126. Los guantes utilizados fueron los Ninja Shield 9, que brindan protección química para todo el antebrazo. En la Figura 6 se muestra una foto del estudiante Miguel Grandón utilizando todos los epp.



Figura 6: Estudiante con todos los epp en el laboratorio

Otro elemento importante para la seguridad de los operarios del laboratorio, es el detector portátil de amoníaco. El laboratorio dispone de dos de ellos y se utilizan siempre encendidos mientras se trabaje con amoníaco. Uno se ubicaba al interior de la campana y el otro fuera de ella, en la zona cercana a donde se realizaban los distintos trabajos de medición de gases. En la Figura 7 se muestran dos fotografías del equipo. Una por el frente y la otra por la parte de atrás. Cuenta con una pantalla lcd monocromática que permite ver la concentración de amoníaco. Su marca es Safe Gas modelo SKY 2000-WH-NH3. Tiene un rango de 0 a 100 ppm con una resolución de 0,1 ppm y precisión $\leq \pm 2\%$ F.S.



Figura 7: Detector portátil de amoníaco para monitoreo de niveles en el laboratorio

3.2 Diseño del laboratorio

El diseño del laboratorio no fue abordado en el presente trabajo de título, pues éste ya se encontraba construido y en condiciones para operar. Sin embargo, se presentará de forma breve las consideraciones que se tomaron en el proceso de diseño.

La distribución del laboratorio fue pensada para asemejarse a una instalación industrial de combustión, incluyendo elementos de protección adicionales producto de la toxicidad del amoníaco. La distribución del laboratorio es el mostrado en la Figura 8

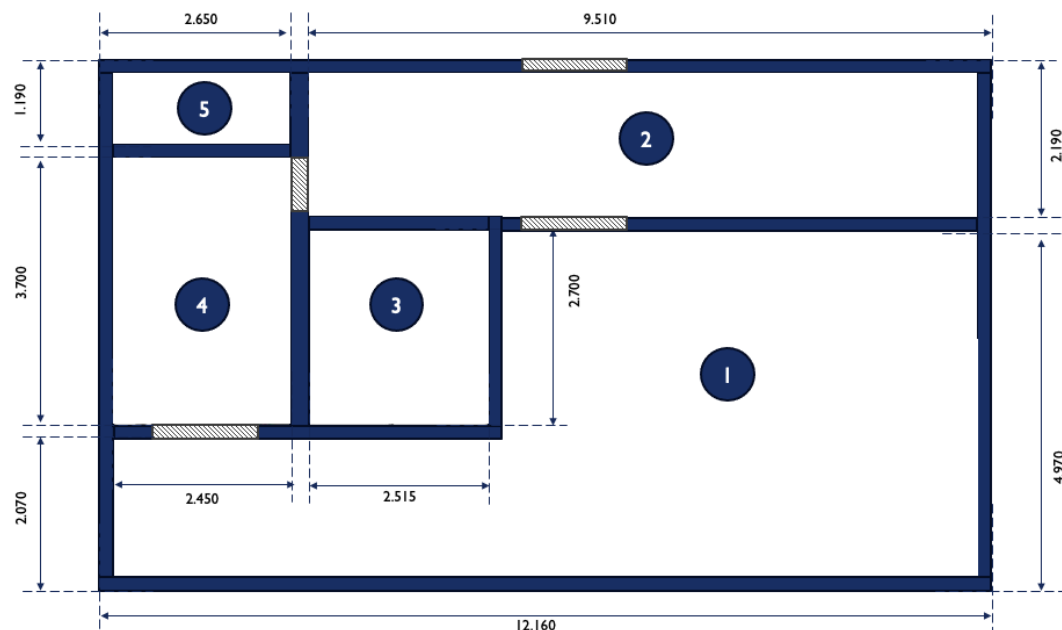


Figura 8: Dimensiones de laboratorio de combustión de amoníaco (Céspedes Domínguez, 2024)

Los números que aparecen corresponden a:

- 1- Espacio de laboratorio (45,5 m²)
- 2- Oficinas y sala de control (20,8 m²)
- 3- Baños (6,8 m²)
- 4- Antesala interior (9,07 m²)
- 5- Bodega (3,15 m²)

La superficie total es de 85 m², y la ubicación de los distintos equipos se puede ver en la Figura 9. El espacio de laboratorio cuenta con dos campanas de extracción, para ubicar quemadores y trabajar en simultáneo, además de mesones para realizar trabajos/montajes y espacios para guardar equipamiento. El espacio de oficinas cuenta con un mesón en donde se ubican computadores y monitores para trabajos y dar seguimiento a las propias pruebas. Cuenta también con una ducha de emergencias con lavaojos, en caso de ocurrir alguna intoxicación con amoníaco.

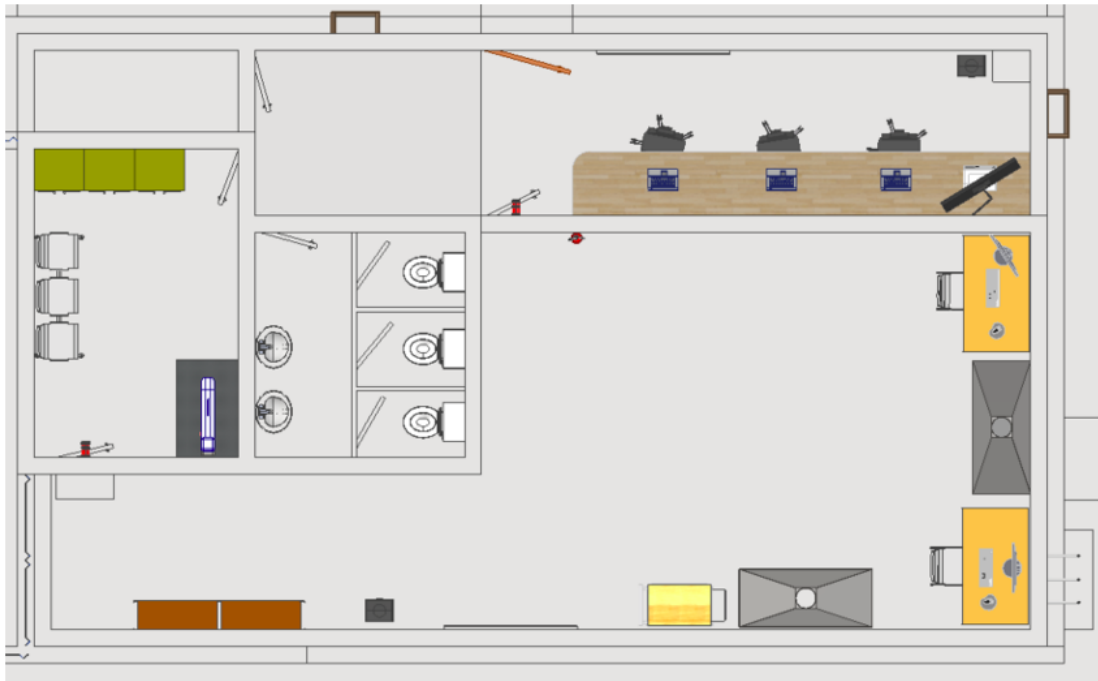


Figura 9: Layout de laboratorio de combustión de amoníaco (Céspedes Domínguez, 2024)

3.2.1 Sistemas de extracción de aire

Parte importante del diseño del laboratorio son sus sistemas de extracción de aire, los cuales deben funcionar correctamente para evitar una posible intoxicación en caso de acumulación de gases tóxicos.

El laboratorio fue diseñado con dos sistemas de extracción de gases, independientes entre sí. El primer sistema está encargado de remover directamente los gases de combustión a través de las campanas y funciona con una tasa de $1500 \text{ m}^3/\text{h}$. El segundo sistema está montado sobre la zona de laboratorio y se encarga de la remoción del aire de todo el recinto. Éste cuenta con una capacidad de $2000 \text{ m}^3/\text{h}$. La suma de ambos extractores da en torno a 30 renovaciones por hora del aire del laboratorio, es decir, el aire se estaría renovando cada dos minutos aproximadamente (Céspedes Domínguez, 2024).

Adicionalmente para aislar de mejor manera los gases tóxicos de combustión, las campanas cuentan con un acrílico deslizante que permite abrir el espacio de la campana para trabajar, pero al momento de las pruebas se mantiene cerrada, generando una

barrera adicional de seguridad para las personas encargadas de realizar pruebas. En la Figura 10 se muestra la instalación real del laboratorio con las dos campanas cerradas.



Figura 10: Fotografía de las campanas del laboratorio

3.2.2 Sistema de alimentación de gases combustibles

El diseño de la alimentación de gases, se realizó con foco en la seguridad. Los cilindros con combustible que alimentan los quemadores, están ubicados en la parte exterior. En una caseta cerrada para protegerlos de la radiación solar y cerrados con llave para evitar cualquier mala manipulación. En la Figura 11 se ve la caseta exterior de almacenamiento de gases.



Figura 11: Caseta para guardar gases combustibles

Cada cilindro cuenta con su respectiva estación de control, la Figura 12 muestra las válvulas y manómetros de los gases.



Figura 12: Válvulas de control exteriores

Al interior del laboratorio, existe una segunda estación de válvulas para regular la presión de las líneas de combustible sin necesidad de salir al exterior y añadiendo una capa extra de seguridad.

3.3 Set up experimental

La combustión de las distintas mezclas de amoníaco fueron estudiadas en el siguiente setup experimental mostrado en la Figura 13. Cabe destacar que se trabajó con dos prototipos de quemador, pero la instrumentación y equipamiento adicional fue la misma en ambos casos.

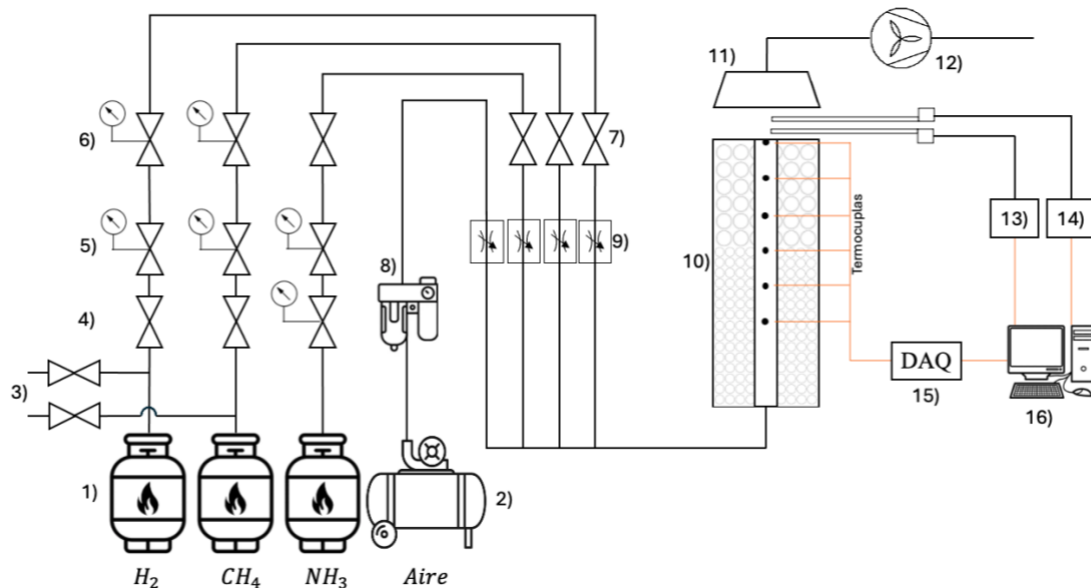


Figura 13: Esquema completo del setup experimental

Cada número corresponde a un elemento importante dentro del experimento, mientras las líneas negras son ductos, tuberías o mangueras que transportan los gases y las líneas naranjas corresponden a cables que transportan data.

1. Corresponde a los tres cilindros donde se almacenan los gases combustibles: metano, amoníaco e hidrógeno. En la Figura 11 se muestra la caseta de almacenamiento. Cada cilindro cuenta con una válvula de paso integrada.
2. Es la unidad de compresión de aire. Se ubica dentro del laboratorio y es la encargada de proporcionar un flujo de aire constante para las distintas mezclas de gases. En la Figura 14 se ve dicha unidad marca Nitro Compressors modelo: V-0.25/8. Posee una velocidad de giro de 1030 rpm que es alimentada por un motor de 3 hp de potencia. Su desplazamiento es de 250 L/min y cuenta con un tanque de 200 L. Su presión máxima de salida es de 8 bar.



Figura 14: Unidad de compresión de aire

3. Válvulas de despiche. Estas válvulas están ubicadas aguas abajo de las válvulas integradas de los cilindros y cumplen la función de despichar la línea en caso de haber presiones residuales al momento de hacer algún trabajo en las líneas. El amoníaco no cuenta con válvula de despiche producto de su toxicidad, por lo que al realizar trabajos se debe despresurizar y vaciar la línea desde la campana, idealmente combustionando el exceso de amoníaco.
4. Válvulas de paso de ajuste grueso. Estas válvulas están diseñadas para regular grandes cantidades de flujo, por lo que permite un rango de presiones mayores, sacrificando precisión. Sin embargo, la línea de amoníaco no cuenta con esta válvula, ya que en la salida del cilindro cuenta con una válvula de regulación.
5. Válvulas de ajuste fino con manómetro, en estación exterior. Están pensadas para generar una reducción de presión en la línea de combustible y poder ajustar con mayor precisión la presión de trabajo. Para dicho propósito cuentan con un manómetro. El límite de presión que pueden trabajar es en torno a los 8 bar. Se ubican en el exterior para setear la presión del flujo
6. Válvulas de ajuste fino con manómetro, en estación interior. Al igual que las válvulas de la estación exterior, están diseñadas para ajustes finos de presión. Se decidió ubicar válvulas con manómetro al interior, para poder visualizar la presión de la línea sin necesidad de salir del laboratorio a revisar los cilindros. Para el

amoníaco no se instaló una válvula reguladora de presión con manómetro, en su lugar cuenta con una válvula de paso de bola.

7. Válvulas de paso. Abren o cierran el paso de los gases. Están antes de los controladores de flujo para aumentar la seguridad y cerrar el paso cuando no se encuentren abiertos los reguladores de flujo. Son válvulas de bola.
8. FRL. Unidad de filtrado y regulado de aire. En esta unidad se acondiciona el aire para que esté en las condiciones óptimas para el trabajo. Se setea la presión en torno a 4 bar para garantizar un flujo constante de aire hacia el quemador.
9. Controladores de flujo. En total son cuatro controladores de flujo. Uno para cada gas y uno para el aire. Además para el caso del aire, se usaron dos controladores, uno para cada quemador, puesto que el quemador de acero necesita un flujo de aire mayor a 20 slpm. A continuación se muestra fotografías de todos los controladores junto con sus especificaciones:

En la Figura 15 se muestra el controlador de flujo de Aire número 1. Es marca Aalborg, modelo DPC17. Cuenta con un caudal máximo de 20 slpm y una resolución de 0,01 slpm. Su presión máxima de trabajo es de 816 kPa.



Figura 15: Controlador de flujo de aire número 1

La Figura 16 muestra el controlador de flujo de Aire número 2. De marca Aalborg, Modelo DPC57. Su caudal máximo es de 250 slpm con una resolución de 0,1 slpm. La presión máxima de trabajo es 816 kPa.



Figura 16: Controlador de flujo de aire número 2

La Figura 17 muestra el controlador de flujo de amoníaco marca Aalborg, modelo GFC47. Su caudal máximo es de 60 lpm con resolución de 0,1 lpm. Su presión máxima es de 6800 kPa.



Figura 17: Controlador de flujo de amoníaco

La Figura 18 muestra el controlador de flujo de hidrógeno. Es marca Aalborg modelo DPC17. Su caudal máximo es 20 slpm con una resolución de 0,01 slpm. Su presión máxima es de 6800 kPa.



Figura 18: Controlador de flujo de Hidrógeno

La Figura 19 muestra el controlador de flujo de metano. Es marca Aalborg modelo DPC17. Su caudal máximo es de 20 slpm con resolución de 0,01 slpm. Su presión máxima de funcionamiento es de 6800 kPa



Figura 19: Controlador de flujo de metano

10. Quemador. En la serie de experimentos realizados, se ocuparon dos quemadores de medios porosos. Uno de cuarzo y otro de acero inoxidable.

Quemador de cuarzo: Está compuesto por un difusor, una carcasa de cuarzo, una tee alojada debajo del difusor, una varilla central con 6 perforaciones y esferas de alúmina (Al_2O_3) de 5,4 mm y de 3 mm. Al interior de cada perforación se aloja una termocupla.

- a. Difusor: Es una pieza de aluminio encargada de mezclar los gases antes de la entrada al quemador. Tiene una forma similar a una brida, con 4 agujeros para fijarlos al soporte del quemador y doce pequeñas perforaciones para distribuir los gases uniformemente. Por la perforación central pasa la varilla de termocuplas junto con los gases que arriban al difusor. Hacia la parte superior del quemador se encuentra sellado el agujero central para fijar la varilla y para que los gases se mezclen correctamente en la precámara. Los 12 agujeros son los encargados de proporcionar los gases hacia la zona de quemado, repartiéndolos en toda el área transversal del quemador. En la Figura 20 se encuentran dos fotografías del difusor que muestran su vista superior e inferior.



