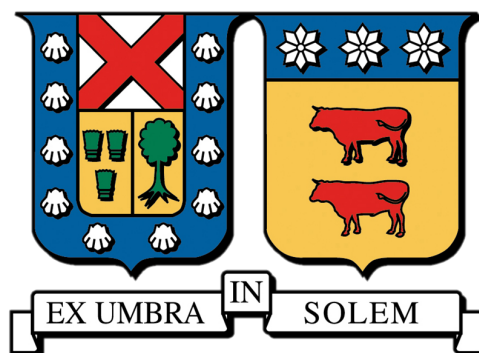


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



**“CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL
DE UN QUEMADOR DE MEDIO
POROSO DE DOS ETAPAS OPERANDO
CON MEZCLAS DE
AMONÍACO-HIDRÓGENO PARA
APLICACIONES RESIDENCIALES”**

DIEGO ANÍBAL ÁLVAREZ ALBORNOZ

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL GRADO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA: Dr. Mario Toledo Torres

PROFESOR CORREFERENTE: Dr. (C) Claudio Muñoz Herrera

VALPARAÍSO, 2026



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: CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UN QUEMADOR DE MEDIO POROSO DE DOS ETAPAS OPERANDO CON MEZCLAS DE AMONÍACO-HIDRÓGENO PARA APLICACIONES RESIDENCIALES

Nombre del candidato(a): DIEGO ANÍBAL ÁLVAREZ ALBORNOZ

Carrera / Grado: INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

Campus: CASA CENTRAL-VALPARAÍSO **Departamento:** INGENIERÍA MECÁNICA

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, MARIO GONZALO 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 (marcar una opción)

☐ 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 (**marcar una opción**):

☐ 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: 30/09/2026 **Firma:**

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 30/09/2026 **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

Para mis padres, Agustín y Mabel. Desde el momento en que nací me amaron incondicionalmente, me dieron todas las herramientas que estuvieron a su alcance para afrontar los desafíos de esta vida, y me enseñaron que lo más importante es disfrutar del camino. Las palabras no son suficientes para expresar la infinita admiración que siento por ustedes. Espero algún día ser la mitad de buena persona de lo ustedes son.

A mi hermana Sofía, de quien estoy tremendamente orgulloso. Por más que pasen los años, siempre serás mi hermanita.

A mis abuelos, Juan y Olga. A pesar de la distancia, los llevo siempre en mis pensamientos y en mi corazón.

A mi familia en Curicó, quienes extraño cada día que estoy lejos. Sé que siempre tendré un lugar al cual volver.

Para Anaís, de quien estoy profundamente enamorado. Has sido mi motivación para sacar esta carrera adelante, apoyándome cada vez que las cosas se han puesto difíciles. No creo haber podido lograrlo sin ti. Mi mejor amiga, mi lugar seguro y mi panorama favorito. Gracias por compartir tu vida conmigo.

A dondequiera que me lleve la vida, y hasta el último de mis días, nunca los olvidaré.

Los amo infinito.

Resumen

En este estudio, se analizó el funcionamiento de un quemador de medio poroso inerte de dos etapas operando con mezclas de amoníaco-hidrógeno. Se comprobó que el sistema puede operar de manera estable utilizando mezclas con una proporción de amoníaco de 70 % y de 85 %, obteniéndose un rango más amplio de operación con la primera proporción. Se controlaron las temperaturas internas a lo largo del quemador y se midieron las emisiones de NO_x y NH_3 no quemado.

Los resultados demuestran que la relación de equivalencia global influye directamente en los niveles de emisión. Al aumentar el ϕ_g en el rango entre 0.6 y 0.9, se logró una reducción sostenida en las emisiones de NO_x y NH_3 . Se determinó que una relación de equivalencia $\phi_g = 0.9$ resulta óptima, equilibrando altas temperaturas y menores emisiones.

Se observó una relación directa entre el aumento del flujo másico primario por unidad de área y las temperaturas alcanzadas, aumentando sostenidamente hasta $\dot{m}''_p = 0.42 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, en donde se produce un estancamiento en el incremento de las temperaturas.

Finalmente, al utilizar mezclas de combustible con una menor proporción de H_2 , aumentan significativamente las emisiones de NH_3 al operar con un $\dot{m}''_p = 0.15 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Al incrementar el flujo primario a $\dot{m}''_p = 0.175 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, las emisiones descienden a niveles comparables con los obtenidos con mezclas con una proporción de 70 % NH_3 .

Abstract

In this study, the operation of a two-stage inert porous medium burner operating with ammonia-hydrogen mixtures was analyzed. It was verified that the system can operate stably using mixtures with an ammonia proportion of 70 % and 85 %, obtaining a wider operating range with the first proportion. Internal temperatures along the burner were controlled, and unburned NO_x and NH_3 emissions were measured.

The results show that the global equivalence ratio directly influences emission levels. By increasing ϕ_g in the range between 0.6 and 0.9, a sustained reduction in NO_x and NH_3 emissions was achieved. It was determined that an equivalence ratio of $\phi_g = 0.9$ is optimal, balancing high temperatures and lower emissions.

A direct relationship was observed between the increase in the primary mass flux per unit area and the temperatures reached, increasing steadily up to $\dot{m}''_p = 0.42 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, where a stagnation in the temperature increase occurs.

Finally, when using fuel mixtures with a lower proportion of H_2 , NH_3 emissions increase significantly when operating with a $\dot{m}''_p = 0.15 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. By increasing the primary mass flux to $\dot{m}''_p = 0.175 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, emissions drop to levels comparable to those obtained with mixtures featuring a 70 % NH_3 proportion.

Índice general

Agradecimientos	1
Resumen	2
Abstract	3
Nomenclatura	10
1. Introducción y objetivos	12
1.1. Objetivo general	13
1.2. Objetivos específicos	13
2. Estado del Arte	15
2.1. Amoníaco e hidrógeno como combustibles	15
2.2. Combustión en medios porosos inertes	18
2.2.1. Recirculación de calor, exceso de entalpía y combustión superadia- bática	18
2.2.2. Principales materiales y formatos del medio poroso	19
2.2.3. Quemadores de dos etapas	20
3. Desarrollo experimental	24
3.1. Diseño del quemador	24

3.2. Equipos de control, instrumentos de medición y elementos de protección personal (EPP)	25
3.3. Combustibles y condiciones de operación	28
3.4. Procedimiento experimental	29
4. Resultados y Discusión	32
4.1. Mapas de estabilidad	32
4.2. Perfiles de temperatura	33
4.2.1. Mezclas con $\beta = 30\%$	34
4.2.2. Mezclas con $\beta = 15\%$	38
4.3. Emisiones de NO_x y NH_3 no quemado	40
4.3.1. Mezclas con $\beta = 30\%$	40
4.3.2. Mezclas con $\beta = 15\%$	43
4.3.3. Comparación de resultados	44
5. Conclusiones	46

Índice de figuras

1.	Estabilidad del quemador para diferentes fracciones de NH_3/H_2 . Los puntos representan ensayos individuales, y los límites de estabilidad son indicados por los contornos coloreados. $X_{NH_3}^{fuel} = 1 - X_{H_2}^{fuel}$ [9].	17
2.	Esquema de funcionamiento de un quemador de MPI. La zona a) tiene esferas de menor diámetro que las de la zona b), buscando que el frente de llama se estabilice en la interfaz entre ambas zonas. Adaptado de [10]. . . .	18
3.	Variación de las temperaturas del gas y del sólido poroso a lo largo del quemador. Adaptado de [13].	19
4.	Formas comunes de medio poroso inerte. De izquierda a derecha: Espuma cerámica, esferas.	20
5.	Setup experimental con los tres quemadores. (a) Quemador de MPI de dos etapas. (b) Quemador de MPI de dos etapas, sin espuma cerámica en la zona secundaria. (c) Quemador de MPI de una etapa. [14].	21
6.	Comparación de las emisiones normalizadas entre el quemador de dos etapas y el de una etapa. Para el quemador de dos etapas, la relación de equivalencia primaria es $\phi_p = 1.2$. (a) Emisiones normalizadas de NO_x . (b) Emisiones normalizadas de NH_3 no quemado. (c) Emisiones de NH_3 no quemado en función de las emisiones de NO_x . Adaptado de [14].	23
7.	Esquema del cuerpo del quemador, termocuplas, inyección primaria y secundaria. Adaptado de [15].	25
8.	Controladores de flujo (CF) utilizados.	26
9.	(a) Equipo adquirente de datos. (b) Software mostrando las temperaturas de las termocuplas.	26

10.	Equipo testo 350.	27
11.	Detector de amoníaco Safegas SKY 6000-NH3	27
12.	Detector de amoníaco Safegas SKY 2000-NH3	28
13.	Máscara fullface 3M modelo 6004.	28
14.	Setup experimental. Adaptado de [15].	31
15.	Mapas de estabilidad, $\phi_g = 0.8$. (a) Proporción de la mezcla $\alpha = 0.7; \beta = 0.3$. (b) Proporción de la mezcla $\alpha = 0.85; \beta = 0.15$	33
16.	Perfil de Temperaturas para distintos valores de ϕ_p . Valores fijos $\phi_g = 0.8$, $\dot{m}''_p = 0.42 \text{ kg } m^{-2} \text{ s}^{-1}$	34
17.	Perfil de Temperaturas para distintos valores de ϕ_g . Valores fijos $\phi_p = 1.1$, $\dot{m}''_p = 0.38 \text{ kg } m^{-2} \text{ s}^{-1}$	35
18.	Perfil de Temperaturas para distintos valores de ϕ_g . Valores fijos $\phi_p = 1.2$, $\dot{m}''_p = 0.25 \text{ kg } m^{-2} \text{ s}^{-1}$	36
19.	Perfil de Temperaturas para distintos valores de $\dot{m}''_p$. Valores fijos $\phi_p = 1.2$, $\phi_g = 0.8$	37
20.	Perfil de Temperaturas para distintos valores de $\dot{m}''_p$. Valores fijos $\phi_p = 1.1$, $\phi_g = 0.8$	37
21.	Perfil de Temperaturas para distintos valores de $\dot{m}''_p$. Valores fijos $\phi_p = 1.1$, $\phi_g = 0.8$, $\beta = 15\%$	38
22.	Perfil de Temperaturas para distintos valores de ϕ_g . Valores fijos $\phi_p = 1.1$, $\dot{m}''_p = 0.15 \text{ kg } m^{-2} \text{ s}^{-1}$, $\beta = 15\%$	39
23.	Emisiones de NH_3 y NO_x en función del ϕ_g . Valores fijos $\phi_p = 1.1$, $\dot{m}''_p = 0.38 \text{ kg } m^{-2} \text{ s}^{-1}$	41
24.	Emisiones de NH_3 y NO_x en función del ϕ_g . Valores fijos $\phi_p = 1.2$, $\dot{m}''_p = 0.25 \text{ kg } m^{-2} \text{ s}^{-1}$	41
25.	Emisiones de NH_3 y NO_x en función del $\dot{m}''_p$. Valores fijos $\phi_p = 1.2$, $\phi_g = 0.8$	42
26.	Emisiones de NH_3 y NO_x en función del $\dot{m}''_p$. Valores fijos $\phi_p = 1.1$, $\phi_g = 0.8$	42

27.	(a) Emisiones de NO_x en función del $\dot{m}''_p$. (b) Emisiones de NH_3 en función del $\dot{m}''_p$. Valor fijo $\phi_g = 0.8$	43
28.	Emisiones de NH_3 y NO_x en función del ϕ_g . Valores fijos $\phi_p = 1.1$, $\dot{m}''_p = 0.15 \text{ kg } m^{-2} \text{ s}^{-1}$	43
29.	Emisiones de NH_3 y NO_x en función del $\dot{m}''_p$. Valores fijos $\phi_p = 1.1$, $\phi_g = 0.8$	44
30.	Emisiones de NH_3 en función de las emisiones de NO_x	44
31.	Detalle de la Figura 30.	45

Índice de tablas

1.	Propiedades del CH_4 , H_2 y NH_3 como combustibles, a 300 K y 100 kPa [8].	16
2.	Propiedades de algunos materiales comunmente utilizados como MPI [13].	20
3.	Detalle de los puntos estables, correspondientes a los puntos verdes de los mapas de estabilidad de la Figura 15.	33
4.	Temperaturas promedio registradas para $\phi_p = 1.2, \dot{m}''_p = 0.42$ (Figura 19) y $\phi_p = 1.1, \dot{m}''_p = 0.5$ (Figura 20).	38
5.	Temperaturas promedio registradas para $\phi_p = 1.2, \dot{m}''_p = 0.25, \beta = 30\%$ (Figura 19) y $\phi_p = 1.1, \dot{m}''_p = 0.15, \beta = 15\%$ (Figura 21).	39

Nomenclatura

Parámetros

$\dot{m}''$ Flujo másico por unidad de área, $kg\ m^{-2}s^{-1}$

X Fracción volumétrica

Símbolos griegos

ϕ Relación de equivalencia

α Proporción de amoníaco en la mezcla

β Proporción de hidrógeno en la mezcla

Abreviaciones

MPI Medio Poroso Inerte

GEI Gases de Efecto Invernadero

GLP Gas Licuado de Petróleo

CF Controlador de flujo

LPM Litros por Minuto

ppm Partes por millón

Subíndices

p Primario

g Global

Capítulo 1

Introducción y objetivos

Durante años, las fuentes de energía fósiles como el petróleo, el gas natural y GLP, han sido las principales impulsoras del desarrollo tecnológico e industrial en el mundo. Sin embargo, el uso y abuso de estas fuentes de energía, tanto en el sector industrial como en el doméstico, nos han llevado a un estado de crisis ambiental a nivel global. Las emisiones de CO_2 , NO_x y material particulado generadas por la combustión de estos medios son algunos de los principales responsables del calentamiento global y el efecto invernadero.

Debido a esto, se ha iniciado un proceso de transición hacia una matriz energética libre de carbono, marcada por el Acuerdo de París, tratado adoptado en 2015 en la COP21, cuyo objetivo principal es limitar el calentamiento global a 1,5 grados centígrados (preferiblemente), en comparación con los niveles preindustriales [1].

A nivel nacional, se han impuesto como metas la reducción del 60 % de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el sector energético al año 2050, respecto al 2018. Para el mismo año, el 100 % de la electricidad producida debe provenir de fuentes no emisoras de GEI, y para el año 2030, al menos un 80 % de la electricidad debe provenir específicamente de fuentes renovables [2].

En este contexto, fuentes de energía renovables como la solar o la eólica han surgido como alternativas. Sin embargo, estas fuentes son intrínsecamente intermitentes y dependientes de las condiciones climáticas, por lo que no han logrado cumplir con reemplazar al cien por ciento a las fuentes de energía fósiles. Por lo tanto, ha sido necesario explorar otras opciones para producir y almacenar la energía proveniente de fuentes renovables. Así, la producción de hidrógeno y amoníaco verdes como vectores energéticos representan soluciones muy atractivas para el país. Chile tiene un gran potencial solar, especialmente en las regiones de Tarapacá y de Antofagasta [3], lo que permitiría producir H_2 y NH_3 verdes aprovechando

esta energía.

La introducción de estos nuevos combustibles presenta una buena oportunidad de adaptar la actual tecnología de plantas termoeléctricas para que trabajen con mezclas de amoníaco-metano o amoníaco-metano-hidrógeno, permitiendo reducir significativamente las emisiones de CO_2 sin requerir un reemplazo total de la infraestructura.

El hidrógeno presenta altos costos de almacenamiento y transporte, lo que dificulta su implementación. El amoníaco, al ser portador de hidrógeno en su molécula y tener un menor costo por unidad de energía almacenada, se presenta como la opción más viable para solucionar los problemas anteriores. Sin embargo, el amoníaco presenta desventajas importantes como combustible, tales como un bajo poder calorífico por unidad de masa, una muy baja velocidad de llama, y la generación de NO_x y NH_3 no quemado como productos de la combustión, los cuales tienen impacto climático.

Para combatir estas desventajas, un quemador de medio poroso inerte (MPI) surge como una alternativa efectiva, ya que han demostrado altas eficiencias y temperaturas, reducidas emisiones y amplios rangos de estabilidad [4].

Teniendo esto en cuenta, la presente tesis se centra en la caracterización de un quemador de medio poroso inerte de dos etapas, identificando sus puntos de operación estable, los niveles de emisión y las temperaturas alcanzadas utilizando mezclas de amoníaco-hidrógeno.

1.1. Objetivo general

Caracterizar experimentalmente el comportamiento térmico, operacional y ambiental de un quemador de medio poroso de dos etapas operando con mezclas de amoníaco-hidrógeno, evaluando el efecto de parámetros primarios y secundarios de operación para su potencial aplicación en sistemas de calentamiento de agua residencial.

1.2. Objetivos específicos

- 1) Analizar el estado del arte asociado a la combustión de amoníaco-hidrógeno en quemadores de medio poroso.
- 2) Determinar experimentalmente el rango de operación estable del quemador de medio poroso de dos etapas, considerando variaciones en la relación de equivalencia primaria

y en el flujo másico por unidad de área primario.

- 3) Evaluar el efecto de la razón de equivalencia global sobre los perfiles de temperatura al interior del reactor y sobre las emisiones de NO_x y amoníaco no quemado.

Capítulo 2

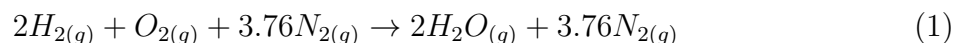
Estado del Arte

2.1. Amoníaco e hidrógeno como combustibles

El dihidrógeno (H_2) es un gas incoloro e inodoro que no se encuentra de manera natural en el ambiente, sino que se encuentra adherido a otras moléculas en su forma elemental. Puede obtenerse por métodos como la electrólisis del agua, craqueo de amoníaco o a través de reformado de metano. En el campo de la combustión, se ha aplicado en motores de combustión interna, turbinas de gas y en sistemas de carga homogénea encendidos por compresión (HCCI) [5].

Tiene un alto contenido energético por unidad de peso, haciendo que la energía liberada al combustionarse sea mayor que la de otros combustibles como el metano (ver Tabla 1).

Al combustionarse de forma completa, a diferencia de los combustibles fósiles tradicionales, genera como único residuo vapor de agua, por lo que resulta sumamente atractivo en el contexto de la descarbonización de la matriz energética.