Figura 20: Difusor de quemador de cuarzo

- b. Carcasa de cuarzo: Es la pieza que se encarga de empaquetar y contener el medio poroso. Al interior de él ocurren las reacciones de combustión por lo que debe soportar altas temperaturas. Su diámetro interno es de 41 mm, su

altura de 210 mm y su espesor de 1,5 mm. En la Figura 21 se muestra una imagen del cilindro de cuarzo.



Figura 21: Cilindro de cuarzo, carcasa del quemador

- c. Tee de alimentación: Cumple la función de suministrar los gases combustibles a la vez que permite el paso de la varilla de termocuplas por dentro del quemador. En la Figura 22 se muestra la tee en el montaje. Por la parte inferior se encuentra la salida de termocuplas mientras que por el lateral está la entrada de los gases. Por la parte superior de la tee sube la varilla de termocuplas y los gases combustibles pasan por alrededor de ella para llegar al difusor.



Figura 22: Tee de alimentación de gases combustibles

- d. Varilla de termocuplas: Esta varilla de cerámica está diseñada para proteger las termocuplas de las microllamas que se generan en el medio poroso. Permite además ubicar cada termocupla en su ubicación correspondiente. En la Figura 23 se muestra una fotografía de la varilla con las termocuplas al interior de ella. Mide 320 mm de longitud.

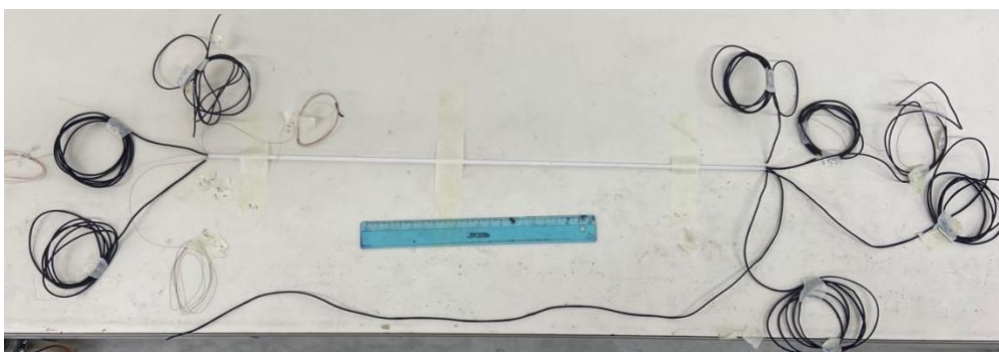


Figura 23: Varilla de termocuplas

- e. Esferas de alúmina: Son el medio poroso del quemador. Las hay de dos tamaños de 5,6 mm y de 3 mm. Otorgan la porosidad al quemador para que se comporte como un lecho empacado. Permite que se confine la llama para aprovechar los efectos de la combustión dentro de un sólido inerte poroso. Los dos tamaños de esfera están diseñados para propiciar una zona de

estabilización de la llama (la interfaz entre los medios porosos). Las esferas más pequeñas producen una mayor superficie de contacto y una menor porosidad, por lo que el movimiento del frente de combustión en esa zona es más lento, ayudando a la estabilización de la llama en la interfaz.

Quemador de Acero: Este quemador está compuesto por un difusor, una base del difusor, una carcasa de acero inoxidable, 10 varillas para alojar termocuplas, material aislante tanto en el interior como exterior del quemador y esferas de alúmina de tamaño 5,4 mm y de 3 mm. Estas esferas son las mismas utilizadas en el quemador de cuarzo, por lo que se encuentran descritas en el inciso e. de los componentes del quemador de cuarzo,

- a. Difusor: Cumple la función de premezclar los gases combustibles antes de que ingresen al quemador. Está fabricado en acero. En la Figura 24 se encuentra un boceto del difusor. En el anexo 4 se encuentra el plano del mismo.

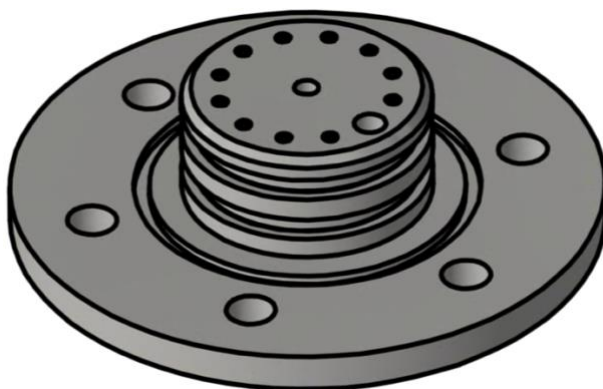


Figura 24: Difusor de quemador de acero inoxidable

- b. Base de difusor: Cumple la función de acoplar el difusor con la plancha de acero que soporta el quemador. Está fabricado también en acero y en la Figura 25 se encuentra una imagen isométrica de su forma. En el anexo 4 se encuentra su plano completo.

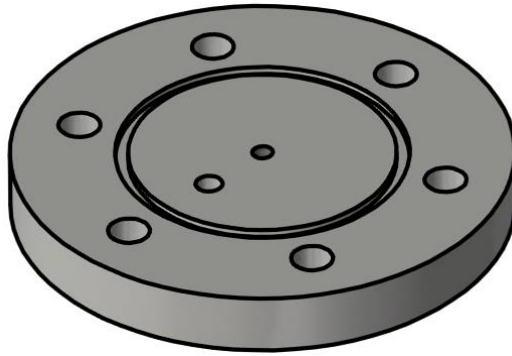


Figura 25: Base de difusor de quemador de acero

- c. Quemador de acero (carcasa): Es el “corazón” del quemador. La carcasa es donde se aloja el medio poroso y donde ocurre la reacción de combustión. Posee 51 mm de diámetro interno, 2 mm de espesor y 300 mm de alto. Es importante destacar que el diámetro interno real con el que se hicieron pruebas, es menor a ese valor producto del aislamiento con el que fue recubierto. Su diámetro real en operación fue 45,8 mm. En la se muestra un esquema isométrico de la carcasa. En el anexo 4 se encuentra el plano completo.

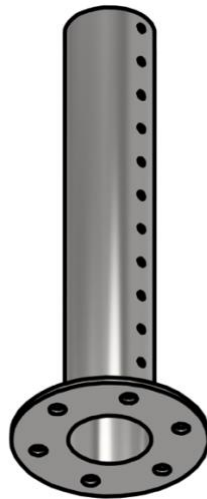


Figura 26: Dibujo isométrico de quemador de acero

- d. Varillas de Termocuplas: Cumplen la función de alojar los termopares para que puedan medir la temperatura sin estar en contacto directo con el medio poroso del quemador. Están fabricadas de cerámica, por lo que se deben manipular con mucho cuidado. En la Figura 4 donde se muestra el quemador, se puede ver la disposición de las 10 varillas donde se alojan las termocuplas. Éstas atraviesan transversalmente el quemador y permiten un montaje más rápido que los termopares del quemador de cuarzo.
- e. Material aislante: Se utilizó lana refractaria para aislar el interior y exterior del quemador. El aislamiento interno estaba pensado para proteger el quemador de acero de las altas temperaturas alcanzadas en el interior. El aislamiento externo se utilizó para impedir que mayor cantidad de calor escapara y tener valores de temperatura más altos, perdiendo el menor calor posible con el exterior.

11. Campana de extracción: Es la encargada de retirar los gases residuales de la combustión del ambiente. Cuenta con un mesón con cubierta de acero inoxidable para montar el quemador con sus conexiones. Además, en la parte inferior cuenta con estantes para guardar material de laboratorio. Para evitar que los gases entren en contacto con las personas en la zona de pruebas, las campanas están cerradas con una protección de vidrio deslizante. En la Figura 27 se muestra la estructura completa de la campana con el quemador instalado al interior.



Figura 27: Campana de extracción

12. Extractor de aire: Su potencia es 2 kW. Permite un caudal de aire de 1500 m³/h. Se encarga de remover los gases de escape que se emiten desde la campana. Es la forma principal de extracción de los gases
13. Analizador de gases: De marca Testo, modelo 350. Este equipo sirve para medir la concentración de gases en el ambiente mediante una sonda que succiona aire con un pequeño soplador que tiene en su interior. Con él se pueden conocer las concentraciones de diversos gases contaminantes y no contaminantes. Estos gases son: Oxígeno (O₂) medido en porcentaje, monóxido de carbono (CO) medido en ppm, óxidos de nitrógeno (NO_x) en ppm, dióxido de azufre (SO₂) en ppm, y otros gases como humo y dióxido de carbono máximo. Al ser capaz de medir múltiples gases, su rango y resolución se detallarán para cada gas. El rango de temperatura es de -20°C hasta +50°C y su resolución de 0,1°C. En la Figura 28 se muestra el equipo.



Figura 28: Equipo de medición Testo 350

Sus especificaciones del equipo, mostradas en la Tabla 2, fueron extraídas de su instructivo oficial (Testo SA) varían para cada sensor de gas distinto.

Tabla 2: Especificaciones de Testo 350 para cada gas

Tipo de gas	Rango	Resolución	Tiempo de respuesta	Precisión
CO	0-10.000 ppm	1ppm	< 40 s	0-199 ppm, ± 10 ppm
				200-2000 ppm, $\pm 5\%$ del valor de lectura
				2000-10.000 ppm, $\pm 10\%$ del valor de lectura
NO _x	0-4.000 ppm	1 ppm	< 30 s	0-99 ppm, ± 5 ppm
				100-1999 ppm, $\pm 5\%$ del valor de lectura
				2000-4000 ppm, $\pm 10\%$ del valor de lectura
O ₂	0-25% vol.	0,01% vol.	< 20 s	$\pm 0,2$ %vol.

14. Analizador de Amoníaco: Su marca es Safe Gas modelo SKY6000-PM. Cuenta con un rango de 0 – 5000 ppm, una resolución de 1ppm y una precisión de $\leq \pm 2\%$ F.S (Para el rango de 0-5000 ppm, el error máximo es de 100 ppm). Su temperatura de operación es de -20 a 50°C y su muestreo es por succión.

Dada la naturaleza corrosiva del amoníaco, el equipo TESTO no está diseñado para medir la concentración de NH_3 , por ello se empleó este equipo de procedencia china, capaz de precisar la cantidad de amoníaco a la salida de los gases de escape. En la Figura 29 se muestra el equipo de medición con su respectiva sonda.



Figura 29: Equipo de medición de amoníaco con su sonda

15. Adquisidor de datos Omega OMB-DAQ-56: Este equipo se utilizó para adquirir y guardar los datos de la temperatura de las termocuplas del quemador (ver Figura 30). Es un adquisidor de datos con 10 canales de entrada análogos, más otros 5 de entrada y 5 de salida digital. El funcionamiento de las termocuplas es mediante un voltaje generado al aplicar calor sobre la unión de dos metales, por lo que se utilizaron las entradas análogas del adquisidor. Para visualizar y guardar los datos, se empleó un programa de Windows 7 llamado “Personal daq view”, el cual permitía mostrar los datos de temperatura en tiempo real y almacenar la información adquirida en el tiempo. Este programa estaba configurado para que la

señal de voltaje se transforme a temperatura y pueda ser mostrado en la pantalla directamente como temperatura, sin tener que convertir manualmente los valores de voltaje a temperatura según la escala correspondiente. Al guardar una serie de mediciones, éstas se almacenan en un archivo de texto separado por tabulador y que las columnas corresponden a la hora, la fecha y la temperatura en ese instante de cada termocupla.



Figura 30: Adquisidor de datos Omega OMB-DAQ-56

Sus especificaciones son (Omega, 2025):

- Alimentación: Alimentado desde el USB, o desde una fuente externa de 6 a 16 Vcc cuando se utiliza con un hub de alimentación por bus.
- Temperatura de operación: De 0 a 50 °C HR del 95% (sin condensación).
- Convertidor analógico/digital de 22 bits de alta resolución.
- Compensación de junta fría incorporada para mediciones directas de termopar.
- Mediciones de frecuencia de hasta 1MHz
- Entradas programables desde ± 31 mV hasta ± 20 V

3.4 Descripción del procedimiento experimental

En el siguiente subcapítulo se detalla el procedimiento y el desarrollo práctico de las pruebas, junto a la adquisición de datos. Además, se busca documentar paso a paso las etapas de los experimentos, con el fin de asegurar trazabilidad y repetibilidad de los resultados.

Para cada experimento, se monitorearon diferentes parámetros. Estos fueron mencionados en el capítulo 2 y son la relación de equivalencia (φ), el flujo másico específico ($\dot{m}_{\text{flux}}$) y la potencia (P). Además, se varió el porcentaje de cada gas en la mezcla. Existiendo mezclas de metano, metano-amoniaco, metano-amoniaco-hidrógeno, metano-hidrógeno y amoniaco-hidrógeno.

Los experimentos realizados con los dos quemadores fueron bastante similares, en donde las principales diferencias, radican en las variables dependientes e independientes que fueron modificadas, pero como se mencionó antes, la secuencia de pasos es la misma en el caso del quemador de cuarzo y acero.

1. Verificar que se cumplan todas las medidas de seguridad: Extintor, presencia de epp y sistemas de extracción de aire en funcionamiento.
2. Despichar la unidad de compresión para evitar humedad en el aire al ingresar a la zona de combustión.
3. Encender la unidad de compresión y esperar unos minutos a que acumule presión. Luego abrir el controlador de flujo de aire para dejar pasar un flujo inicial antes de inyectar combustible.
4. Abrir las válvulas de combustible y dejar los controladores de flujo cerrados.
5. Comenzar el registro de temperaturas en el computador.
6. Dar ignición con una mezcla de aire-metano, mediante el chispero eléctrico. Luego esperar a que la temperatura aumente para que la llama se confine. Se usa una mezcla estequiométrica para que la llama al confinarse viaje aguas arriba. En este punto se diferencian las dos experiencias, pues los quemadores tienen diferentes diámetros y trabajan a diferentes potencias. Para el quemador de cuarzo se utilizó un flujo de encendido de 19,15 slpm de aire y 2,01 slpm de metano. El quemador de acero inoxidable utilizó 34,4 slpm de aire y 3,6 slpm de metano.
7. Encender los 2 detectores de amoniaco para monitorear los niveles de amoniaco en el ambiente. Uno se posiciona en el exterior y el otro al interior de la campana de combustión.

8. Cuando el frente de combustión se encuentra cercano a la interfaz de los tamaños de esferas, se cambia el flujo de gases combustibles y aire por los correspondientes a la prueba.
9. Se debe esperar a que el frente de llama se estabilice. En ocasiones el frente tiende a viajar aguas abajo y estabilizarse en ese punto. El criterio utilizado para clasificar un punto como estable, es que todas las termocuplas del quemador no varíen más de 10°C en 2 minutos.
10. Una vez el punto se considera estable, se procede a medir la concentración de los gases de escape. Si bien el orden no es relevante, primero se mide la concentración de NO_x, CO y O₂ con el equipo Testo 350. Gracias a este equipo se registran los niveles de: Oxígeno (O₂) para tener una noción de la dilución de nuestros gases de escape en la campana. Monóxido de carbono, pues arroja información sobre combustión completa o incompleta en mezclas con metano. Óxidos de nitrógeno NO_x, estos gases son tóxicos para la salud y es necesario conocer su concentración. Suelen producirse por la reacción química del nitrógeno con el aire a alta temperaturas.

El procedimiento de medición de gases es el siguiente: primero se apaga la campana de extracción para que los gases de escape no sean succionados violentamente de la campana y se puedan medir bien sus concentraciones. Luego se introduce la sonda del equipo Testo 350 y se registra la hora. Se le deben sumar 3 minutos a esa hora, pues durante dos minutos exactos se mide concentración de gases y al tercer minuto se retira la sonda. Tras retirar la sonda, se vuelve a encender el extractor de aire para ventilar la campana del exceso de gases de combustión que se alojaron durante el tiempo de medición. Finalmente se descarga un Excel con los datos de medición de esa prueba.

11. Tras terminar la medición de gases con el Testo, se mide la concentración de amoníaco con su respectivo instrumento. El procedimiento es similar, pues se apaga el extractor de aire, se introduce la sonda y se espera el mismo tiempo de 3 minutos para registrar datos. Luego se retira la sonda y se vuelve a encender la

- campana. Los datos del analizador de amoníaco se descargan al final del día de prueba pues es un proceso más lento y es mejor almacenarlos todos en un archivo.
12. Una vez terminado con un punto de medición, se vuelve al punto 5, es decir volver a estabilizar un nuevo flujo. No obstante, si las pruebas han llegado a su fin, se da inicio al proceso de apagado. Éste comienza cerrando los controladores de flujos de todos los combustibles, el aire se mantiene abierto para enfriar el quemador.
 13. Se cierran las válvulas internas de todos los gases, ya sean las de paso como las reguladoras de presión. A continuación se cierran las válvulas externas y de los cilindros.
 14. Se apaga el suministro de aire y se desenchufa el compresor.
 15. Se deben traspasar los datos de mediciones de amoníaco al computador mediante un cable usb. Los datos de temperatura están almacenados en un computador del laboratorio, por lo que con un pendrive se extraen.