Al ser la molécula más pequeña y ligera que existe, supone desafíos técnicos para su almacenamiento y distribución. A pesar de su alto poder calorífico inferior, su densidad de energía por unidad de volumen es bastante baja a temperatura ambiente, por lo que requiere de almacenamiento a altas presiones para aumentar su densidad [6]. Otra desventaja importante, es la irrupción del fenómeno conocido como fragilización por hidrógeno, que reduce las propiedades mecánicas de los materiales metálicos al encontrarse expuestos

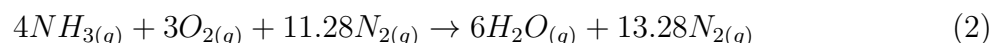
a estas moléculas en condiciones de alta presión [7].

Tabla 1: Propiedades del CH_4 , H_2 y NH_3 como combustibles, a 300 K y 100 kPa [8].

	Metano (CH_4)	Hidrogeno (H_2)	Amoníaco (NH_3)
Densidad (kg/m^3)	0.66	0.08	0.73
Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)	50.05	120	18.8
Velocidad de llama laminar (m/s)	0.38	3.51	0.07
Energía mínima de Ignición (mJ)	0.28	0.011	8.00
Temperatura de llama adiabática (K)	2223	2483	1850
Índice adiabático, γ	1.32	1.41	1.32

Por su parte, el amoníaco (NH_3) es un gas incoloro, con un olor sofocante y altamente tóxico, y se sintetiza a gran escala para fabricar productos como refrigerantes, productos de limpieza o fertilizantes. Es portador de hidrógeno en su molécula, conformando un 17.79% de su masa.

Tiene una densidad casi nueve veces mayor que la del hidrógeno y se licúa a una presión moderada de cerca de 10 bar, lo que facilita significativamente su almacenamiento y transporte, pudiendo utilizarse tecnología ya existente. Al igual que el hidrógeno, no posee carbono en su molécula, por lo que no produce CO_2 ni CO al combustionarse.



Sin embargo, en la práctica el nitrógeno presente inicialmente en la molécula puede unirse a otros elementos presentes en la reacción formando óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxido nitroso (N_2O), los cuales son perjudiciales para el medio ambiente. Además, si no se combustiona completamente, el amoníaco no quemado presenta un peligro para las personas debido a su toxicidad.

Con un bajo poder calorífico inferior (entre 2 y 3 veces menor que el del metano), una baja velocidad de llama laminar, una alta energía mínima de ignición y una temperatura de llama adiabática relativamente menor, el amoníaco puede considerarse un combustible inestable y poco reactivo comparado con combustibles convencionales en base a carbono. Para mitigar su naturaleza de "mal combustible", se han realizado investigaciones utili-

zando mezclas de NH_3 con H_2 , una de ellas utilizando un quemador de medio poroso [9]. En dicho estudio, se demostró que la adición de H_2 ayudó a aumentar la estabilidad operativa del quemador en relaciones de equivalencia $\phi \leq 1.1$; utilizando mezclas entre $0.1 \leq X_{H_2}^{fuel} \leq 0.4$; ampliando el rango de operación estable del reactor.

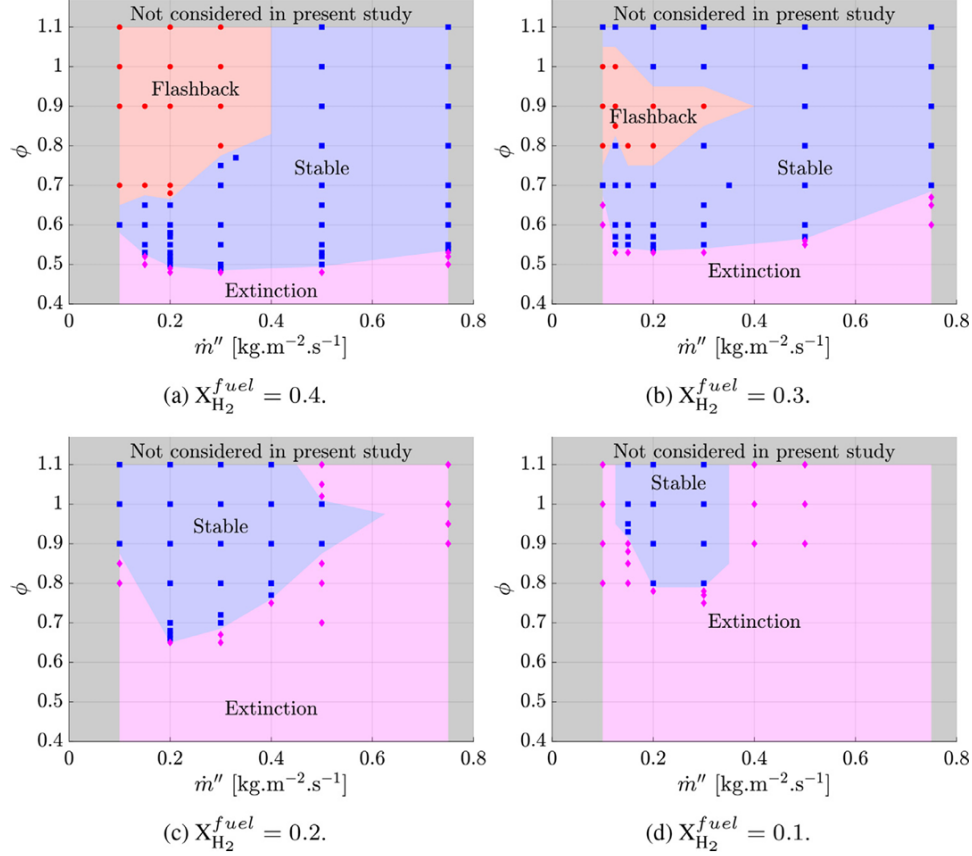


Figura 1: Estabilidad del quemador para diferentes fracciones de NH_3/H_2 . Los puntos representan ensayos individuales, y los límites de estabilidad son indicados por los contornos coloreados. $X_{NH_3}^{fuel} = 1 - X_{H_2}^{fuel}$ [9].

Pese a sus desventajas, las propiedades fisicoquímicas del NH_3 hacen que sea considerado un vector energético prometedor en el objetivo de la descarbonización. Su naturaleza libre de carbono, su alta densidad de energía volumétrica y la facilidad de ser licuado y transportado a gran escala permite que pueda ser utilizado tanto como método de transporte de hidrógeno (el cual puede ser recuperado a través de descomposición catalítica), o bien como un combustible, mezclándolo con otros agentes más reactivos que permitan una combustión estable.

2.2. Combustión en medios porosos inertes

Un quemador de medio poroso inerte (MPI) es un dispositivo que utiliza una matriz porosa no reactiva químicamente, generalmente cerámica, que absorbe, almacena y redistribuye el calor generado durante la combustión. La mezcla de combustible fluye a través del material poroso, donde se precalienta y permite que la combustión se desarrolle de manera estable y eficiente dentro o sobre la matriz sólida.

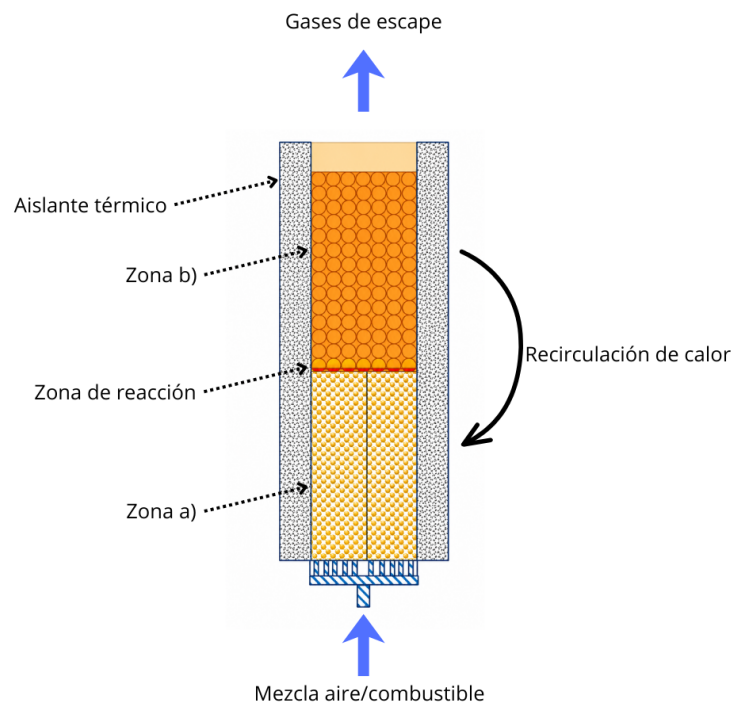


Figura 2: Esquema de funcionamiento de un quemador de MPI. La zona a) tiene esferas de menor diámetro que las de la zona b), buscando que el frente de llama se establezca en la interfaz entre ambas zonas. Adaptado de [10].

2.2.1. Recirculación de calor, exceso de entalpía y combustión superadiabática

Al realizarse la combustión, los productos calientes transfieren calor a la fase sólida por convección, energía que es transportada aguas arriba mediante conducción y radiación.

Luego, el sólido devuelve parte de ese calor al flujo entrante de aire-combustible mediante conducción y radiación. Este precalentamiento permite operar en regímenes amplios de relaciones de equivalencia y con combustibles poco reactivos, como el caso del amoníaco.

Al recircular el calor de los gases de escape y calentar la premezcla, se produce un aumento de la entalpía en la zona de reacción, debido a que la entalpía del sistema no depende únicamente del poder calorífico del combustible, sino que se agrega la energía almacenada y recirculada por la matriz [11]. Esto resulta en un fenómeno denominado combustión superadiabática, que consiste en que la temperatura de llama real en el quemador supera la temperatura teórica adiabática de la mezcla, lo cual provoca un aumento en la eficiencia, la estabilidad de llama y una extensión de los límites de inflamabilidad, permitiendo operar de manera estable en condiciones de mezcla pobres que resultarían imposibles de replicar en condiciones adiabáticas estándar [12].

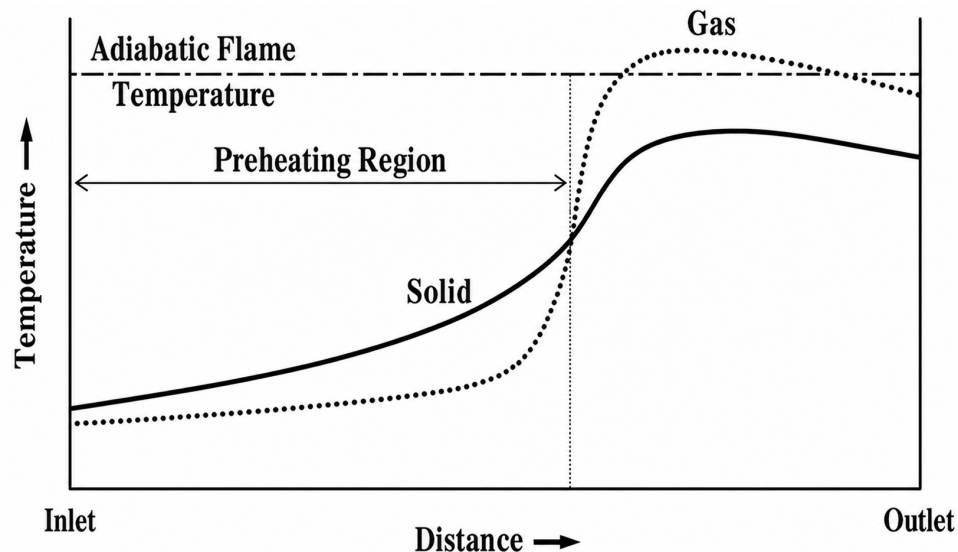


Figura 3: Variación de las temperaturas del gas y del sólido poroso a lo largo del quemador. Adaptado de [13].

2.2.2. Principales materiales y formatos del medio poroso

Las características deseables del material utilizado como medio poroso inerte son una alta resistencia a la temperatura y al choque o estrés térmico (thermal shock), para soportar las altas temperaturas y las variaciones térmicas generadas durante la combustión en el quemador. Una alta conductividad térmica y emisividad favorecen la propagación del calor almacenado por la matriz sólida. Por último, debe presentar un bajo coeficiente

de expansión térmica, para minimizar los cambios de volumen que puedan provocar daños estructurales en el quemador. Los materiales más comunes para este propósito son el carburo de silicio (SiC), la alúmina (Al_2O_3) y la zirconia (ZrO_2), cuyas propiedades se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades de algunos materiales comunmente utilizados como MPI [13].

Propiedad	Unidad	Al_2O_3	SiC	ZrO_2
Temperatura máxima en aire	$^{\circ}C$	1900	1600	1800
Coeficiente de expansión térmica α , (20-1000 $^{\circ}C$)	$10^{-6} K^{-1}$	8	4-5	10-13
Conductividad térmica λ , (20 $^{\circ}C$)	W/mK	20-30	80-150	2-5
Conductividad térmica λ , (1000 $^{\circ}C$)	W/mK	5-6	20-50	2-4
Resistencia al estrés térmico, R	K	100	230	230
Calor específico	J/kgK	0.9-1	0.7-0.8	0.5-0.6
Emisividad (2000 K)	-	0.28	0.9	0.31

Con respecto a las geometrías utilizadas en los quemadores de medio poroso, la espuma cerámica y las capas o lechos de esferas son los más comunes.

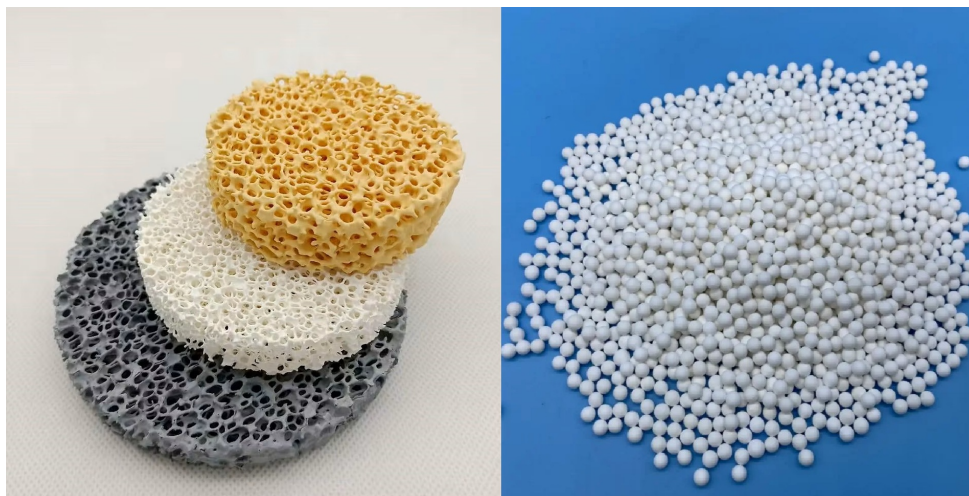


Figura 4: Formas comunes de medio poroso inerte. De izquierda a derecha: Espuma cerámica, esferas.

2.2.3. Quemadores de dos etapas

Como se expuso en la sección 2.1, los principales desafíos que presenta la combustión de amoníaco son una baja estabilidad de llama y emisiones considerables de NO_x y NH_3 .

no quemado. Utilizar un quemador de medio poroso soluciona el primer problema, aunque no soluciona del todo el tema de las emisiones. Vignat et al. [14], realizaron un estudio experimental en donde pusieron a prueba una arquitectura de quemador axial de dos etapas; una primera etapa con una relación de equivalencia rica ($\phi > 1$), y la segunda con una relación de equivalencia pobre ($\phi < 1$), haciendo la distinción entre la relación de equivalencia de la zona primaria (ϕ_p) y la relación de equivalencia global del quemador (ϕ_g). Para lograrlo, incluyeron una inyección de aire secundario, y se analizaron tres casos; un quemador de una sola etapa, un quemador de dos etapas sin espuma cerámica en la zona secundaria, y por último agregando espuma en la zona secundaria.

Además de las relaciones de equivalencia, se controlaron variables como el *mass flux* primario ($\dot{m}''_p$), *mass flux* global ($\dot{m}''_g$), y la fracción molar de cada compuesto en la mezcla de combustible ($X_{NH_3}^{fuel} + X_{H_2}^{fuel} = 1$).

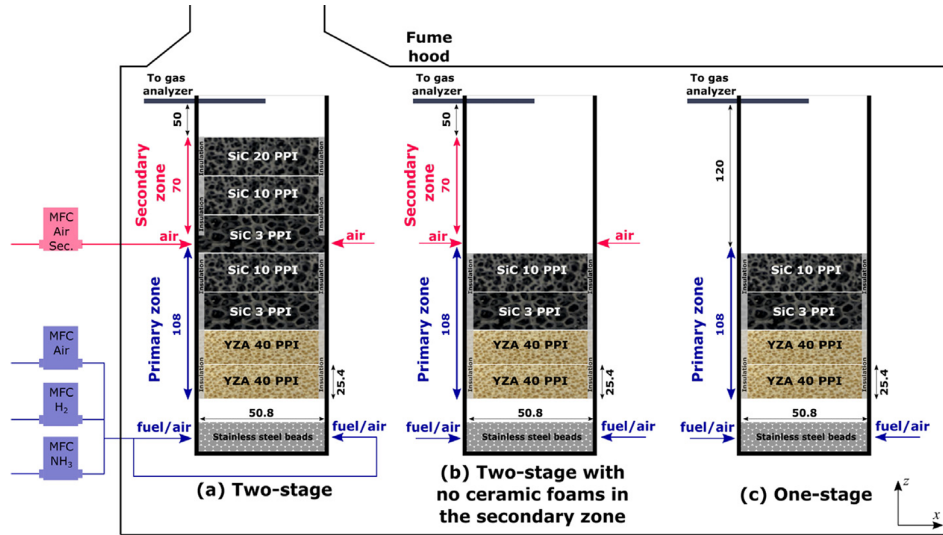


Figura 5: Setup experimental con los tres quemadores. (a) Quemador de MPI de dos etapas. (b) Quemador de MPI de dos etapas, sin espuma cerámica en la zona secundaria. (c) Quemador de MPI de una etapa. [14].