3.5 Experimentos realizados en quemador de cuarzo

Previamente se mencionó que los experimentos para los dos reactores tenían procedimientos similares pero se diferenciaban en las variables que afectaban a los experimentos. A continuación se detallarán todos los experimentos realizados en el quemador de cuarzo.

El principal objetivo de las pruebas realizadas a este quemador, era obtener mapas de estabilidad de llama, medir temperaturas al interior del quemador y medir gases de escape la salida. Por problemas con uno de los equipos de medición de amoníaco, no se pudieron realizar mediciones, salvo en dos ocasiones antes que fallara el equipo.

En este quemador se llevaron a cabo 4 mezclas diferentes de metano-amoníaco. La primera fue 100% metano, la segunda con 10% de amoníaco, la tercera con 30% de amoníaco, y la cuarta un 50% amoníaco.

Se varió la relación de equivalencia entre 0,7 y 1 y el flujo másico específico entre 0,1 a 0,3 kg/s·m², manteniendo los demás parámetros constantes. La potencia también se

vio modificada pero como variable dependiente del flujo másico específico. Por cada mezcla de gases, se hicieron 12 pruebas, es decir en total se llevaron a cabo 48.

Las ecuaciones de la relación de equivalencia (2-12) y del flujo másico específico (2-15) involucran los flujos volumétricos medidos en los controladores de flujo y las fracciones de hidrógeno o metano en la mezcla. Las fracciones son valores que se conocen con antelación, pero los flujos volumétricos deben ser conocidos para determinar una relación de equivalencia específica. Esto a su vez altera el flujo másico, por lo que para resolver estas ecuaciones se empleó el Solver de Excel.

El método consiste en el fijar el valor de la celda que contiene el cálculo del flujo másico específico. Posteriormente se deben seleccionar las celdas independientes que cambiarán sus valores. Éstas contienen a los valores de flujos volumétricos de los gases y el aire. Luego se aplican las restricciones correspondientes que son los parámetros a mantener fijos. El porcentaje de hidrógeno en la mezcla (para el quemador de cuarzo este valor siempre es 0), el porcentaje de metano en la mezcla (γ) y la relación de equivalencia (ϕ). Con todo lo anterior resuelto, al presionar resolver, Excel entrega los valores de los flujos volumétricos que cumplen con el flujo másico específico y relación de equivalencia.

En el anexo 5 se encuentra la lista completa de las 48 condiciones a las que se ensayaron con el quemador de cuarzo.

3.6 Experimentos realizados en el quemador de acero

Para el quemador de acero inoxidable, los objetivos que se tenían en mente eran combustionar diferentes mezclas de gases que no habían sido probadas en el quemador de cuarzo (hidrógeno-metano, hidrógeno-amoniaco y metano-amoniaco-hidrógeno), medir las emisiones de los gases de escape y trabajar con potencia de 2kW. A modo de registro para saber cuándo el frente de llama se estabiliza, también fueron medidas las temperaturas para estas pruebas.

Mapear zonas de estabilidad de llama no era un objetivo en las pruebas del quemador de acero, por ende el rango de pruebas fue menor a las realizadas con el quemador anterior, pero se repitieron 3 veces para asegurar la validez de los resultados.

Sin embargo, hubo más pruebas ensayadas que las mostradas en la Tabla 3 y que su resultado fue inestabilidad, ya sea provocada por flashback o por blow out. En el anexo 7 se encuentran los resultados de ciertas pruebas clasificadas como inestables, realizadas en el quemador de acero.

Al igual que con los experimentos del quemador de cuarzo, las ecuaciones para obtener los flujos de los gases, se resolvieron con la herramienta Solver de Excel. En este caso, se siguió un procedimiento similar, pero en vez de fijar el flujo másico específico a un valor determinado, se fijó la potencia en 2kW.

Las mezclas trabajadas en este quemador fueron las siguientes:

Tabla 3: Mezclas trabajadas en las pruebas de quemador de acero inoxidable

#	Mezcla	ϕ	Flujo de aire [slpm]	Flujo de metano [slpm]	Flujo de amoníaco [slpm]	Flujo de hidrógeno [slpm]
1	30% H ₂ + 70% CH ₄	0,6	55,9	3,2	-	1,4
2	40% H ₂ + 60% CH ₄	0,5	67	3	-	2
3	50% H ₂ + 50% CH ₄	0,5	66	2,76	-	2,76
4	50% NH ₃ + 50% CH ₄	0,8	42	2,58	2,58	-
5	70% NH ₃ + 30% CH ₄	0,8	42	1,87	4,37	-
6	90% NH ₃ + 10% CH ₄	0,9	36,6	0,79	7,12	-
7	70% NH ₃ + 20% CH ₄ + 10% H ₂	0,7	46,83	1,41	4,94	0,71
8	70% NH ₃ + 20% CH ₄ + 10% H ₂	0,9	38,21	1,48	5,19	0,74
9	65% NH ₃ + 15% CH ₄ + 20% H ₂	0,7	46,85	1,16	5,04	1,55
10	70% NH ₃ + 30% H ₂	0,6	53	-	6,88	2,95
11	85% NH ₃ + 15% H ₂	0,7	46	-	8,04	1,42

3.7 Procedimiento de procesamiento de datos

Por cada prueba realizada se obtiene una gran cantidad de datos, desde emisiones hasta los valores de la temperatura, además el formato de entrega de datos de los distintos

equipos no es uniforme, por lo que se debe realizar un tratamiento para poder analizarlos y presentarlos de buena forma.

3.7.1 Temperatura

La temperatura se mide cada 2 segundos en las 6 termocuplas del quemador de cuarzo, y 10 termocuplas del quemador de acero. Se empieza a medir antes de encender el reactor para dar seguimiento constantemente la temperatura y poder actuar en caso de una emergencia. Además, es crucial monitorear la temperatura pues permite saber cuando el quemador se aproxima a la interfaz de los medios porosos y permite identificar cuando un frente de combustión se estabiliza.

Los datos son entregados por el programa como un archivo de texto con valores separados por tabulación. Las columnas corresponden a la fecha, hora y las termocuplas. Las filas corresponden a la hora con su correspondiente lectura de temperaturas. Para poder darle un tratamiento adecuado a los datos, son importados a Excel con Power Query. En el archivo de Excel, se deja una hoja principal con todos los datos del día. Mediante la bitácora que se llevó a cabo diariamente para todas las pruebas, se identifica en la hoja principal, los tiempos que corresponden a cada prueba. Luego, estos valores son copiados a una hoja secundaria que solo contiene información de una prueba específica. Con la información de la bitácora se puede conocer la hora en que se estabiliza el frente de combustión, sin embargo esa información debe ser corroborada en Excel verificando que la temperatura de todas las termocuplas no varíe más de 10 °C en 2 minutos. Una vez confirmado que existe estabilidad del frente de combustión, se calcula el promedio de las temperaturas de todas las termocuplas durante 2 minutos. Esos valores representan las temperaturas de dicho punto.

3.7.2 Emisiones de gases (CO, NO_x, NO y O₂)

Las emisiones de estos gases, fueron capturadas mediante el equipo Testo 350. Éste otorga un fácil procesamiento de datos pues permite extraer un archivo de Excel directamente de la medición. Se puede conectar directamente a un computador

mediante un cable usb tipo A e incluso permite controlarlo desde el pc con la aplicación oficial de Testo. Desde esa aplicación se pueden iniciar y finalizar pruebas, modificar parámetros operacionales, calibrar a cero el sensor, entre otras funciones. La ventaja de este equipo, es que al finalizar una medición, automáticamente se pueden exportar los valores obtenidos en un archivo Excel que en sus columnas muestra los valores de las emisiones CO, NO, NO_x y O₂ ordenadas cronológicamente con su respectiva columna de tiempo. Posteriormente se calcula el promedio de las mediciones en los 2 minutos que dura la lectura de gases y ese nivel de emisión antes de la corrección por O₂. Finalmente se aplica la ecuación 3-1 que corrige el valor obtenido previamente para que todas las pruebas estén en base al mismo nivel de oxígeno. La referencia tomada es 15% de concentración en volumen.

$$X_{i,15\%O_2,seco} = X_{i,seco} \frac{X_{O_2,aire} - X_{O_2,ref}}{X_{O_2,aire} - X_{O_2,seco,muestra}} \quad (3-1)$$

Donde $X_{i,seco}$ es el valor de lectura del gas analizado. $X_{O_2,aire}$ es el valor del aire en la atmósfera (21%) y se trata como constante en esta ecuación, $X_{O_2,ref}$ es el valor tomado como referencia de O₂ a la salida y es una constante también, toma valor de 15%. $X_{O_2,seco,muestra}$ es el valor de lectura de oxígeno en los gases de escape. Y $X_{i,15\%O_2,seco}$ es el resultado de normalizar el nivel del gas analizado a un 15% de oxígeno.

3.7.3 Emisiones de NH₃ no quemado (slip)

El dispositivo de medición de amoníaco, es capaz de registrar y mostrar en tiempo real los datos. El equipo muestra en su pantalla el valor de medición (la concentración de amoníaco está medida en partes por millón) y lo actualiza cada 1 segundo, sin embargo, el valor de medición queda guardado en la memoria del dispositivo cada 5 segundos. El procedimiento para extraer la información es mediante un cable usb que se conecta entre el medidor y el computador. El sensor en ese momento pasa al modo transferencia de datos y funciona como una memoria usb. Desde el pc se extrae el archivo que viene en formato csv (valores separados por comas) y se importa a Excel para la posterior revisión de los datos. Ya con el archivo Excel, se calculan los promedios de los valores

de NH_3 durante 2 minutos. El promedio de dichos valores es lo que se considera el valor de una prueba. Finalmente, al igual que para la medición de los demás gases, se aplica la ecuación 3-1 y se corrige el valor obtenido previamente para que todos los resultados estén en base al mismo nivel de oxígeno (15% en volumen).

4 Presentación y análisis de resultados

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos de la serie de experimentos descritos en el desarrollo experimental. Se analizarán tendencias y patrones, además de darle un sentido a los datos obtenidos. El análisis se divide en los dos quemadores. Primero para el quemador de cuarzo, se presentarán zonas de estabilidad, perfiles de temperatura y las emisiones que se realizaron. Luego para el quemador de acero, se presentará temperatura y emisiones.

4.1 Quemador de cuarzo

4.1.1 Zonas de estabilidad operacional

En el quemador de cuarzo se ensayaron 48 puntos operacionales diferentes, 12 por cada variación en el porcentaje de amoníaco-metano en la mezcla. Para validar los puntos operativos, se realizaron dos pruebas en los puntos que no estaba totalmente claro el fenómeno que ocurría. En algunos casos, incluso se obtuvieron resultados diferentes para los mismos parámetros. En la Figura 31 se muestran los resultados de las zonas de estabilidad. Las pruebas con más de un color, significa que se obtuvieron resultados distintos en sus dos pruebas. El número pequeño en la parte inferior de cada cuadrado representa el número de pruebas que se realizó en dicho punto de estudio. Las letras significan el régimen de operación que se obtuvo en las pruebas. “E” significa extinción de llama. “F” significa flashback o retroceso de llama. “B” es blow-out o desconfinamiento y “S” es régimen estable.

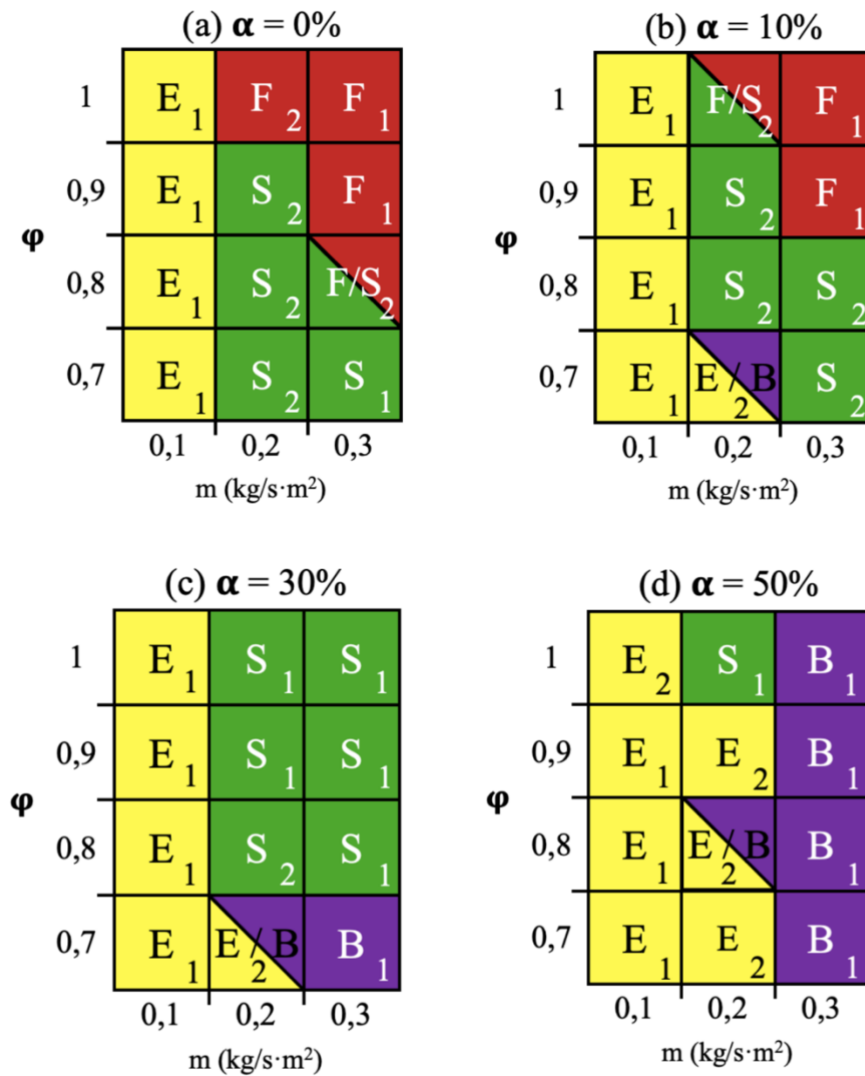


Figura 31: Mapas de estabilidad operacional para a) $\alpha = 0\%$, b) $\alpha = 10\%$, c) $\alpha = 30\%$, d) $\alpha = 50\%$. Los números pequeños en la parte inferior de cada cuadrado, muestra el número de repeticiones de cada prueba.

Las zonas de estabilidad de operación del quemador de cuarzo, muestran que en todos los casos, las pruebas con flujos máscicos de 0,1 kg/s·m² resultan en la extinción de llama. Esto quiere decir, que flujos máscicos específicos muy bajos, no logran sostener la reacción de combustión al interior del quemador.

Para el caso base de 100% metano, existen 4 zonas de estabilidad y 1 zona de estabilidad/flashback. Tal como se ve en la Figura 31a, las zonas de flashback tienden

a aparecer cuando la razón de equivalencia se acerca a 1 y cuando el flujo másico específico aumenta a $0,3 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$.

En la Figura 31b, con mezclas de $\alpha = 10\%$, la zona de estabilidad es bastante similar al caso base. Existen ahora 4 puntos completamente estables y uno que mostró en una repetición comportamiento estable y en otra flashback. Este punto tiene un flujo másico específico de $0,2 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ y su razón de equivalencia es 1. Los puntos inestables, siguen siendo los puntos de flujo másico específico de $0,3 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ con razón de equivalencia de 0,9 y 1.

El caso de $\alpha = 30\%$, es de las 4 mezclas, la que presenta mayor cantidad de zonas de combustión estable. En total presenta 6 puntos de estabilidad, todos ubicados en la parte superior derecha de la Figura 31c. Para esta composición de amoníaco – metano, se cumple que: a mayor flujo másico específico y a mayor relación de equivalencia, se obtiene mayor estabilidad de llama. Con flujos másicos específicos muy bajos, la llama se extingue y no se mantiene una combustión. Con φ muy bajos, se presenta extinción de llama para flujos másicos bajos, y blow out para flujos mayores. Se pudo apreciar que con el aumento del amoníaco al 30% en la mezcla, desaparece el fenómeno de flashback.

Las pruebas con mezclas correspondientes a $\alpha = 50\%$, vieron reducida su zona de operación estable en comparación a las mezclas anteriores. Solamente hubo uno de los 12 puntos de esta mezcla que presentó una combustión estable. Tal como se ve en la Figura 31d, este punto fue $\varphi = 1$ y el flujo másico específico de $0,2 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$. Con ese flujo másico y menor razón de equivalencia, las mezclas tienen un comportamiento de extinción de llama, salvo por $\varphi = 0,8$ que en la segunda repetición mostró blow out. Por su parte, las mezclas con flujo másico específico de $0,3 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$, en todas las relaciones de equivalencia estudiadas se presentó el fenómeno de blow out. Al igual que en todas las mezclas anteriores, para el flujo másico específico de $0,1 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$, la combustión es inestable y resulta en extinción.