Para el quemador (a) los compuestos premezclados se inyectaron en la base del quemador, fluyendo a través de bolas de acero inoxidable antes de llegar a la zona primaria con las espumas. Se dejó un espacio libre de 25 mm entre las esferas y la zona primaria para lograr un perfil de velocidad plano y evitar interacciones entre los medios sólidos. Para la zona primaria, se utilizaron dos espumas de zirconia-alúmina estabilizada con itria (YZA) con una graduación de 40 poros por pulgada (PPI), seguidas de dos espumas de SiC, la primera con 3 PPI y la segunda con 10 PPI. La justificación es que un tamaño de poro

mayor cerca de la interfaz con la sección de YZA ayuda a evitar el enfriamiento de la llama al operar con NH_3 puro y mejora la recirculación del calor. Luego de esta primera etapa, se inyecta el aire secundario de manera radial a través de cuatro tubos. Para la segunda etapa, se utiliza una configuración similar de espumas, añadiendo al final una capa de espuma con 20 PPI. La sección con 3 PPI facilita el ingreso del aire secundario hacia el núcleo del quemador, y la sección final con poros mas pequeños mejora la recirculación del calor y reduce la pérdida de calor hacia el ambiente. Se utilizó papel de fibra cerámica como material aislante entre las espumas y las paredes del quemador, cuyo cuerpo estaba hecho de cuarzo.

El quemador (b) contaba con la misma configuración el la zona primaria, con la salvedad de que no tenía espumas en la zona secundaria. Por último, el quemador (c) de una sola etapa era igual al (b), sin inyección de aire secundario.

Para comparar los quemadores (a) y (c), se realizaron pruebas en manteniendo un valor constante de $\dot{m}''_g = 0.4 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, evaluando mezclas $X_{NH_3}^{fuel} = 1$ y $X_{NH_3}^{fuel} = 0.7$ y midiendo las emisiones de NO_x y NH_3 no quemado. El resultado fueron emisiones notablemente menores de ambos compuestos en el quemador de dos etapas, tanto con $X_{NH_3}^{fuel} = 1$ como con $X_{NH_3}^{fuel} = 0.7$. En esos casos, las emisiones de NO_x mostraron baja sensibilidad a la variación del ϕ_g en comparación con los casos del quemador de una etapa, rondando los 500 ppmv para $X_{NH_3}^{fuel} = 0.7$ y los 120 ppmv para $X_{NH_3}^{fuel} = 1$. En el caso del quemador de una etapa, las emisiones de NO_x con $X_{NH_3}^{fuel} = 0.7$ ascienden desde 362 ppmv a $\phi_g = 0.53$ hasta alcanzar un máximo >4000 ppmv en $\phi_g = 0.8$, para luego descender a 13 ppmv en $\phi_g = 1.4$. Para $X_{NH_3}^{fuel} = 1$, alcanzan un máximo en $\phi_g = 0.9$ para luego descender (Figura 6 (a)).

En la Figura 6 (b) se observa un rango en el que se minimizan las emisiones, entre $0.6 < \phi_g < 1$; en esta zona, las emisiones se encontraron debajo del límite de detección del analizador de gases (8ppmv). Fuera de ese rango, se observan altas emisiones de NH_3 no quemado en el caso del quemador de una etapa, tanto para relaciones estequiométricas pobres como ricas, llegando a un máximo de 14300 ppmv. Al analizar (a) y (b) en conjunto, se observa un rango de operación óptimo en lo que respecta a emisiones, entre $0.6 < \phi_g < 1$.

Para resaltar las bajas emisiones del quemador de dos etapas, en (c) se observa que todas las mediciones realizadas en este equipo se encuentran en el recuadro de la esquina inferior izquierda, mientras que las realizadas en el quemador de una etapa se encuentran dispersas por el gráfico.

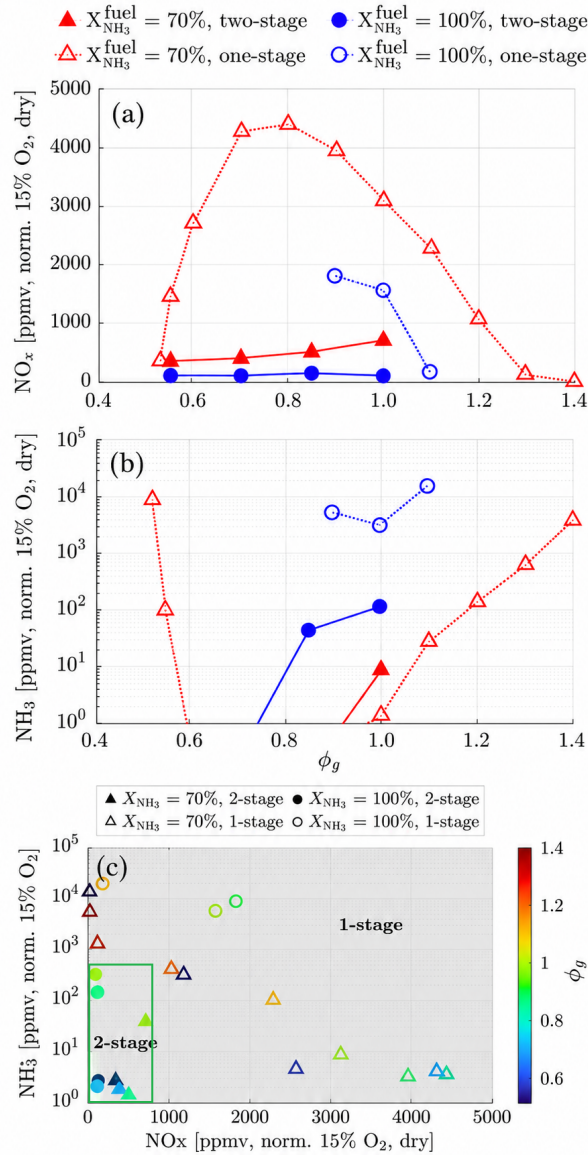


Figura 6: Comparación de las emisiones normalizadas entre el quemador de dos etapas y el de una etapa. Para el quemador de dos etapas, la relación de equivalencia primaria es $\phi_p = 1.2$. (a) Emisiones normalizadas de NO_x . (b) Emisiones normalizadas de NH_3 no quemado. (c) Emisiones de NH_3 no quemado en función de las emisiones de NO_x . Adaptado de [14].

Capítulo 3

Desarrollo experimental

El quemador utilizado en este trabajo sigue la configuración experimental descrita y caracterizada por Silva (2025) en su trabajo de título [15], correspondiente a un quemador cilíndrico de medio poroso inerte de dos etapas, con flujo axial.

3.1. Diseño del quemador

El cuerpo del reactor corresponde a un cilindro de acero inoxidable de 200 mm de largo, 40 mm de diámetro interno y 56 mm de diámetro externo. Cuenta con ocho perforaciones pasantes de 5 mm, ubicadas con una separación de 20 mm. A 120 mm de la base, se encuentran cuatro perforaciones roscadas de 1/8"NPT, separadas 90° alrededor del cuerpo del cilindro. En la base, un difusor se encarga de distribuir el flujo de manera uniforme a través de la sección transversal del quemador.

En las perforaciones de 5 mm se disponen ocho termocuplas tipo S, con un rango de medición de 0°C a 1450 °C, con una precisión de 1.5°C. En las perforaciones roscadas, se encuentra montada la inyección de aire secundario. De esta forma, hay cuatro termocuplas en la zona primaria y cuatro en la secundaria.

Como medio poroso, se utilizan esferas de alúmina de 3 mm y de 6 mm. Se ubica primero un lecho de 55 mm de espesor con las esferas de 3 mm, y luego el resto se rellena con esferas de 6 mm (Figura 7).

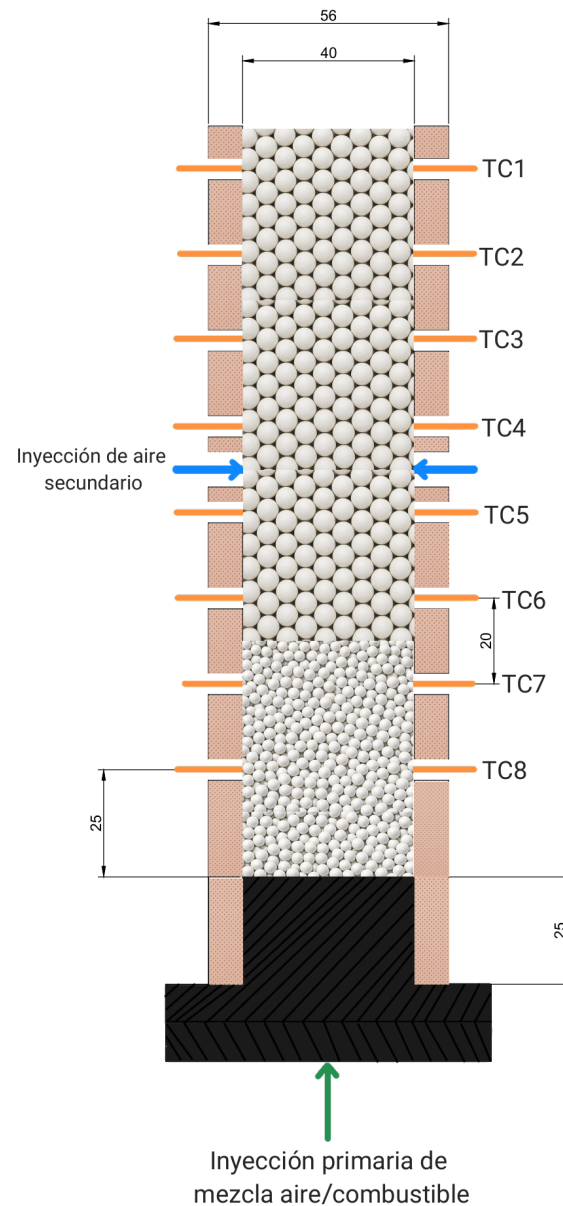


Figura 7: Esquema del cuerpo del quemador, termocuplas, inyección primaria y secundaria. Adaptado de [15].