A modo de resumen, la estabilidad se ve afectada por tres factores. El nivel de metano-amoníaco de la mezcla, el flujo másico específico y la razón de equivalencia. La concentración de amoníaco genera una zona de mayor estabilidad en torno al 30%. Luego el rango estable se reduce, y con menor porcentaje también se ve reducido. El flujo másico específico bajo genera fenómeno de extinción de llama. Mientras que muy alto tiende a provocar y blow out a medida que aumenta la concentración de NH_3 . La razón de equivalencia mientras más alta, tiende a generar zonas estables. Pero al acercarse a 1, se produce flashback o blow out dependiendo de la cantidad de amoníaco en la mezcla. A razones de equivalencia bajas, se produce principalmente extinción para mezclas con alto porcentaje de NH_3 y zonas estables para bajo NH_3 .

4.1.2 Temperaturas alcanzadas por los puntos estables

A continuación se presentan diferentes gráficos con las temperaturas de los termopares para todas las configuraciones estables. Cabe destacar que cada termocupla se ubicó a 30 mm de separación entre ellas y en los gráficos están representadas en el eje horizontal mediante la distancia a la que se encuentra de la interfaz de medios porosos.

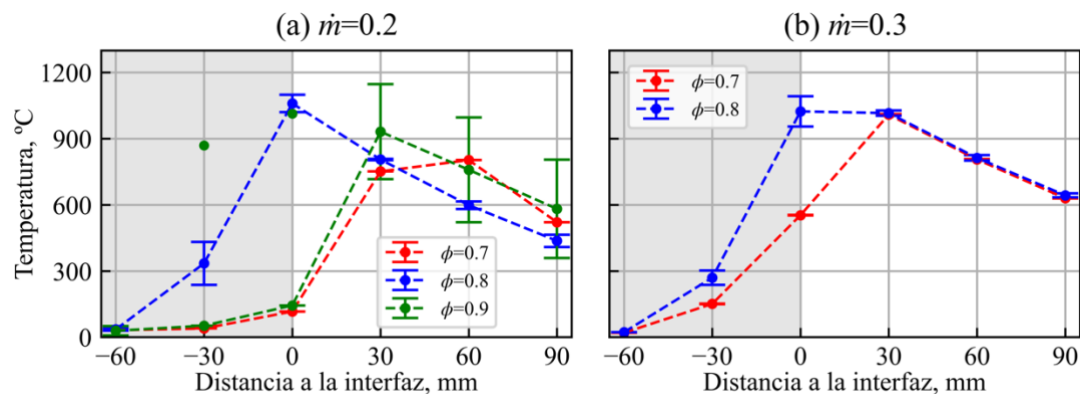


Figura 32: Gráfico de temperatura para mezclas de 100% CH_4

En este quemador se trabajó con una línea base de metano al 100%. Ésta está graficada en la Figura 32, donde se muestra en (a) las mezclas con flujo másico específico de 0,2 $\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$ y en (b) los flujos de 0,3 $\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$.

Para las mezclas con 100% metano, la temperatura más alta fue registrada en la mezcla de $\phi = 0,8$ y flujo másico específico de $0,2 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$. Ésta se estabilizó en la termocupla 3, es decir en la interfaz de medios porosos, y su temperatura registrada fue de 1060°C .

Dentro de los flujos másicos de $0,2 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ la mezcla con $\phi = 0,9$ presentó las segundas temperaturas más altas, llegando a los 930°C . La mezcla con $\phi = 0,7$ mostró temperaturas más bajas que las dos anteriores. Esto se debe a que una mayor cantidad de aire en la mezcla, provoca que la temperatura no llegue a niveles tan altos.

Las mezclas estables con flujo másico de $0,3 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ fueron con relación de equivalencia de $0,7$ y $0,8$. La mezcla con $\phi = 0,8$ tuvo una temperatura máxima mayor de 1016°C , ligeramente mayor a la de $\phi = 0,7$ que registró 1009°C . Sin embargo, la mezcla de $\phi = 0,8$ registró en dos termocupas una temperatura mayor a 1000°C , en la interfaz y a 30 mm aguas abajo de ésta.

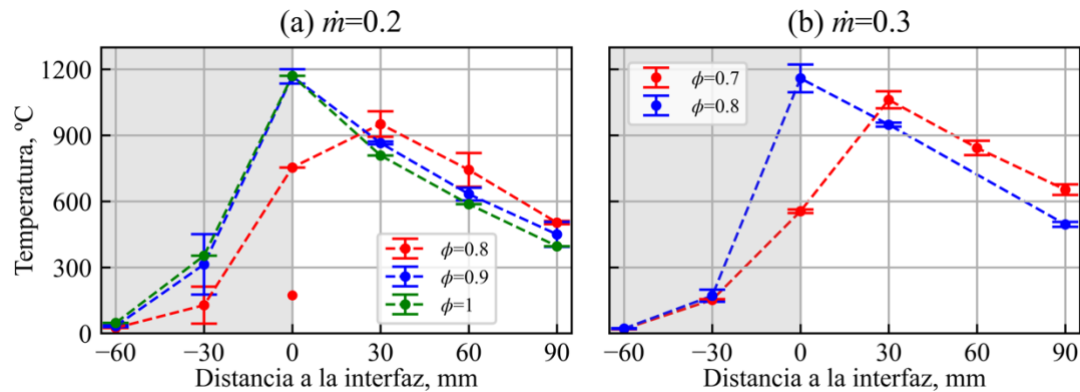


Figura 33: Gráfico de temperatura para mezclas de 90% CH₄ y 10% NH₃

La primera inyección de amoníaco a la mezcla fue solamente un 10%. En la Figura 33 se muestran los perfiles de temperatura de dicha mezcla. En Figura 33a se encuentran las mezclas con $\dot{m}_{\text{flux}} = 0,2 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ y en la Figura 33b las mezclas de $\dot{m}_{\text{flux}} = 0,3 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$. De los puntos estables, tres de ellos fueron con $\dot{m}_{\text{flux}} = 0,2 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ y los dos restantes con $\dot{m}_{\text{flux}} = 0,3 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$. La temperatura más alta de estas mezclas es prácticamente un empate triple entre las siguientes mezclas: $\dot{m}_{\text{flux}} = 0,2 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ con

$\phi = 0,9$; $\dot{m}_{\text{flux}} = 0,2 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ con $\phi = 1$ y $\dot{m}_{\text{flux}} = 0,3 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ con $\phi = 0,8$. Las temperaturas alcanzadas por estas pruebas fueron 1170°C , 1168°C y 1159°C respectivamente. Con una diferencia de solo 11°C , se puede decir que las temperaturas de las 3 pruebas son casi idénticas. Es importante destacar que las pruebas con temperaturas más altas son las que también poseen una relación de equivalencia mayor. La mezcla correspondiente a $\dot{m}_{\text{flux}} = 0,2 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ con $\phi = 0,8$, tuvo una temperatura máxima menor a las mezclas mencionadas anteriormente. En concreto fue de 950°C . La temperatura máxima de la mezcla $\dot{m}_{\text{flux}} = 0,3 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ con $\phi = 0,7$ fue de 948°C . Ambas estuvieron muy cercanas, lo que demuestra que las zonas con razón de equivalencia menor, tienen una temperatura de estabilización menor y similar entre sí. Es importante destacar que mezclas con ϕ más alto, se estabilizaron en la interfaz, mientras que las mezclas con ϕ más bajos, se estabilizaron 30 mm aguas abajo de la interfaz.

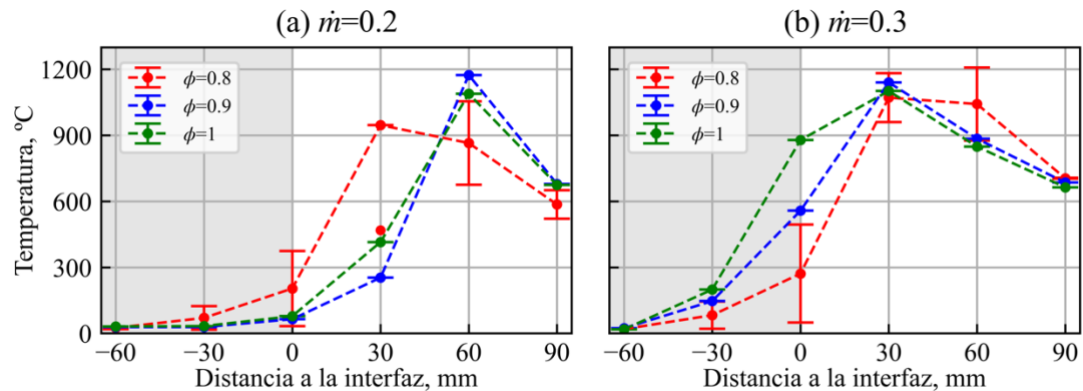


Figura 34: Gráfico de temperatura para mezclas de 70% CH_4 y 30% NH_3

El paso siguiente fue aumentar el amoníaco en la mezcla a 30%. Bajo esta condición de operación, hubo 6 puntos estables, más que en cualquier otro porcentaje de NH_3 . En la Figura 34 a) y b) se muestran los perfiles de temperatura a lo largo del quemador para los puntos ensayados con flujo másico específico de 0,2 y 0,3 $\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$ respectivamente. No hubo ninguna mezcla que se estabilizara en la interfaz, en su lugar lo hicieron aguas abajo, cuatro mezclas a 30 mm y dos a 60 mm.

La temperatura máxima alcanzada con este porcentaje de amoníaco fue de 1174 °C y se hizo en la condición de $\dot{m}_{\text{flux}} = 0,2 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ y $\varphi = 0,9$. Las demás temperaturas del frente de llama estuvieron en un rango similar, salvo para la condición de $\dot{m}_{\text{flux}} = 0,2 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ y $\varphi = 0,8$, que tuvo una temperatura máxima de 946 °C. Este punto de operación tuvo un dato anómalo en el punto de estabilización, pues para una de las pruebas, el termopar marcó 470 °C en dicho punto. Todas las demás estuvieron entre 1071 °C y los 1174 °C. Cabe destacar que para ambos flujos másico específicos, el punto con mayor temperatura se alcanzó en la mezcla con $\varphi = 0,9$.

También es relevante destacar que para la condición de $\dot{m}_{\text{flux}} = 0,2 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$, la única mezcla que se estabilizó en 30 mm fue la que tuvo menor φ , las otras dos lo hicieron a 60 mm. Para las mezclas con $\dot{m}_{\text{flux}} = 0,3 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$, las tres se estabilizaron a 30 mm de la interfaz.

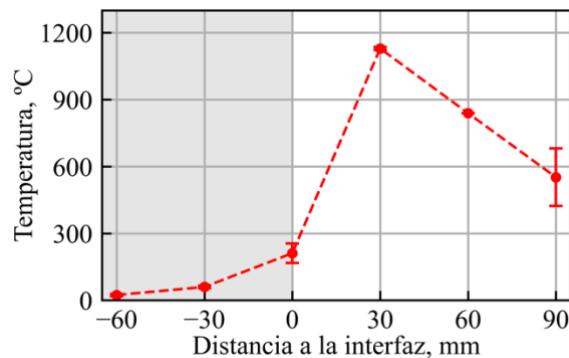


Figura 35: Gráfico de temperatura para mezclas de 50% CH₄ y 50% NH₃

El último caso estudiado en el quemador de cuarzo fue la mezcla de 50% NH₃. El punto estable se muestra en la Figura 35. Éste se estabilizó a 30 mm aguas abajo de la interfaz y su temperatura máxima fue de 1129 °C.

A modo de resumen de todos los puntos, se estabilizaron entre la interfaz y a 60 mm aguas abajo de ella. A medida que se aumenta el porcentaje de amoníaco, el punto de estabilización tiende a ser aguas abajo de la interfaz, pues desde las mezclas con 30% de amoníaco hacia arriba, ninguna se logró estabilizar en la interfaz.

La temperatura máxima alcanzada en este quemador fue de 1174 °C en la mezcla de 30% NH₃, $\dot{m}_{\text{flux}} = 0,2 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ y $\varphi = 0,9$. Hay bastantes puntos que presentan una temperatura máxima en torno a los 1100 °C, siendo las mezclas con 100% de metano en su composición las que tuvieron valores más bajos. Esto deja ver que el añadir amoníaco genera un aumento en torno a 100 °C en la temperatura máxima del quemador, mas no genera un aumento progresivo a medida que se sigue añadiendo amoníaco.

4.1.3 Emisiones de gases

En este quemador, solo se pudo medir emisiones de amoníaco durante un día de pruebas pues falló el equipo destinado a dicha tarea. Además, todavía no se había utilizado el equipo testo para analizar los demás gases, por lo que los únicos valores que se obtuvieron, están en la Tabla 4.

Tabla 4: Emisiones de amoníaco no quemado en pruebas de quemador de cuarzo

Composición de la mezcla	φ	Flux másico ($\dot{m}_{\text{flux}}$)	Emisión de NH ₃ en ppm	Desviación estándar
90% CH ₄ + 10% NH ₃	0,7	0,2	1012,08	425,56
90% CH ₄ + 10% NH ₃	0,8	0,2	1766,88	1375,77

Dada la falta de mediciones, no es mucho lo que se puede decir de las emisiones del quemador de cuarzo. Se midieron dos casos para mezclas con la misma proporción de combustibles y el mismo flujo másico, solo se varió la relación de equivalencia y la mezcla con $\varphi = 0,8$ presenta valores más altos que la mezcla $\varphi = 0,7$. Esto se produce porque al trabajar más cerca de la estequiometría, al amoníaco encontrar menos moléculas de oxígeno para reaccionar, mientras que al alejarse de la razón estequiométrica, existe un mayor exceso de aire y mayor facilidad de quemado.

Los valores de emisión de ambas pruebas son muy altos y por ningún motivo podrían ser emitidos directamente a la atmósfera a escala industrial.

Cabe destacar que al momento de la medición de NH_3 en el quemador de cuarzo, no había como conocer el valor de la concentración de O_2 en el ambiente, por lo que las mediciones realizadas son para hacerse una idea de la concentración emitida en una mezcla de metano – amoníaco.

4.2 Quemador de acero inoxidable

Para este quemador se realizaron menos pruebas, pues el foco era medir emisiones y trabajar con potencias de 2 kW. Además, se buscó operar con mezclas altas en amoníaco e hidrógeno pues el objetivo del proyecto es el desarrollo de un quemador dual de estos dos gases.

4.2.1 Máximos alcanzados y perfiles de temperatura

En la Figura 36 se muestran las temperaturas máximas alcanzadas por el quemador de acero, junto a la desviación estándar, puesto que para cada prueba se realizaron 3 repeticiones. Es importante destacar que una vez estabilizada la mezcla de combustible, se buscó la temperatura máxima alcanzada por el quemador en un instante, no en un intervalo. El valor del gráfico de temperaturas máximas muestra el promedio entre los 3 valores máximos alcanzados por cada prueba, para cada punto específico, por lo que es una marca del valor máximo que el quemador logra alcanzar. Para mejor visualización de los datos, se separaron por la composición del combustible. Éstas son: metano-hidrógeno, las mezclas de amoníaco-metano, las mezclas de amoníaco-hidrógeno-metano y las mezclas amoníaco hidrógeno.

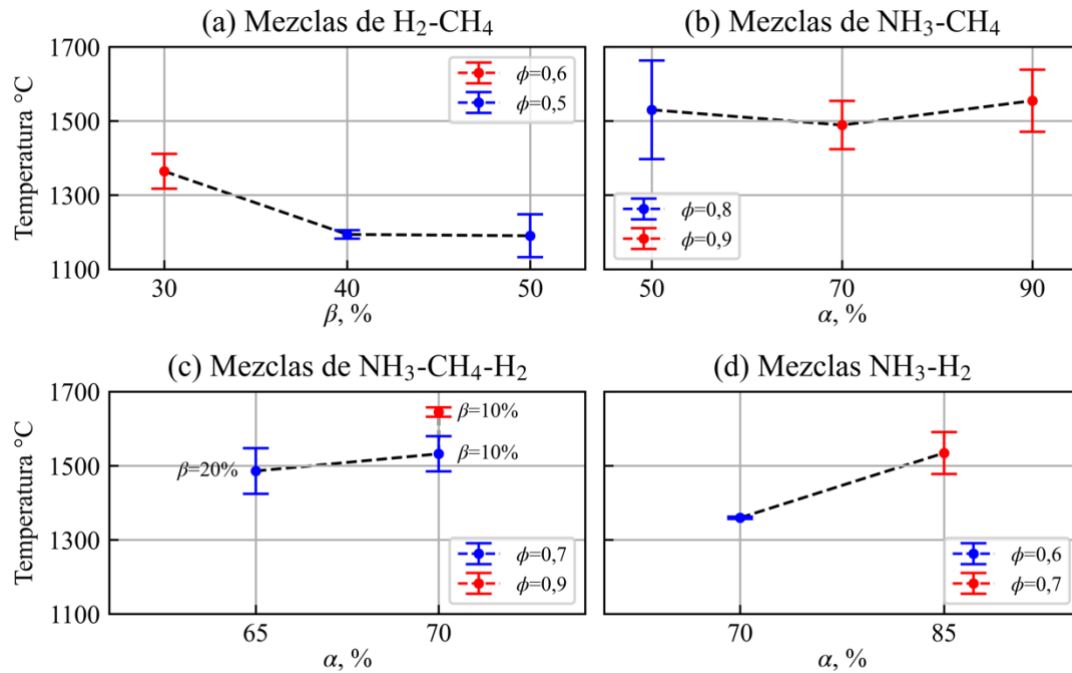


Figura 36: Gráfico de temperaturas máximas alcanzadas por las distintas pruebas del quemador de acero

De la Figura 36, se extrae que en las pruebas de este quemador, las temperaturas máximas oscilaron entre los 1190 °C y los 1670 °C y el valor más alto se alcanzó en la mezcla de los 3 gases, correspondiente a la Figura 36c. En esta mezcla compuesta por 70% NH₃, 20% CH₄ y 10% H₂. Con $\phi = 0,9$, se registró la temperatura más alta que fue de 1663 °C. De las otras dos pruebas de mezclas de 3 gases, una obtuvo un valor superior a los 1500 °C y la otra ligeramente inferior.