3.2. Equipos de control, instrumentos de medición y elementos de protección personal (EPP)

Para controlar el funcionamiento del quemador, se utilizaron los siguientes equipos:

- **Controladores de flujo:** Para controlar los caudales de entrada se utilizaron contro-

ladores de flujo de la marca Aalborg. Para las líneas de CH_4 , H_2 y aire secundario se utilizaron controladores modelo DPC17, para la de aire primario un modelo DPC57 y para la línea de NH_3 se utilizó un modelo GFC47.

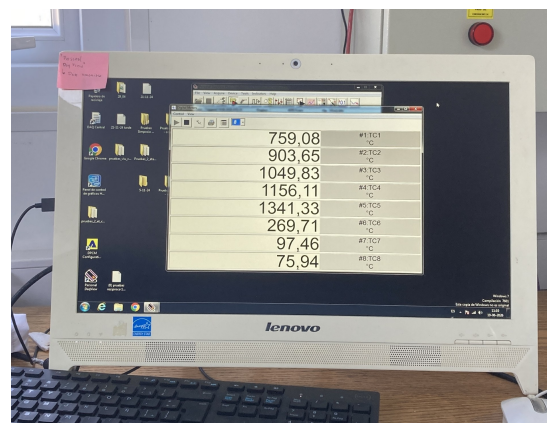


Figura 8: Controladores de flujo (CF) utilizados.

- **Analizador de datos:** Para convertir las diferencias de voltaje de las termocupas en datos digitales, se utilizó un equipo adquisidor de datos de la marca Omega, modelo OMB-DAQ-56. Luego, los datos digitales son recibidos e interpretados por un computador con el software Personal DaqView Plus, el cual despliega en pantalla las temperaturas.



(a) DAQ Omega OMB-DAQ-56



(b) Equipo con software DaqView Plus

Figura 9: (a) Equipo adquisidor de datos. (b) Software mostrando las temperaturas de las termocupas.

Para medir las emisiones en los gases de escape se utilizaron dos equipos:

- **testo 350:** Equipo analizador de emisiones. Utilizado para medir las concentraciones de O_2 , NO y NO_x en los gases de escape, a través de una sonda especial con prefiltro para gases de escape. Entrega valores como el % de O_2 , las ppm de NO , NO_x , CO , SO_2 , entre otros. El equipo funciona de manera independiente, sin embargo, puede conectarse vía USB a un computador con el software testo easyEmission, para recopilar todos los datos en tiempo real.



Figura 10: Equipo testo 350.

- **Detector de amoníaco:** Equipo que detecta la concentración de NH_3 no quemado en los gases de escape, con un rango de 0 a 5000 ppm y una resolución de 1 ppm, de la marca Safegas, modelo SKY 6000-NH3.



Figura 11: Detector de amoníaco Safegas SKY 6000-NH3

Para mantener la seguridad de las personas dentro del laboratorio, se utilizan en todo momento dos equipos detectores de amoníaco ambiental modelo SKY 2000-NH3 de la marca Safegas, ubicados uno dentro de la campana, y el otro a 30 cm de la campana.



Figura 12: Detector de amoníaco Safegas SKY 2000-NH3

Además, al momento de realizar las mediciones se utilizaron máscaras fullface de la marca 3M, modelo 6004. Otros elementos de protección personal utilizados fueron guantes de nitrilo, guantes de soldador, lentes de seguridad y oberoles.



Figura 13: Máscara fullface 3M modelo 6004.

3.3. Combustibles y condiciones de operación

Uno de los objetivos de este estudio experimental es el de mapear los puntos de operación estable del quemador, utilizando mezclas de amoníaco-hidrógeno. Los parámetros principales de operación fueron la proporción de cada combustible en la mezcla, $\dot{m}''_p$, ϕ_p y el ϕ_g .

La proporción de cada combustible en la mezcla primaria se expresa de la siguiente forma:

$$\alpha NH_3 + \beta H_2 \quad (3)$$

con $\alpha + \beta = 1$.

El $\dot{m}''_p$ corresponde al flujo de masa de la mezcla de combustibles y el aire primario en kg/s , dividido la sección transversal del quemador. De esta forma, el $\dot{m}''_p$ queda expresado en kg/m^2s .

El ϕ_p corresponde a la relación de equivalencia de la zona primaria, por lo que queda definido como [16]:

$$\phi_p = \frac{(A/F)_{estequimétrico}}{(A/F)_{real}} \quad (4)$$

El ϕ_g corresponde a la relación de equivalencia global del sistema, considerando la inyección de aire secundario. Por lo que en vez de calcularse $(A/F)_{real}$ con el aire primario, se hace con el flujo de aire total.

Para este estudio, se realizaron pruebas con $\beta = 0.3$ y $\beta = 0.15$; y se tomó como referencia una relación de equivalencia global $\phi_g = 0.8$, haciendo un mapa de estabilidad de ϕ_p vs $\dot{m}''_p$ para ambos valores de β . Una vez realizados ambos mapas de estabilidad, se realizaron pruebas variando los valores de ϕ_g y $\dot{m}''_p$, para determinar la influencia de estas variables en las emisiones de NH_3 no quemado y NO_x .

3.4. Procedimiento experimental

Aquí se detalla el paso a paso del procedimiento para realizar las pruebas en quemador, acompañado de un esquema del setup experimental (Figura 14).

1. Dar encendido general en el tablero de control.
2. Encender PC, abrir el programa Personal DaqView Plus y configurar las termocupas. Configurar la carpeta de destino de las mediciones de temperatura. Iniciar toma de datos.
3. Encender el compresor.
4. Verificar que las válvulas de paso de los gases estén cerradas.
5. Verificar que los controladores de flujo indiquen *cerrado*.
6. Encender detectores de NH_3 ambiental SKY 2000-NH3.

7. Encender detector de NH_3 SKY 6000-NH3 y testo 350.
8. Abrir las líneas de gas. Ajustar presión de salida a 2 bar. Abrir las válvulas de forma secuencial.
9. Encender la campana de extracción de aire.
10. Encender el quemador. Establecer los flujos deseado en los controladores (Aire primario: 12 SLPM, Aire secundario: 2 SLPM, CH_4 : 1.4 SLPM).
11. Esperar a que el frente de llama se encuentre en la termocupla 5, y que la termocupla 6 llegue a los 650°C.
12. Establecer punto de operación.
13. Esperar a que el frente de llama se estabilice. El criterio para determinar que el frente se encuentra estabilizado es que la variación en las temperaturas sea menor a 10°C en un periodo de 2 minutos, en cada una de las termocuplas.
14. Realizar la medición de emisiones de NH_3 y NO_x , con ambos equipos simultáneamente.
15. Una vez finalizadas todas las pruebas, cerrar el cilindro de NH_3 . Una vez que se consuma toda la presión en la línea y el controlador indique un flujo de 0 SLPM, cerrar las válvulas de la línea. Proceder de la misma forma con el H_2 y finalmente el CH_4 .
16. Establecer controladores de flujo a *cerrado*.
17. Apagar campana de extracción.
18. Apagar compresor.
19. Extraer los datos de temperaturas. Apagar computador.
20. Apagado general en el tablero de control.