La Figura 36b, correspondiente a mezclas de amoníaco-metano es la segunda zona con resultados de temperaturas máximas más altas con dos pruebas registrando más de 1500 °C y la tercera estando ligeramente bajo esa marca.

La Figura 36d, mezclas de amoníaco-hidrógeno, se ubica debajo de las mezclas de amoníaco-metano en temperaturas máximas. Solo se realizaron dos pruebas en mezclas de esta composición, pero una de ellas sobrepasó los 1500 °C y la otra se ubicó por sobre los 1350 °C.

En la Figura 36a se muestran las temperaturas máximas de las mezclas metano-hidrógeno. Fueron las temperaturas máximas más bajas dentro de todas las mezclas de combustibles. Sus valores oscilan entre los 1190 °C y los 1370 °C.

De estas temperaturas máximas se pueden extraer ciertas conclusiones con respecto a la forma en que se queman los gases. Primero, se debe destacar que todas las mezclas se trabajaron a la misma potencia de 2kW. Esta es una potencia nominal, definida por el poder calorífico ponderado de los gases combustibles, calculado con la ecuación 2-13. No se puede determinar cuánta de toda esa potencia es aprovechada por el quemador, pues para ello se tendría que analizar cuánto calor producido es transferido a los alrededores o a un fluido de trabajo. Pero en líneas generales, se puede decir que a mayor temperatura, se tiene una combustión más eficiente.

El primer fenómeno interesante que se observa, es que a mayor porcentaje de hidrógeno en la mezcla, menor es la temperatura máxima alcanzada. En mezclas de metano-hidrógeno, con 30% de H₂ la temperatura máxima alcanzada es 1364 °C, con 40% de H₂ fue 1194 °C y con 50% de H₂ fue apenas más baja que con 40% (1190 °C).

Para las mezclas ternarias, la mezcla con mayor porcentaje de hidrógeno (20%) registró menor temperatura máxima (1485 °C) que las otras dos mezclas con 10% de H₂. La mezcla con $\varphi = 0,9$ obtuvo 1644 °C y la de $\varphi = 0,7$ obtuvo 1532 °C.

En el caso de las mezclas de amoníaco-hidrógeno, este fenómeno también se cumple, pues la mezcla de 70% NH₃ – 30% H₂ tuvo una temperatura máxima de 1359 °C, mientras que con una composición de 85%NH₃ – 15% H₂, la temperatura alcanzada fue de 1534 °C.

Destaca además, que las mezclas de 3 gases ponderan las temperaturas más altas. En particular, la mezcla de 70% NH₃, 20% CH₄ y 10% H₂ con $\varphi = 0,9$. La superioridad de temperatura con respecto a la mezcla de idénticas proporciones pero $\varphi = 0,7$ se debe a que al reducir la relación de equivalencia, ingresa más aire frío al quemador que no aporta a la combustión, por ende ese nitrógeno y oxígeno es inerte y ve elevada su

temperatura por la transferencia del calor generado en la combustión, sin oxidarse con el combustible.

Con respecto al amoníaco en conjunto con metano, se genera un aumento leve en la temperatura al aumentar la proporción de NH_3 . Resulta extraño que de las 3 mezclas de metano-amoníaco, la que presenta menor temperatura máxima sea la proporción 70% NH_3 30% CH_4 . Mientras que la mezcla 50-50 de estos gases, presentó una T_{max} de 40 °C mayor. La temperatura de la mezcla 90% NH_3 10% CH_4 , sí es mayor que las dos anteriores, con un valor de 1555 °C, 25 °C más que en el caso 50% NH_3 50% CH_4 .

En el caso de la combustión de amoníaco-hidrógeno, el aumento de temperatura máxima al aumentar el contenido de NH_3 es considerable. La temperatura pasa de 1359 °C a 1534 °C al pasar del 70% de NH_3 al 85% de NH_3 . Es probable que sea mucho más notorio este aumento respecto a las mezclas de NH_3 - CH_4 porque como se dijo anteriormente, el hidrógeno tiene un efecto reductor de la temperatura máxima.

Los gráficos de los perfiles de temperatura se muestran en la Figura 37 y Figura 38. Al igual que para las temperaturas máximas, se dividió en 4 gráficos para una mejor visualización. A diferencia de los gráficos de temperatura máxima, los valores de la termocupla de mayor temperatura fueron calculadas con el promedio de dos minutos de las temperaturas.

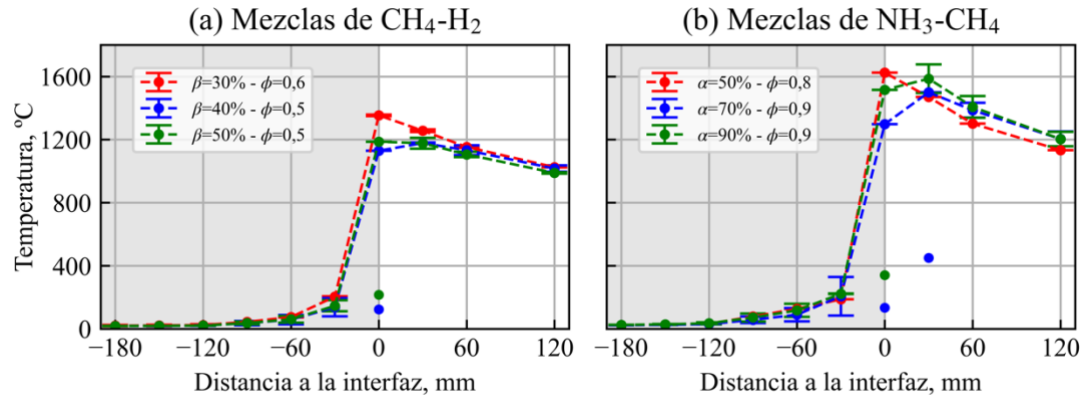


Figura 37: Perfiles de temperatura para (a) mezclas metano-hidrógeno y (b) mezclas amoníaco-metano

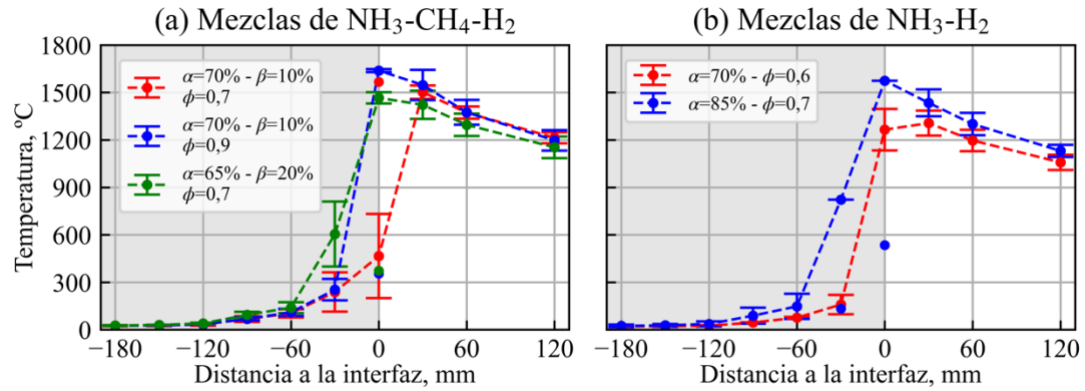


Figura 38: Perfiles de temperatura para (a) mezclas de amoníaco-metano-hidrógeno y (b) mezclas de amoníaco-hidrógeno

Las Figura 37 y Figura 38 muestran el perfil térmico completo del quemador de acero para todas las pruebas realizadas. La Figura 37a muestra información de las mezclas de metano-hidrógeno. Los perfiles de temperatura son bastante similares entre sí. La mezcla con $\beta=30\%$ junto con la mezcla de $\beta=50\%$, fueron estabilizadas en la interfaz, mientras la otra mezcla con $\beta=40\%$ lo hizo 30 mm aguas abajo. Destacar que con $\beta=30\%$ se alcanzó la temperatura máxima de estabilización. Estos datos presentaron dos casos anómalos, para la mezcla de $\beta=40\%$ y $\beta=50\%$. En la interfaz se puede ver que hay dos puntos en la parte inferior. Esto sucede porque para una de las pruebas, se estabilizó en otro punto la llama, generando alteración en el perfil térmico y para reajustarlo, se dejaron esos datos como anómalos en el gráfico.

La Figura 37b muestra las mezclas de amoníaco-metano. La mezcla con $\alpha=50\%$, se estabilizó en la interfaz de medios porosos. Las mezclas con $\alpha=70\%$ y $\alpha=90\%$ se estabilizaron 30 mm aguas abajo de la interfaz. Destaca que las temperaturas más altas son de las mezclas con 50% y 90% de amoníaco, ambas presentando valores cercanos a los 1600 °C. Se puede notar del gráfico que hay 3 puntos anómalos en la zona de las temperaturas más altas del quemador. Esto se produjo porque para algunas de las pruebas, el frente se estabilizó en una termocupla diferente, generando que en zonas que deberían tener temperaturas altas, aparecieran valores bajos.

La Figura 38a presenta los resultados de las mezclas ternarias. En este caso, dos mezclas se estabilizaron en la interfaz, mientras que la mezcla con $\alpha=70\%$, $\beta=10\%$ y $\varphi = 0,7$ lo hizo 30 mm aguas abajo. Justamente en la interfaz es donde hubo datos anómalos para todas las mezclas. Al igual que en los casos anteriores, esto es porque de las 3 pruebas realizadas, no se pudo estabilizar en el mismo punto todos los casos, generando que uno de ellos quedara desfasado y con los datos afectando radicalmente la curva del perfil de temperatura.

Finalmente, la Figura 38b presenta los perfiles de temperatura de las mezclas amoníaco-hidrógeno. La mezcla con $\alpha=85\%$ se estabilizó en la interfaz de medios porosos, con el detalle que presentó un dato anómalo en ese mismo punto. Este dato muestra una temperatura muy por debajo, por lo que en una de las pruebas el frente de llama se estabilizó en otro punto. La mezcla con $\alpha=70\%$, se estabilizó 30 mm aguas abajo y registró temperaturas menores a la mezcla con mayor cantidad de NH_3 .

En síntesis, la zona de estabilización para las distintas pruebas realizadas, se ubicó entre la interfaz y 60 mm aguas arriba. Las temperaturas alcanzadas fueron considerablemente más altas que en el quemador de cuarzo. El rango va desde los 1150 °C hasta los 1650 °C. Mientras que en el quemador de cuarzo, la máxima alcanzada fue de 1207 °C. Esto se debe a la mayor potencia empleada en el quemador de acero y a su aislamiento interno y externo. Tal como se mencionó anteriormente, la inclusión de amoníaco en la mezcla, genera un aumento sustancial en la temperatura de operación del quemador.

4.2.2 Niveles de emisión de gases

En el quemador de acero, se realizó un registro de las emisiones en todas las pruebas. Se midió monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno (junto a monóxido de nitrógeno), amoníaco no quemado y oxígeno. Este último solo se midió para poder establecer una referencia de O_2 y normalizar todas las mediciones de los demás gases al mismo nivel de oxígeno. Mediante la ecuación 3-1, se normalizaron todas las emisiones a un nivel de O_2 de un 15% a la salida del quemador, tomando como referencia 21% de oxígeno en el ambiente. Para los gráficos de las mezclas que contienen amoníaco e hidrógeno, solo se realizaron 2 pruebas, por lo que los gráficos se presentan en barras.

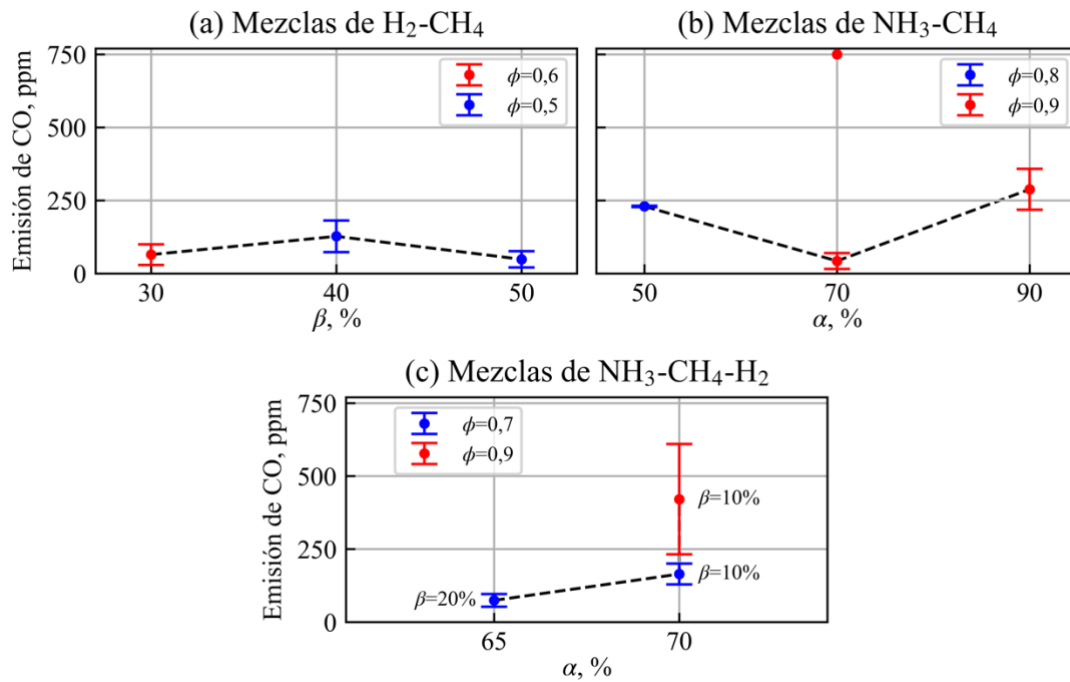


Figura 39: Gráficos de emisiones de monóxido de carbono para (a) Mezclas H_2-CH_4 (b) Mezclas NH_3-CH_4 y (c) Mezclas $NH_3-CH_4-H_2$

En la Figura 39, se observan las emisiones de monóxido de carbono para las distintas pruebas del quemador de acero. Lo primero que se puede notar, tal como se espera, al no poseer carbono en su estructura, es que en las mezclas de amoníaco-hidrógeno no hay emisiones de monóxido de carbono y por ese motivo no está mostrado su gráfico

en la Figura 39. Por el lado de los valores máximos, éste se encuentra en la mezcla ternaria de $\varphi = 0,9$ con una cantidad de 421 ppm.

Al agrupar por mezclas, las con menores emisiones de monóxido de carbono (excluyendo las mezclas amoníaco-hidrógeno), fueron las mezclas de metano-hidrógeno. Sus emisiones fueron consistentemente más bajas que las mezclas de amoníaco-metano y que dos de las mezclas de 3 gases. De este grupo de prueba, la mezcla con $\beta = 40\%$ fue la que tuvo mayores niveles de monóxido de carbono, con un valor de 127 ppm y una desviación estándar de 54 ppm. Además presentó un dato anómalo de 0 ppm en una de las mediciones, por lo que este dato fue descartado. Producto de la desviación estándar, el rango en que se encuentra ésta es entre 73 y 181 ppm. El segundo valor más alto dentro de este grupo de pruebas fue la mezcla con $\beta = 30\%$. Su valor es de 65 ppm con una desviación estándar de 35 ppm. Al tener menos desviación, su resultado es más preciso pues se sabe con certeza que está en el rango de 30 a 100 ppm. La medición más baja de este grupo fue protagonizada por la mezcla con menor cantidad de metano en el combustible, la mezcla con 50% de H_2 . Su valor fue de 48 ppm y su desviación estándar de 28 ppm. Este punto también presentó un dato anómalo de 0 ppm que se descartó del promedio. El rango del que se tiene certeza de la medición es de 20 a 76 ppm.