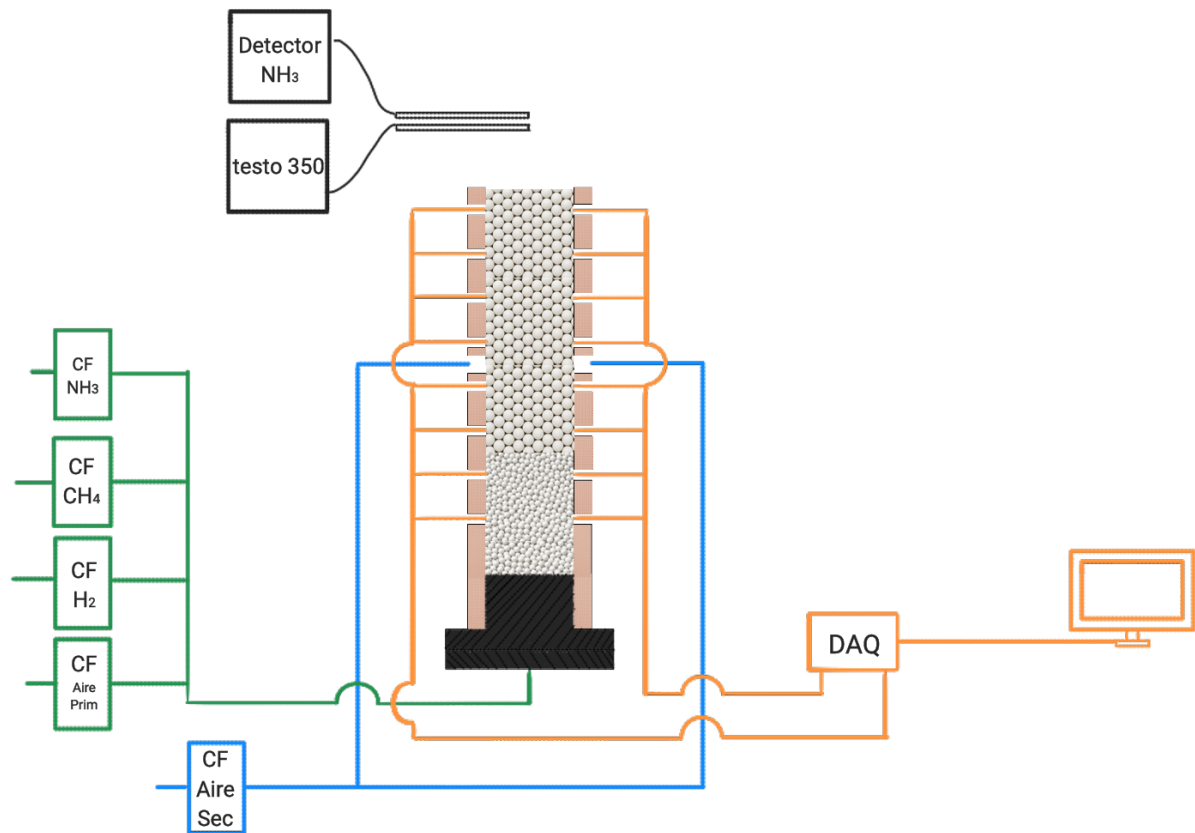


Figura 14: Setup experimental. Adaptado de [15].

Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1. Mapas de estabilidad

Se realizaron ensayos para delimitar la zona de operación estable del quemador, usando una relación de equivalencia global $\phi_g = 0.8$. El mapa de estabilidad resultante (Figura 15 (a)) muestra un rango de $\dot{m}''_p$ entre 0.25 y 0.42 kg m⁻² s⁻¹ para $\phi_p = 1.2$, y entre 0.38 y 0.5 kg m⁻² s⁻¹ para $\phi_p = 1.1$, con un 30 % de NH_3 en la mezcla. Se encontró un rango mucho más limitado al pasar a un 15 % de NH_3 (Figura 15 (b)), siendo únicamente posible estabilizar ensayos con una relación de equivalencia primaria $\phi_p = 1.1$ y con un rango de $\dot{m}''_p$ entre 0.15 y 0.175 kg m⁻² s⁻¹. Al probar puntos con un $\dot{m}''_p$ menor que el límite izquierdo de alguno de los rangos estables (representados por puntos verdes en los mapas), ocurría el fenómeno de *Flashback* o retroceso de llama, en el cual el frente de llama comienza a moverse aguas arriba debido al bajo caudal, viéndose reflejado en un aumento en la temperatura de las termocuplas TC7 y TC8. Sucedió el caso contrario al probar puntos de operación con un $\dot{m}''_p$ mayor que el límite derecho, donde apareció el fenómeno de *Blow-off* o desprendimiento de llama, donde el frente es arrastrado aguas abajo por la mezcla, provocando la extinción de la llama. Las X rojas representan los puntos de operación utilizados en ensayos declarados como inestables más cercanos al límite de estabilidad encontrado.

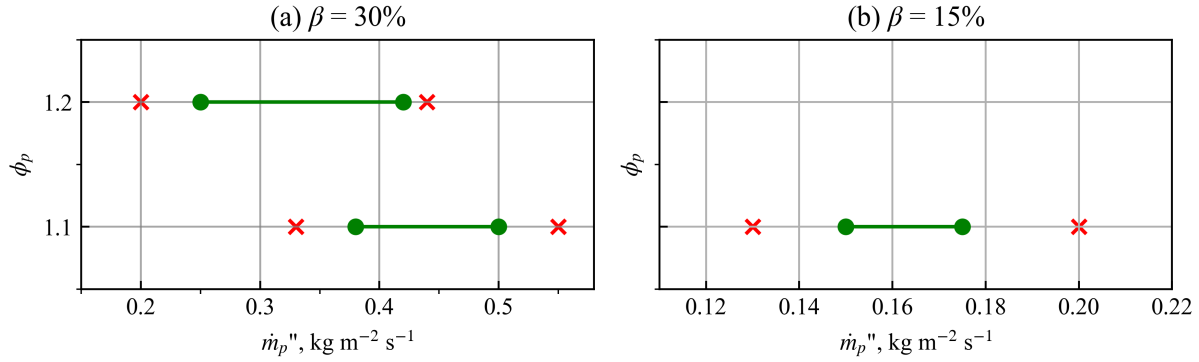


Figura 15: Mapas de estabilidad, $\phi_g = 0.8$. (a) Proporción de la mezcla $\alpha = 0.7$; $\beta = 0.3$. (b) Proporción de la mezcla $\alpha = 0.85$; $\beta = 0.15$.

Tabla 3: Detalle de los puntos estables, correspondientes a los puntos verdes de los mapas de estabilidad de la Figura 15.

β	ϕ_p	$\dot{m}_p''$
0.3	1.2	0.25
0.3	1.2	0.42
0.3	1.1	0.38
0.3	1.1	0.5
0.15	1.1	0.15
0.15	1.1	0.175

4.2. Perfiles de temperatura

Para el análisis de los perfiles térmicos, se utilizó una representación longitudinal del quemador, con el flujo de gases avanzando de izquierda a derecha. El eje horizontal (x) representa la posición axial en milímetros. Se dividió el sistema en tres zonas principales: la primera zona (-55 a 0 mm) corresponde al lecho de esferas de alúmina de 3 mm de diámetro, la segunda zona (0 a 40 mm) está rellena con esferas de alúmina de 6 mm de diámetro, y junto a la anterior componen la primera etapa. La última zona inicia con una línea roja discontinua ubicada en $x = 40$ mm que marca la inyección de aire secundario, y corresponde a la segunda etapa del quemador. Los puntos corresponden al promedio de la medición de temperatura realizada por cada una de las termocuplas, siendo TC8 la termocupla ubicada en $x = -30$ mm y TC1 la termocupla ubicada en $x = 110$ mm.

4.2.1. Mezclas con $\beta = 30\%$

En general, el peak de temperatura se encuentra en la segunda zona, específicamente en TC5 ($x = 30$ mm) en la mayoría de ensayos, aunque el frente de llama puede llegar a estabilizarse en TC6 ($x = 10$ mm) dependiendo de las temperaturas de la matriz porosa al iniciar cada ensayo, lo que impacta en los resultados aumentando la desviación estándar en ese punto. La Figura 16 muestra el efecto de la relación de equivalencia primaria en las temperaturas, comparando $\phi_p = 1.2$ con $\phi_p = 1.1$. Se observa que al tener una mezcla primaria más rica en combustible, las temperaturas alcanzadas son mayores a partir de TC5. El peak de temperatura alcanzado por $\phi_p = 1.2$ es de 1445.22°C , mientras que $\phi_p = 1.1$ alcanza una temperatura de 1397.05°C .

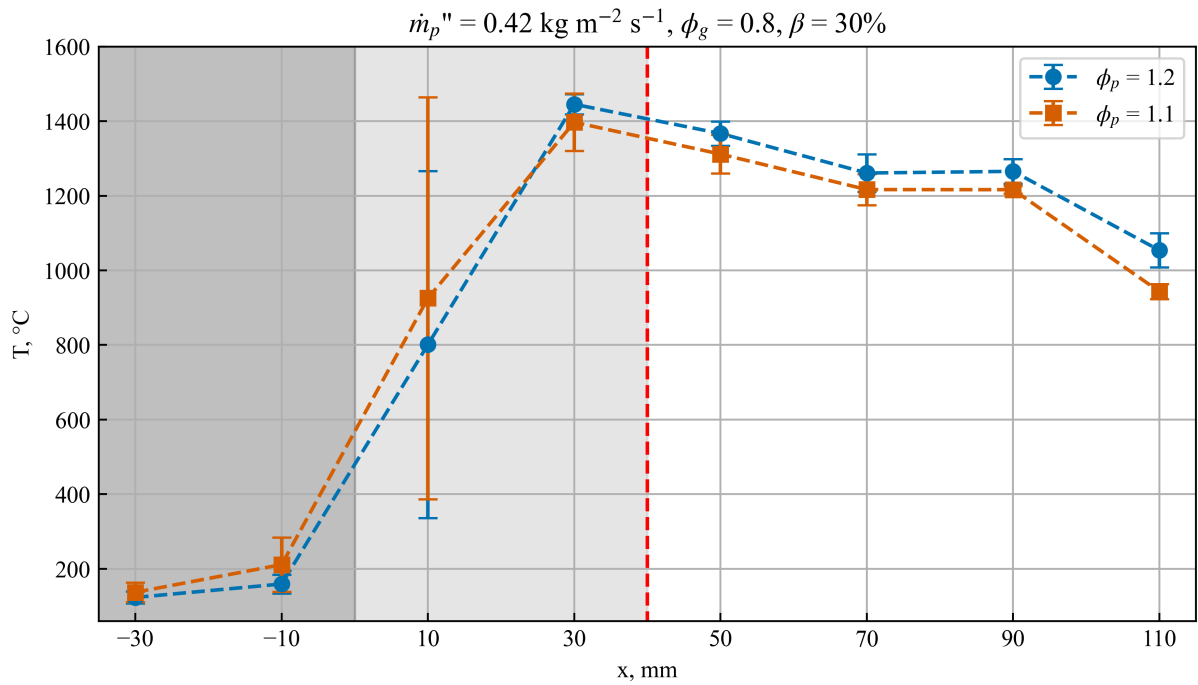


Figura 16: Perfil de Temperaturas para distintos valores de ϕ_p . Valores fijos $\phi_g = 0.8$, $\dot{m}_p'' = 0.42 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

La Figura 17 compara las temperaturas al variar el flujo de aire secundario. Al tener una mezcla muy pobre globalmente ($\phi_g = 0.6$), las temperaturas son menores en general, salvo por el peak de temperatura, que registra una variación cercana al 3% entre los casos de mayor y menor temperatura ($\phi_g = 0.7$ y $\phi_g = 0.6$, respectivamente). Al aumentar la relación de equivalencia global a valores $\phi_g \geq 0.7$, se observa una menor variación térmica, estabilizándose en el peak por encima de los 1293°C y hasta los 1321.5°C en $\phi_g = 0.7$.