Las mezclas ternarias registraron el valor más alto de todas las pruebas con la mezcla $\alpha = 70\%$ y $\beta = 10\%$ $\varphi = 0,9$. Su valor fue de 421 ppm y una desviación estándar de 189 ppm. Esto es un rango de 232 a 610 ppm. La otra mezcla con la misma composición pero $\varphi = 0,7$, presentó un valor de 165 ppm con una desviación de 36 ppm. Por lo que el valor de medición se encuentra con certeza entre 129 y 201 ppm. Se puede notar que incluso el menor nivel del rango de la primera mezcla de $\varphi = 0,9$, está por sobre el mayor nivel del rango de la mezcla con $\varphi = 0,7$. La última mezcla compuesta por $\alpha = 65\%$ y $\beta = 20\%$, es la que tiene los niveles más bajos de emisión de CO. En concreto 75 ppm con una desviación estándar de 22 ppm. Es decir, se sabe con certeza que la medición está entre 53 y 97 ppm.

Las mezclas del grupo de $\text{NH}_3 - \text{CH}_4$, fueron las segundas mediciones más altas registradas. Extraño a lo que podría pensar el lector, la mezcla con menor cantidad de metano en su combustible fue la que presentó niveles más altos de CO y la con menores niveles la que poseía 30% CH_4 en el combustible. En concreto, la mezcla con 90 % de NH_3 , registró 288 ppm de CO con una desviación estándar de 70 ppm. Por ende, el rango de la medición es entre 218 y 358 ppm. La siguiente mezcla en relación a α , es la compuesta por 70 % NH_3 . Ésta tuvo un valor de 43 ppm, con 27 ppm de desviación estándar. Sin embargo, presentó un dato anómalo de 750 ppm en una de las repeticiones, por lo que fue descartado para el promedios de los datos de medición. Para la mezcla con $\alpha = 50\%$, el resultado de la emisión fue de 229 ppm y el error asociado fue de 11 ppm. Esto porque la desviación estándar obtenida fue de solo 3 ppm, y el error instrumental es mayor en este caso (el error instrumental entre el rango de 200 ppm a 2000 ppm es de $\pm 5\%$ del valor de medición). Por ende, esta medición se sabe que se encuentra entre 218 y 240 ppm.

A modo de resumen de las emisiones de CO, tienden a ser mayores en presencia de amoníaco y metano, versus hidrógeno metano. Las mezclas ternarias también tienen niveles superiores a las mezclas $\text{H}_2 - \text{CH}_4$. Por otro lado, las mezclas sin metano no liberan CO. Resulta extraño el caso de las mezclas $\text{NH}_3\text{-CH}_4$, pues el valor más bajo de emisiones no fue ni para la mezcla con mayor metano, ni la con menos, mismo caso que en $\text{H}_2\text{-CH}_4$. Esto dificulta un veredicto concluyente sobre el comportamiento del monóxido de carbono, pero muestra la tendencia de que el metano al juntarlo con amoníaco, aumenta su emisión, sobre todo en mezclas de 3 gases.

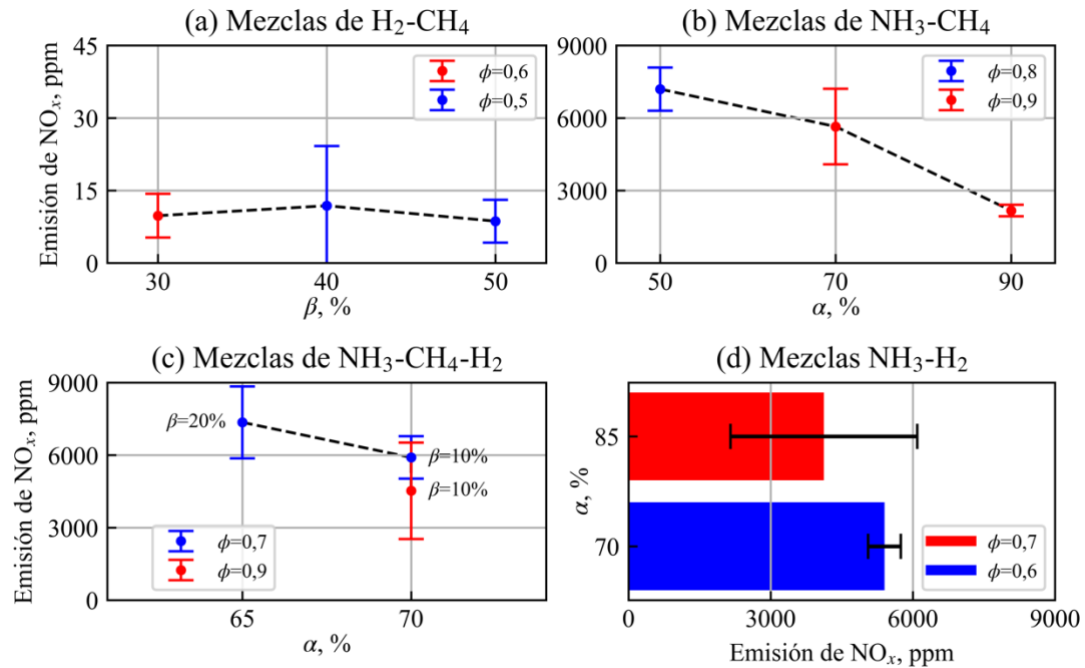


Figura 40: Gráficos de emisiones de óxidos de nitrógeno para todas las pruebas del quemador de acero

La Figura 40, muestra las emisiones de óxidos de nitrógeno. Esta medición está relacionada con el monóxido de nitrógeno que también lo lee el equipo. Por esa razón, en el anexo 4, Tabla 10, se muestra la razón NO/NO_x para las 11 pruebas. Para las mezclas sin amoníaco, las emisiones de NO fueron iguales a las de NO_x, mientras que para todas las demás pruebas, el valor fue de 0,95 el NO_x. Esto quiere decir que el 95% de los NO_x, corresponde a monóxido de nitrógeno. Este dato es relevante, porque permite simplificar el análisis, ya que el valor de cualquier nivel de emisión de NO, corresponde a multiplicar por 0,95 los valores de NO_x.

El primer punto importante de este gráfico, es que las mezclas metano – hidrógeno no emiten muy pocos óxidos de nitrógeno a la atmósfera. Por lo que se optó por incluirlos en otra escala.

La mezcla con niveles más altos de NO_x es la compuesta por 65% NH₃ – 15% CH₄ – 20% H₂. Su valor es de 7356 ppm con una desviación estándar de 1489 ppm, por lo que con certeza, el valor de medición está entre 5867 y 8845 ppm. Además, las mezclas

de este grupo fueron las que mostraron los niveles más altos de NO_x . Dentro de las mezclas ternarias, la segunda con el nivel de óxidos de nitrógeno más alto fue la compuesta por $\alpha = 70\%$, $\beta = 10\%$ y $\varphi = 0,7$. Con un valor de 5903 ppm y una desviación estándar de 881 ppm. El rango en que se tiene certeza que se ubica la medición es entre 5022 y 6784 ppm. Finalmente, la prueba con porcentajes de combustibles similares a la anterior pero $\varphi = 0,9$, mostró 4525 ppm de emisiones de NO_x con una desviación estándar de 1995 ppm. Su rango de certeza es mayor que la medición anterior pues va desde 2530 a 6520 ppm. La formación de los óxidos de nitrógeno está asociada a una alta temperatura de combustión y las mezclas ternarias presentaron los valores más altos, por lo que es una causa de las altas emisiones en estas mezclas.

Las mezclas de amoníaco – metano son las que presentan los segundos valores más altos y presentan un fenómeno. A medida que aumenta el porcentaje de NH_3 en el combustible, disminuyen las emisiones de NO_x . La mezcla con valores más altos corresponde al 50% NH_3 – 50% CH_4 . Sus emisiones de NO_x corresponden a 7194 ppm con una desviación estándar de 892 ppm. Por ende, su rango de certeza es de 6302 a 8086 ppm. Tal como muestra la tendencia, el segundo valor más alto de este grupo es el de la mezcla con 70% NH_3 – 30% CH_4 . Su valor es de 5644 ppm con una desviación estándar de 1565 ppm. Su rango de certeza es de 4079 a 7209 ppm. La tercera prueba de este grupo tuvo un valor de 2170 ppm y una desviación estándar de 241 ppm, es decir un rango de 1929 a 2411 ppm.

Para el último grupo de mezclas es el de amoníaco – hidrógeno. Al aumentar el amoníaco en la mezcla, disminuyó la emisión de óxidos de nitrógeno. Para la mezcla 70% NH_3 – 30% H_2 . Su nivel de emisiones es de 5401 ppm con una desviación de 346 ppm. Es decir, se sabe que la medición se encuentra con certeza entre 5055 y 5747 ppm. La medición de la mezcla de 85% NH_3 – 15% H_2 tuvo un nivel menor al valor con $\alpha = 70\%$, 4122 ppm. Sin embargo, su desviación estándar fue mucho mayor: 1972 ppm. Por ende, su rango de certeza es de 2150 a 6094 ppm.

Como resumen de las emisiones de NO_x , solamente aparecen cuando hay presencia de amoníaco en el combustible. Esto hace sentido pues el amoníaco a diferencia del metano e hidrógeno, posee nitrógeno en su combustible, propiciando la formación de NO_x a altas temperaturas. Por otro lado, dentro de las mezclas de amoníaco con otros gases, a mayor presencia de amoníaco se ve un decrecimiento en los óxidos de nitrógeno. Esto puede parecer extraño, pero se resolverá con las emisiones de NH_3 .

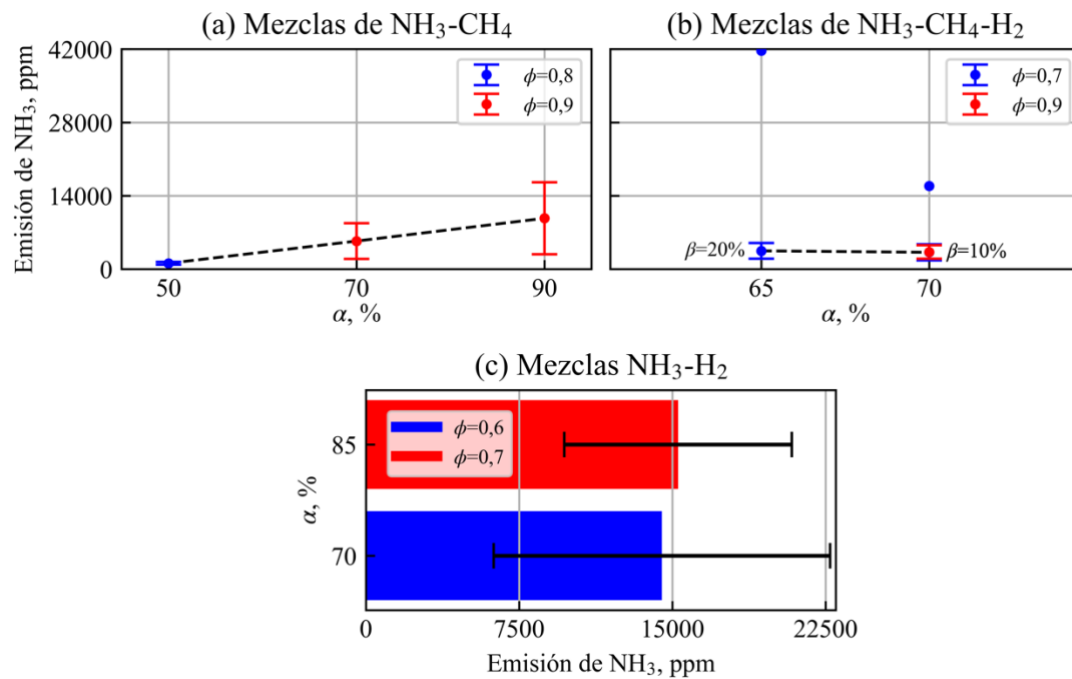


Figura 41: Gráficos de emisiones de amoníaco no quemado

Para los niveles de NH_3 , los datos anómalos en las mezclas ternarias alteran en exceso la forma en que se muestran los datos, por lo que en la Figura 42 se adjunta una versión de los gráficos con una escala que va de 0 a 18000 ppm.

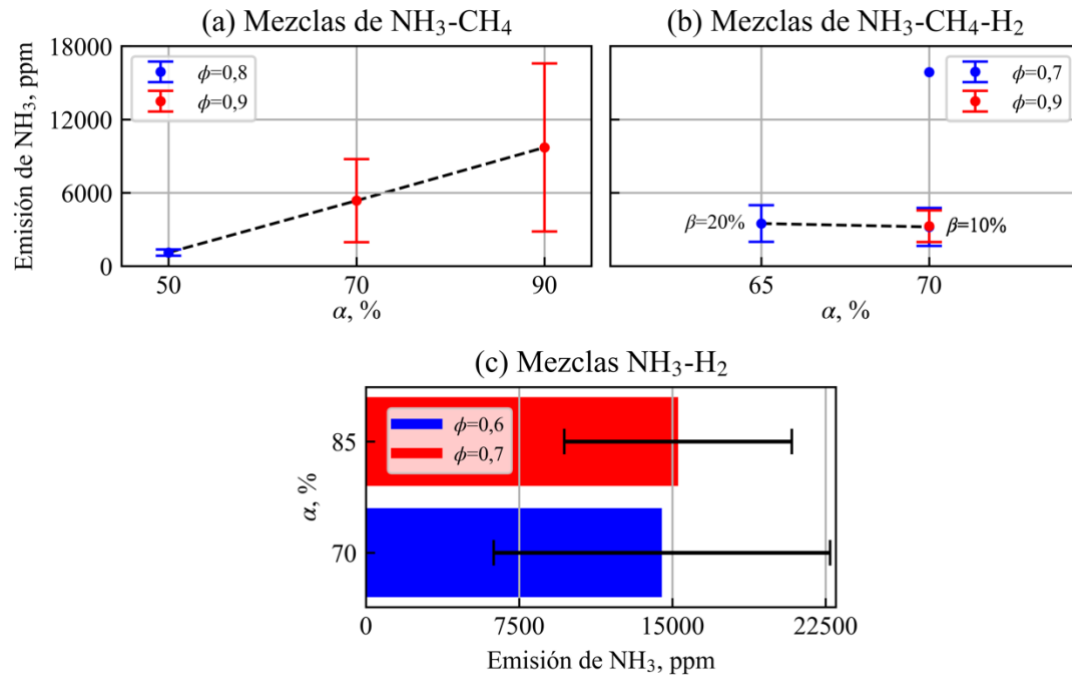


Figura 42: Gráficos de misiones de amoníaco no quemado las pruebas del quemador de acero que contienen NH_3 , dejando fuera el dato anómalo de 42000 ppm.

En la Figura 41 y Figura 42, se muestran los niveles de emisión de amoníaco en las distintas pruebas. La única razón de mostrar dos veces los gráficos, es el dato anómalo en la Figura 41b, para el punto con $\alpha = 65\%$, pues registró 42000 ppm de amoníaco, mientras las otras mediciones estuvieron en valores cercanos a las 3000 ppm, mostrando que no son valores que se deberían alcanzar. Para efectos del análisis se hará uso de la Figura 42.

En mezclas de amoníaco – metano y amoníaco – hidrógeno, los resultados muestran que a mayor cantidad de NH_3 en el combustible, mayores son las emisiones del mismo en los gases de escape. Esta relación se rompe para las mezclas ternarias, pues la mezcla con mayores emisiones posee 65% de amoníaco, en comparación a 70% de las otras dos mezclas. Sin embargo, estas diferencias son bajas pues son de solo 200 ppm aproximadamente.

Al promediar los valores de las distintas mezclas, la que alcanza los niveles más altos es la combinación amoníaco – hidrógeno. La combinación $\alpha = 85\%$, tiene 15275 ppm de emisión de NH_3 con una desviación estándar de 5569 ppm. Esto deja un rango de certeza de 9706 a 20844 ppm. Por otro lado, la segunda mezcla $\text{NH}_3 - \text{H}_2$ ($\alpha = 70\%$), mostró emisiones correspondientes a 14483 ppm con 8229 ppm de desviación estándar. El rango de certeza es de 6254 a 22712 ppm.

Por el lado de las menores emisiones de amoníaco, se encuentran las mezclas de hidrógeno – metano, que al no tener NH_3 en su combustible, no se le midió este gas en sus emisiones.

En el medio se encuentran las mezclas de $\text{NH}_3 - \text{CH}_4$ y las de 3 gases. Las emisiones de mezclas $\text{NH}_3 - \text{CH}_4$ muestran un comportamiento casi lineal en el que a mayor porcentaje de NH_3 en la mezcla, mayor cantidad de amoníaco se emite por los gases de escape. El nivel más bajo es para la mezcla con 50% de amoníaco, y el más alto para el 90%. Los valores registrados son los siguientes: Para la mezcla con $\alpha = 50\%$, se emitieron 1113 ppm de NH_3 con una desviación estándar de 255 ppm. Esto entrega un rango de 858 a 1368 ppm. Para el combustible con $\alpha = 70\%$, las emisiones de NH_3 aumentan a 5357 ppm y su desviación estándar es de 1492 ppm. El rango de certeza de esa medición es entre las 3865 ppm y 6849 ppm. El punto con la emisión más alta en este grupo es la medición de $\alpha = 90\%$. Su nivel es de 9708 ppm con una desviación estándar de 6870 ppm. Esto quiere decir que tiene un rango de certeza de 2838 a 16578 ppm.

El último grupo de mezclas, las compuestas por 3 gases presenta valores inferiores a las otras dos pruebas, con la particularidad que las emisiones en la mezcla con 65% de amoníaco, fueron mayores a las dos mezclas con $\alpha = 70\%$. De hecho, la mezcla ternaria con $\alpha = 65\%$ y $\beta = 20\%$, tuvo un valor anómalo muy alto que no fue considerado para el cálculo de la emisión. Las emisiones de esta mezcla fueron 3485 ppm, con una desviación estándar de 1505 ppm, por lo que su rango de certeza oscila entre 1980 ppm y 4990 ppm. Las dos mezclas compuestas $\alpha = 70\%$ y $\beta = 10\%$, registraron valores

cercanos de emisión. Para $\varphi = 0,7$ fue de 3207 ppm con una desviación estándar de 1550 ppm, dejando un rango de certeza de 1657 – 4757 ppm. En esta mezcla, hubo un dato anómalo de 15000 ppm que se dejó fuera del cálculo. La mezcla con $\varphi = 0,9$ registró 3268 ppm de emisión (solo 60 ppm superior a la anterior) con una desviación estándar de 1292 ppm. Dejando así su rango de certeza entre 1976 y 4560 ppm.

Las emisiones de NH_3 no quemado siguen patrones claros en base a la composición del combustible. A mayor amoníaco en el combustible, mayor emisión en los gases de escape. Esto se cumple para todas las mezclas a excepción de las mezclas ternarias que muestran como la mezcla que tiene menor composición de amoníaco, presenta un leve aumento en las emisiones de NH_3 . Lo anterior explica el por qué en las emisiones de NO_x se emite menor cantidad a medida que aumenta el porcentaje de NH_3 en la mezcla, pues esa mayor cantidad de amoníaco en la mezcla tiende a aumentar la dificultad de su combustión y liberar mayores cantidades de NH_3 no quemado, en vez de reaccionar y formar óxidos de nitrógeno.

5 Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se realizaron pruebas experimentales en dos quemadores de medios porosos, uno de cuarzo y otro de acero inoxidable. Las mezclas trabajadas fueron: metano, amoníaco-metano, metano-hidrógeno, amoníaco-hidrógeno y amoníaco-metano-hidrógeno. Se logró encontrar zonas de operación estable en todas las concentraciones de combustibles, en algunas siendo el rango de estabilidad mayor que en otras. A las pruebas estables en el quemador de acero se les pudo medir emisiones de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y amoníaco no quemado.

Se estudiaron otros trabajos realizados en dos laboratorios internacionales. En ellos se presentaron resultados de temperaturas y emisiones, los cuales fueron útiles como referencia a las pruebas que se llevaron a cabo en el laboratorio de combustión de amoníaco de la sede Viña del Mar.

De las pruebas llevadas a cabo, se obtuvo información valiosa respecto a las zonas de combustión estable en mezclas de amoníaco-metano:

La composición de 70% CH₄ – 30% NH₃ es la que presenta el mayor rango de puntos estables, con 6 de los 12 puntos ensayados para dicha composición.

Trabajar con flujo másico específico de 0,1 kg/s·m² provoca que la combustión no se sostenga y la llama se extinga. Esto fue así para todos los experimentos con ese flujo másico específico.

Mayor porcentaje de metano tiende a producir flashback en mezclas con relación de equivalencia alta, mientras que con mayor porcentaje de amoníaco, aparece la tendencia de una reducción en los puntos estables y la aparición de blow out con flujos másicos específicos de 0,3 kg/s·m².

Las temperaturas alcanzadas en el quemador de cuarzo, sin aislamiento y con potencias de máximo 1,1 kW, llegan hasta los 1200 °C. En cambio, en el quemador de acero que trabajó con potencias de 2 kW y con aislamiento, se alcanzaron los 1600 °C como temperatura máxima. En el quemador de cuarzo se alcanzó esa temperatura con una mezcla de 90% CH₄ – 10% NH₃ con flujo másico específico de 0,3 kg/s·m² y $\varphi = 0,8$. En el quemador de acero, la temperatura más alta se alcanzó con la mezcla de 70% NH₃ – 20% NH₃ – 10% H₂, flujo másico específico de 0,64 kg/s·m² y $\varphi = 0,9$. Además, la adición de amoníaco provoca un aumento en las temperaturas máximas obtenidas. La única mezcla sin amoníaco, la de metano-hidrógeno, fue la que presentó las temperaturas más bajas de todas las mezclas, estando entre los 1200 °C y los 1360 °C, mientras que todas las otras mezclas tuvieron temperaturas mayores a 1350 °C y llegaron hasta los 1600 °C.

Con respecto a las emisiones, el monóxido de carbono aumenta su presencia cuando se combustiona amoníaco junto con metano versus hidrógeno con metano. Las mezclas ternarias, salvo la compuesta por 70% NH₃ – 20% NH₃ – 10% H₂ con $\varphi = 0,9$, tienen menores niveles de CO que las de amoníaco-metano. El nivel más alto de CO registrado fue de 421 ppm en la mezcla 70% NH₃ – 20% NH₃ – 10% H₂ con $\varphi = 0,9$.

Las emisiones de óxidos de nitrógeno, llegaron a niveles de 7300 ppm con la mezcla ternaria de 65% NH_3 – 15% NH_3 – 12% H_2 . Su tendencia general es que a mayor porcentaje de amoníaco en la mezcla, se reduce su nivel de emisión de NO_x . Importante destacar que la composición de hidrógeno –metano, no liberó óxidos de nitrógeno.

Esta tendencia de decrecer las emisiones de NO_x al aumentar la razón de NH_3 en la mezcla, se debe a que una mayor composición de amoníaco, produce mayores emisiones de NH_3 no quemado. A excepción de las mezclas ternarias, en que la mezcla de 65% de amoníaco tuvo mayores emisiones que las dos mezclas con 70% (por solo 200 ppm), en todos los otros casos, al aumentar la fracción de amoníaco en el combustible, derivaba en mayores emisiones de NH_3 no quemado. El valor más alto fue de 15275 ppm en la mezcla de 85% NH_3 –15% H_2 .

Las emisiones tanto de óxidos de nitrógeno, como de amoníaco son muy altas y requieren una mejora en futuros prototipos. Actualmente lo que más conviene en términos de emisiones es operar con metano e hidrógeno, pues no liberan NO_x ni NH_3 . Sin embargo, siendo el foco de esta investigación el estudio del amoníaco, los puntos que ofrecen un mejor balance entre NH_3 y NO_x son: 50% NH_3 – 50% CH_4 , con 7200 ppm de NO_x y 1110 ppm de NH_3 . Y 70% NH_3 – 20% NH_3 – 10% H_2 con $\phi = 0,7$ con niveles de 5900 ppm de NO_x y 3200 ppm de NH_3 .

Este trabajo entrega buenas sensaciones, pero también presenta desafíos como las altas emisiones de NH_3 y NO_x . Para abordar este tópico se proponen las siguientes líneas de investigación:

- Desarrollar un prototipo de quemador de dos etapas de amoníaco, donde se genere una post combustión con el amoníaco no quemado mediante una segunda inyección de aire y generando un segundo frente de combustión.
- Desarrollar pruebas con un sistema de lavado de gases para comparar la capacidad de reducción de NH_3 en los gases de escape mediante este sistema.
- Probar quemadores que integren un fluido de trabajo, para evaluar la potencia efectiva que se está aprovechando y así poder calcular la eficiencia de un quemador de medios porosos operando con amoníaco.

De esta forma se concluye exitosamente la investigación experimental de la estabilidad de combustión de amoníaco en un quemador de medios porosos, logrando resultados concretos que muestran la factibilidad de combustionar este compuesto químico y que sienta las bases para trabajos futuros que permitan descarbonizar la generación eléctrica en Chile.

Bibliografía

- 1) Ministerio de Energía. (2020). *Plan de retiro y/o reconversión de unidades a carbón*. Gobierno de Chile. Santiago: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.
- 2) Fajardo, M. (4 de Agosto de 2024). Plan de descarbonización y reconversión de termoeléctricas: el conflicto que saca chispas. *El mostrador*.
- 3) SoCalGas. (2021). *El papel de los combustibles limpios y la infraestructura de gas para alcanzar el objetivo climático de cero emisiones netas de California*. Informe de síntesis, Southern California Gas Company.
- 4) Environmental Protection Agency. (6 de Noviembre de 2024). *Renewable Natural Gas*. Obtenido de Sitio web de EPA: <https://www.epa.gov/lmop/renewable-natural-gas#:~:text= RNG%20can%20be%20used%20locally,to%20be%20converted%20into%20 RNG>.
- 5) Generadoras de Chile. (2024). *Generación eléctrica en Chile*. Obtenido de Sitio web de Generadoras de Chile: <https://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>
- 6) Sauma, E. (28 de abril de 2023). *El amoníaco verde: una solución para el almacenamiento y transporte*. Obtenido de Sitio web de Centro Energía UC: <https://energia.uc.cl/opinion/el-amoniaco-verde-una-solucion-para-el-almacenamiento-y-transporte>

- 7) Law, C. (2006). *Combustion physics*. New York City, New York, Estados Unidos: Cambridge University Press.
- 8) Comisión Nacional de Energía. (2023). *Anuario Estadístico de Energía*. Ministerio de Energía, Santiago.
- 9) Fuster, J., Arteaga, Y., & Farías, R. (2022). *Industria del Amoníaco: estado actual y oportunidades para la descarbonización*. Ministerio de Energía, Santiago de Chile.
- 10) Valera-Medina, A., Owen-Jones, M., David, B., Xiao, H., & Bowen, P. (2018). Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science*, 69, 76-86.
- 11) Rocha, R. C., Ramos, C. F., Costa, M., & Bai, X.-S. (2019). Combustion of NH₃/CH₄/Air and NH₃/H₂/Air Mixtures in a Porous Burner: Experiments and Kinetic Modeling. *Energy & Fuels*, 33(12), 12767-12780.
- 12) Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (6 de Mayo de 2016). *ToxFAQs™ – Óxidos de nitrógeno (monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, etc.) (Nitrogen Oxides)*. Recuperado el Marzo de 2025, de ATSDR en Español: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts175.html
- 13) Pegov, S. (1 de 1 de 2008). Methane in the Atmosphere. *Encyclopedia of Ecology, Vol 5*, 2325-2328.
- 14) Gasco. (s.f.). *El mundo del Gas*. Recuperado el Abril de 2025, de Gasco Educa: http://www.gascoeduca.cl/Maqueta/gas_04.html#
- 15) Ministerio de Energía. (Noviembre de 2020). *Estrategia nacional de hidrógeno verde*. Recuperado el Octubre de 2024, de Sitio web de Ministerio de Energía : https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf
- 16) Morante, J. R., Andreu, T., García, G., Guilera, J., Tarancón, A., & Torrell, M. (2020). *Hidrógeno: Vector energético de una economía descarbonizada*. Madrid, España: Fundación Naturgy.

- 17) Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de Calor y Masa* (4ª edición ed.). (A. L. Rodríguez, Ed., & E. J. D’Borneville, Trad.) Ciudad de México, México: McGraw Hill.
- 18) San Martín, S. (16 de Febrero de 2024). *Procesos de síntesis de Amoníaco. Vías de reducción de nitrógeno con especial interés en la fotocatalisis*. Trabajo de fin de grado, Universidad de Cantabria, Santander.
- 19) Céspedes Domínguez, J. I. (2024). *Diseño de un laboratorio y banco de pruebas para procesos de combustión amoníaco-hidrógeno*. Memoria de titulación, Universidad Técnica Federico Santa María, Ingeniería Mecánica, Valparaíso.
- 20) Omega. (s.f.). *Modulo de adquisición de datos USB*. Recuperado el 25 de Junio de 2025, de Sitio web de Omega: <https://es.omega.com/pptst/OMB-DAQ55.html>
- 21) Air Products. (24 de Enero de 2023). *Air Products Sudamérica*. Obtenido de Hojas de Seguridad, Hoja de seguridad de amoníaco: <https://apsudamerica.com/sds/Amoníaco%203.0.pdf>
- 22) Air Products. (24 de Enero de 2023). *Air Products Sudamérica*. Obtenido de Hojas de Seguridad, Hidrógeno: <https://apsudamerica.com/sds/Hidrógeno%203.0.pdf>
- 23) Messer. (30 de Marzo de 2021). *Messer Colombia*. Obtenido de Hojas de seguridad, Metano: <https://www.messer-co.com/wp-content/uploads/2022/02/FICHAS-DE-DATOS-DE-SEGURIDAD-METANO.pdf>
- 24) Testo SA. (s.f.). *testo 350 Flue gas analyzer Instruction manual*. Recuperado de: <https://mtsengineers.com/wp-content/uploads/Instruction-manual-42.pdf>
- 25) Ministerio de Salud. (29 de Abril de 2000). Decreto Supremo N° 594-Ministerio de Salud. [Aprueba reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo].

- 26) NASA. (Febrero de 2025). *Aumentan las temperaturas: La NASA confirma que el 2024 fue el año más cálido registrado*. Recuperado el 30 de Agosto de 2025, de Sitio web de la NASA: <https://www.nasa.gov/news-release/aumentan-las-temperaturas-la-nasa-confirma-que-el-2024-fue-el-ano-mas-calido-registrado/>
- 27) Vignat, G., Akoush, B., Boigné, E., Toro, E., & Ihme, M. (19 de Agosto de 2022). Combustion of lean ammonia-hydrogen fuel blends in a porous media burner. *Proceedings of the Combustion Institute*, 39(4), 4195-4204.
- 28) Vignat, G., Zirwes, T., Toro, E., Younes, K., Boigné, E., Muhunthan, P., . . . Ihme, M. (11 de Febrero de 2023). Experimental and numerical investigation of flame stabilization and pollutant formation in matrix stabilized ammonia-hydrogen combustion. *Combustion and Flame*, 250, 1-14.
- 29) Utria, K., González, F., & Toledo, M. (Abril de 2013). Combustión de mezclas ricas de etano-aire en medios porosos inertes. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 21(1), 159-166.
- 30) ONU. (2015). Acuerdo de París. *COP 21*, (pág. 3). París. Recuperado de: https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf
- 31) Gross , C., & Charng Kong, S. (1 de Septiembre de 2012). Performance characteristics of a compression-ignition engine using direct-injection ammonia–DME mixtures. *Fuel*, 13, 1069-1079.
- 32) Kurata, O., Iki, N., Matsunuma, T., Inoue, T., Suzuki, M., Tsujimura, T., & Furutani, H. (Noviembre de 2015). Power generation by a micro gas turbine firing kerosene and ammonia. *The Proceedings of the International Conference on Power Engineering (ICOPE)*.
- 33) Centro Nacional del Hidrógeno. (2024). *El Hidrógeno*. Recuperado el Noviembre de 2024, de Centro Nacional del Hidrógeno: <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/#tab-id-4>

34) ENAP. (2024). *Petróleo diesel grado B1*. Recuperado el Agosto de 2024, de Sitio web de enap: <https://www.enap.cl/relaciones-comerciales/petroleo-diesel-grado-b1>

ANEXOS

Anexo 1:

Constantes y ecuaciones adicionales utilizadas en el trabajo.

Temperatura de referencia de gases: 288,15 K (15°C)

Presión de referencia de gases: 1 bar

Constante universal de gases ideales: $R_u = 8,314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$

Masa molar del aire: $MM_{\text{aire}} = 28,96 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$

Densidad de los gases:

$$\rho_{\text{gas}} = \frac{P_{\text{ref}} \cdot 100 \cdot MM_{\text{gas}}}{R_u \cdot T_{\text{ref}}}$$

ρ_{gas} es la densidad del gas, P_{ref} es la presión de referencia (1 bar) 100 es el factor de conversión de la presión de bar a kPa. MM_{gas} es la masa molar del gas, R_u es la constante universal de gases ideales y T_{ref} es la temperatura de referencia. Con esos valores, el resultado de las densidades de los gases combustibles es el siguiente:

$$\rho_{\text{CH}_4} = 0,67 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{H}_2} = 0,08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{NH}_3} = 0,71 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El flujo volumétrico total se calcula con la siguiente ecuación:

$$\dot{V}_{\text{gases}} = \dot{V}_{\text{NH}_3} + \dot{V}_{\text{CH}_4} + \dot{V}_{\text{H}_2} + \dot{V}_{\text{aire}} \quad (2-18)$$

Donde las sumas representan los caudales volumétricos de cada gas medido en slpm.

Anexo 2

Extracto hojas de seguridad de amoníaco, hidrógeno y metano:

1. Extracto de hoja de seguridad del amoníaco

La hoja elaborada por Indura en el punto 2 muestra la identificación de los peligros (Air Products, 2023).

Gases inflamables: Categoría 2. Esto quiere decir que no incluye pictograma y que su palabra de advertencia es “Atención”. Su indicación de peligro es “Gas inflamable”. A modo de comparación, un gas categoría 1 debe portar el rombo que indique inflamable, su palabra de advertencia es “peligro” y su indicación de peligro es “Gas extremadamente inflamable”.

Toxicidad acuática aguda: Categoría 1. Se debe rotular con el rombo del SGA para esa categoría. Su palabra de advertencia es “Atención” y su indicación de peligro es “Muy tóxico para organismos acuáticos”.

Toxicidad acuática crónica: Categoría 2. Se debe rotular también con el rombo del SGA. No cuenta con palabra de advertencia y su indicación de peligro es “Tóxico para los organismos acuáticos con efectos duraderos”.

Toxicidad aguda por inhalación: Categoría 3. Debe rotularse con el rombo correspondiente del SGA. Su palabra de advertencia es “peligro” y su indicación de peligro es “Tóxico si se inhala”.

Corrosión de la piel: Categoría 1B. Esta categoría lleva su rombo correspondiente del SGA. Su palabra de advertencia es “peligro” y su indicación de peligro es “provoca graves quemaduras en la piel y lesiones oculares”.

La misma hoja de seguridad entrega declaraciones de precaución que se detallan a continuación:

Prevención:

- Mantener alejado del calor, de superficies calientes, de chispas, de llamas abiertas y de cualquier otra fuente de ignición. No fumar.
- No respirar el polvo, el humo, el gas, la niebla, los vapores, el aerosol.
- Lávese las manos meticulosamente después de manipular el producto.
- Evitar su liberación al medio ambiente.
- Llevar guantes, prendas, gafas, máscara de protección.

Respuesta:

- EN CASO DE INGESTIÓN: Enjuagarse la boca. NO provocar el vómito.
- EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitarse inmediatamente las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua o ducharse.
- EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar a la víctima al exterior y mantenerla en reposo en una posición confortable para respirar.
- EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.
- Llamar inmediatamente a un CENTRO DE INFORMACIÓN TOXICOLOGÍA/médico.
- Consultar a un médico inmediatamente.
- Fuga de gas en llamas: No apagar, salvo si la fuga puede detenerse sin peligro.
- En caso de fuga, eliminar todas las fuentes de ignición.

Almacenamiento:

- Almacenar en un lugar bien ventilado. Mantener el recipiente cerrado herméticamente.
- Proteger de la luz solar.
- Guardar bajo llave.

2. Extracto de hoja de seguridad del hidrógeno

Al igual que con el amoníaco, para trabajar con el hidrógeno se deben tomar ciertas precauciones producto de su inflamabilidad. El hidrógeno también cuenta con una hoja de seguridad elaborada por Indura, que se utilizará para indicar los peligros de este gas (Air Products, 2023).

Gases inflamables: Categoría 1: Gas extremadamente inflamable. Requiere rotulado para su transporte y almacenamiento. Éste se muestra en la Figura 43 al lado derecho

Gas a alta presión: Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento. En la Figura 43 al lado izquierdo se muestra el símbolo de gas a presión.



Figura 43: Rotulación del cilindro de hidrógeno

Declaraciones de precaución:

Prevención: Mantener alejado del calor, de superficies calientes, de chispas, de llamas abiertas y de cualquier otra fuente de ignición. No fumar.

Respuesta:

- Fuga de gas en llamas: No apagar, salvo si la fuga puede detenerse sin peligro.
- En caso de fuga, eliminar todas las fuentes de ignición.

Almacenamiento: Proteger de la luz del sol. Almacenar en un lugar bien ventilado.

Otros peligros:

- Arde con llama invisible.
- Puede causar ignición en contacto con el aire.
- Gas a alta presión.
- Puede desplazar el oxígeno y provocar una asfixia rápida.

- Extremadamente inflamable.
- Puede formar mezclas explosivas con el aire.
- Existe riesgo de ignición inmediata y de explosión en mezclas con aire en concentraciones que excedan al límite inferior de inflamabilidad (LEL).
- Las concentraciones altas que pueden causar asfixia son inflamables y no se aconseja permanecer expuesto a ellas.
- Evitar inhalación de gases.
- Puede ser necesario el uso de un equipo de respiración autónomo.

3. Extracto de hoja de seguridad del metano

Del mismo modo que los dos gases anteriores, también se deben tomar medidas de control para el trabajo con metano. Éstas están dadas por su respectiva hoja de seguridad, elaborada por Messer (Messer, 2021).

Gases inflamables: Categoría 1: Gas extremadamente inflamable. Requiere rotulado para su transporte y almacenamiento.

Gas a alta presión: Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento.

Estas dos clasificaciones son las mismas que para el hidrógeno por lo que en la Figura 43 está el rotulado que necesita el metano.

Consejos de precaución:

Prevención: Mantener alejado del calor, superficies calientes, chispas, llamas al descubierto y otras fuentes de ignición. No fumar

Respuesta:

- Fuga de gas inflamado: No apagar las llamas del gas inflamado si no puede hacerse sin riesgo.
- En caso de fuga, eliminar todas las fuentes de ignición.

Almacenamiento: Proteger de la luz solar. Almacenar en un lugar bien ventilado.

Anexo 3

Placa identificadora de compresor de aire.

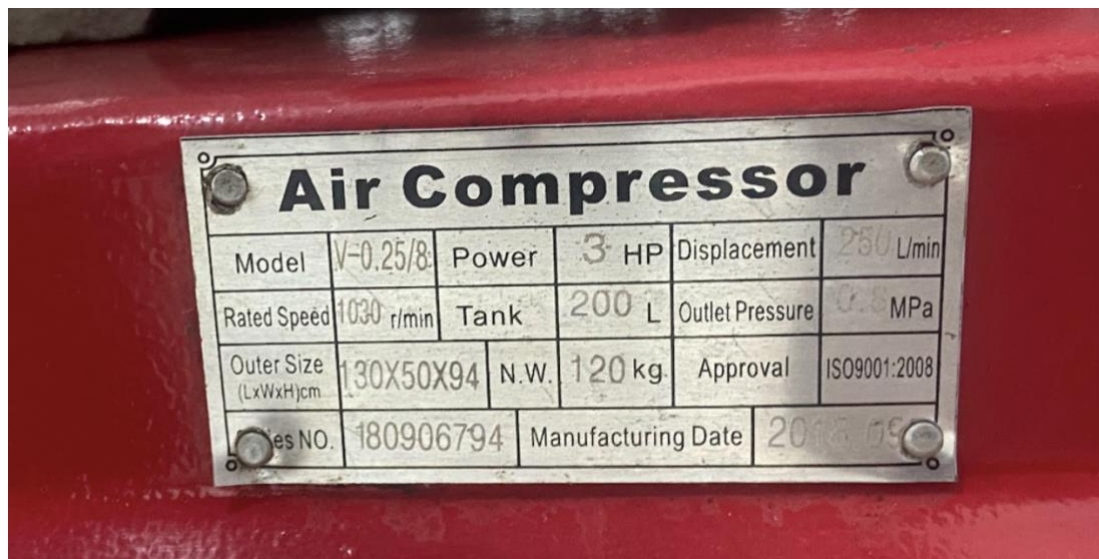
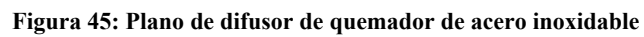


Figura 44: Placa de compresor de aire

Planos del quemador de acero inoxidable



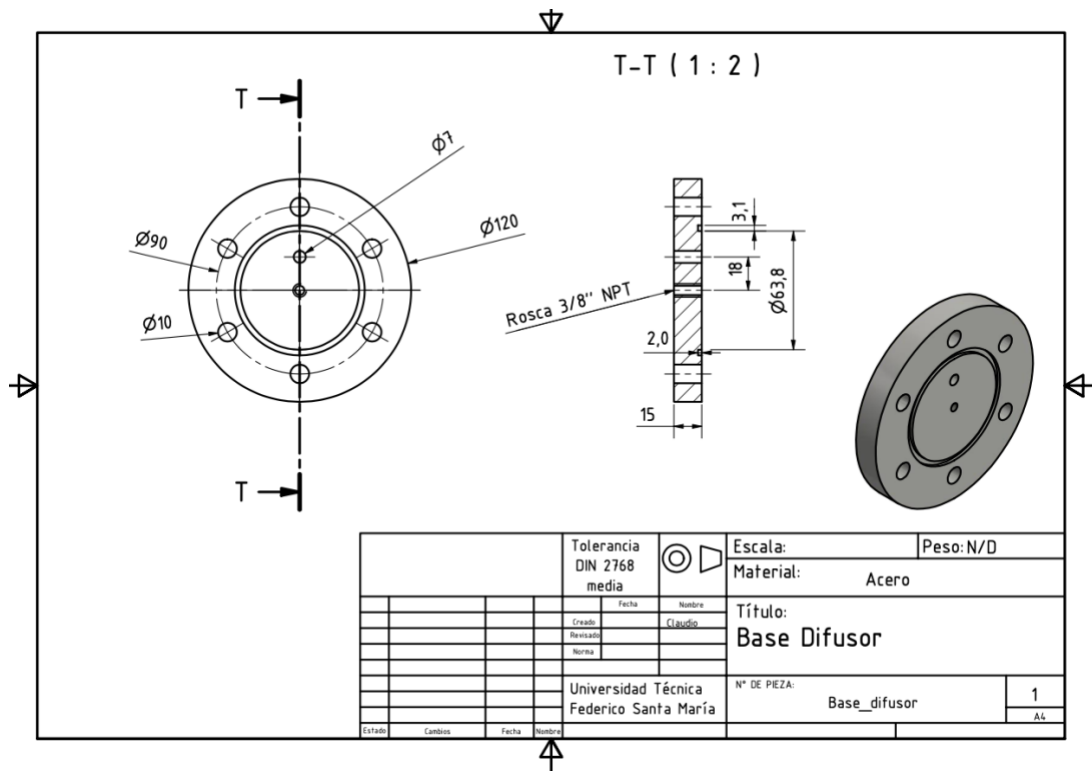


Figura 46: Plano de base difusor de quemador de acero inoxidable

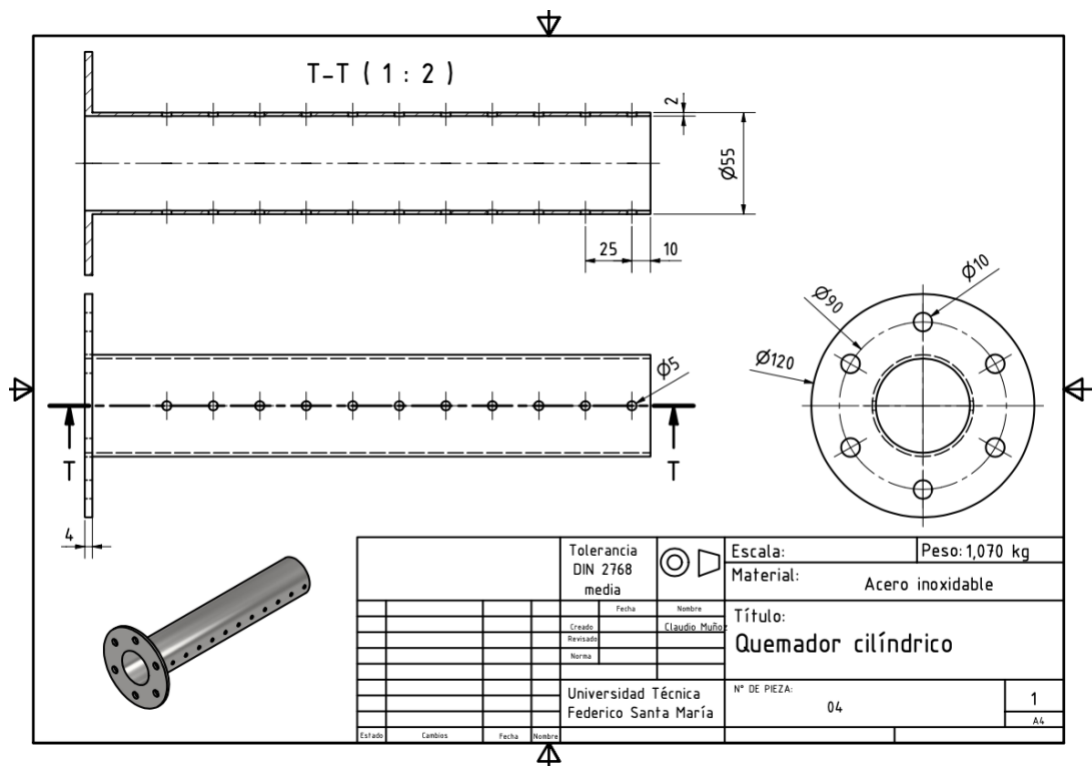


Figura 47: Plano de quemador de acero inoxidable

Anexo 5

Lista completa de los flujos de combustible para cada prueba del quemador de cuarzo:

Tabla 5: Parámetros operacionales de mezcla 100% metano en quemador de cuarzo

Phi	Flujo de aire [slpm]	Flujo de metano [slpm]	Flujo de amoníaco [slpm]	Flux másico [kg/s m2]	Potencia [kW]
1	6,38	0,67	0	0,1	0,37
1	12,77	1,34	0	0,2	0,75
1	19,15	2,01	0	0,3	1,12
0,9	6,42	0,61	0	0,1	0,34
0,9	12,84	1,21	0	0,2	0,68
0,9	19,26	1,82	0	0,3	1,01
0,8	6,45	0,54	0	0,1	0,30
0,8	12,91	1,08	0	0,2	0,60
0,8	19,36	1,63	0	0,3	0,91
0,7	6,49	0,48	0	0,1	0,27
0,7	12,98	0,95	0	0,2	0,53
0,7	19,47	1,43	0	0,3	0,80

Tabla 6: Parámetros operacionales de mezcla 90% metano y 10% amoníaco en quemador de cuarzo

Phi	Flujo de aire [slpm]	Flujo de metano [slpm]	Flujo de amoníaco [slpm]	Flux másico [kg/s m2]	Potencia [kW]
1	6,36	0,64	0,07	0,1	0,37
1	12,71	1,28	0,14	0,2	0,74
1	19,07	1,92	0,21	0,3	1,12
0,9	6,40	0,58	0,06	0,1	0,34
0,9	12,79	1,16	0,13	0,2	0,67
0,9	19,19	1,74	0,19	0,3	1,01
0,8	6,43	0,52	0,06	0,1	0,30
0,8	12,87	1,04	0,12	0,2	0,60
0,8	19,30	1,56	0,17	0,3	0,90
0,7	6,47	0,46	0,05	0,1	0,27
0,7	12,94	0,91	0,10	0,2	0,53
0,7	19,42	1,37	0,15	0,3	0,80

Tabla 7: Parámetros operacionales de mezcla 70% metano y 30% amoníaco en quemador de cuarzo

Phi	Flujo de aire [slpm]	Flujo de metano [slpm]	Flujo de amoníaco [slpm]	Flux másico [kg/s m2]	Potencia [kW]
1	6,30	0,57	0,24	0,1	0,37
1	12,59	1,14	0,49	0,2	0,74
1	18,89	1,71	0,73	0,3	1,11
0,9	6,34	0,52	0,22	0,1	0,34
0,9	12,68	1,03	0,44	0,2	0,67
0,9	19,01	1,55	0,66	0,3	1,01
0,8	6,38	0,46	0,20	0,1	0,30
0,8	12,76	0,92	0,40	0,2	0,60
0,8	19,15	1,39	0,59	0,3	0,90
0,7	6,43	0,41	0,17	0,1	0,26
0,7	12,85	0,81	0,35	0,2	0,53
0,7	19,28	1,22	0,52	0,3	0,79

Tabla 8: Parámetros operacionales de mezcla 50% metano y 50% amoníaco en quemador de cuarzo

φ	Flujo de aire [slpm]	Flujo de metano [slpm]	Flujo de amoníaco [slpm]	Flux másico [kg/s m2]	Potencia [kW]
1	6,22	0,47	0,47	0,1	0,37
1	12,43	0,95	0,95	0,2	0,73
1	18,64	1,42	1,42	0,3	1,10
0,9	6,26	0,43	0,43	0,1	0,33
0,9	12,52	0,86	0,86	0,2	0,67
0,9	18,79	1,29	1,29	0,3	1,00
0,8	6,31	0,39	0,39	0,1	0,30
0,8	12,63	0,77	0,77	0,2	0,60
0,8	18,94	1,16	1,16	0,3	0,90
0,7	6,37	0,34	0,34	0,1	0,26
0,7	12,73	0,68	0,68	0,2	0,53
0,7	19,10	1,02	1,02	0,3	0,79