Esto puede deberse a que un exceso en el flujo de aire secundario enfría la matriz porosa y no permite una buena combustión.

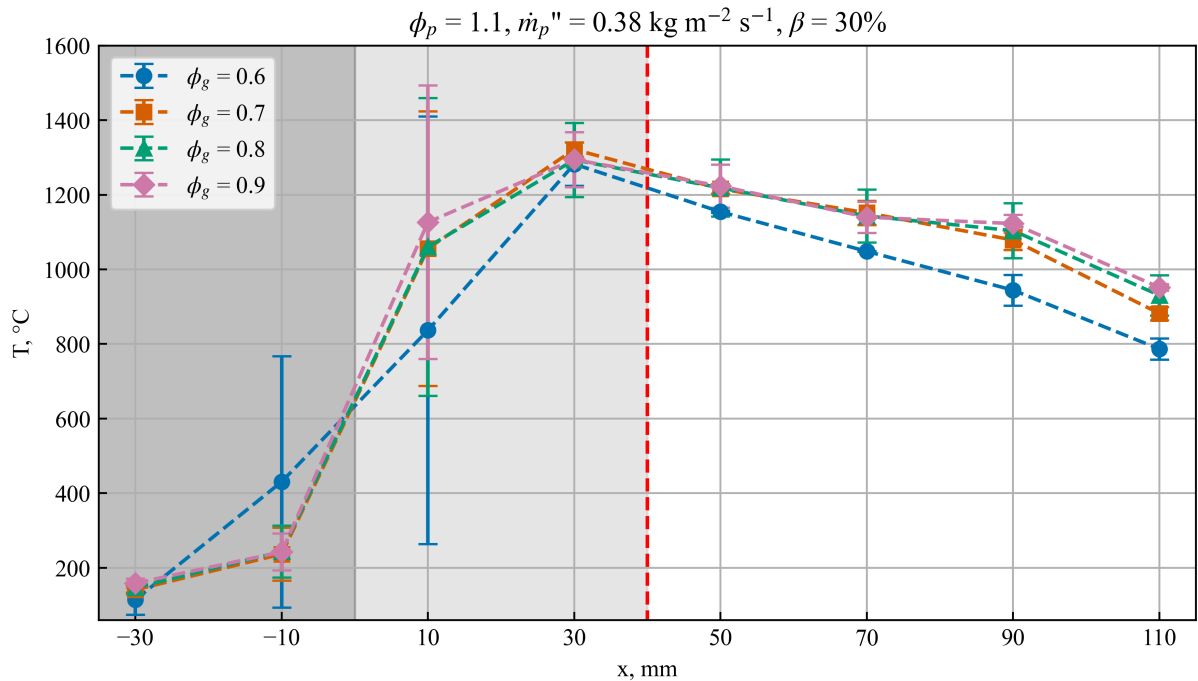


Figura 17: Perfil de Temperaturas para distintos valores de ϕ_g . Valores fijos $\phi_p = 1.1$, $\dot{m}_p'' = 0.38 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Se hizo la misma comparación pero con una relación de equivalencia primaria y *mass flux* primario diferente (Figura 18). En este caso, existen variaciones significativas entre los distintos valores de ϕ_g , de hasta un 8.52 % entre las temperaturas alcanzadas en TC5 por $\phi_g = 0.9$ y $\phi_g = 1$. También se observa una disminución en las temperaturas alcanzadas en todas las termocuplas, debido a que un menor $\dot{m}_p''$ implica una menor potencia, haciendo que los peaks de temperatura bajen considerablemente (entre los 1132 °C y 1229 °C, muy por debajo de los 1300-1400 °C obtenidos con mayores *mass flux* primarios). En el caso de $\phi_g = 1$, se observa que la diferencia de temperatura entre TC6 y TC5 es menor que en los demás casos. En ambas figuras (17 y 18) las temperaturas más altas se alcanzan con un $\phi_g = 0.9$.

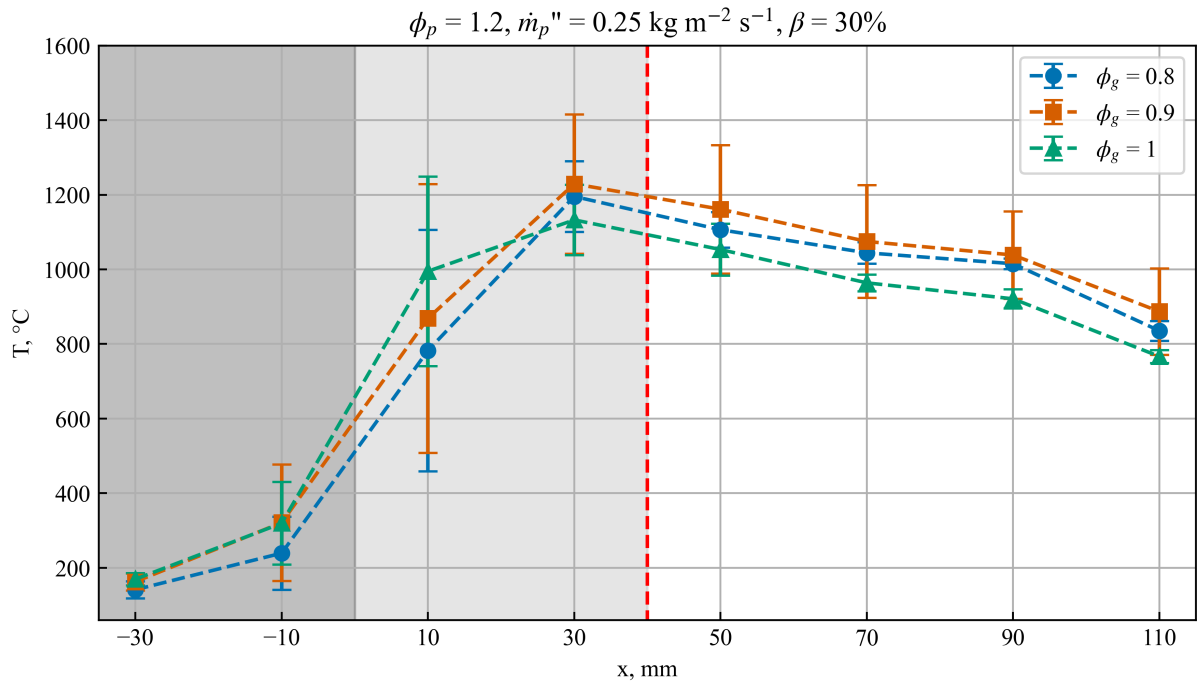


Figura 18: Perfil de Temperaturas para distintos valores de ϕ_g . Valores fijos $\phi_p = 1.2$, $\dot{m}''_p = 0.25 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Para analizar el efecto del $\dot{m}''_p$ en las temperaturas alcanzadas, se realizaron ensayos variando ese parámetro y manteniendo un $\phi_g = 0.8$. Las figuras 19 y 20 muestran los resultados para $\phi_p = 1.2$ y $\phi_p = 1.1$ respectivamente. En ambos grupos, se observa que un mayor $\dot{m}''_p$ incrementa la potencia y eleva las temperaturas en todo el núcleo del quemador, con un incremento del 20.89 % entre $\dot{m}''_p = 0.25$ y $\dot{m}''_p = 0.42$ para $\phi_p = 1.2$, y de 10 % aproximadamente entre $\dot{m}''_p = 0.38$ y $\dot{m}''_p = 0.5$ para $\phi_p = 1.1$. Algo a notar es que en $\phi_p = 1.1$, al pasar de $\dot{m}''_p = 0.42$ a $\dot{m}''_p = 0.5$ ocurre un aumento de solo el 1.8 %, mientras que en todos los “saltos” anteriores el aumento era de entre un 8-10 %. Esto indica que hay una relación directa entre el $\dot{m}''_p$ y las temperaturas alcanzadas, sin embargo, a medida que el $\dot{m}''_p$ se eleva a valores muy altos, el incremento porcentual de la temperatura máxima se desacelera. Al igual que como se pudo apreciar en la figura 16, las temperaturas en $\phi_p = 1.2$ son mayores que en $\phi_p = 1.1$, siendo notorio al observar que las temperaturas alcanzadas en los ensayos con $\phi_p = 1.2$ y $\dot{m}''_p = 0.42$ son mayores incluso que las alcanzadas con $\dot{m}''_p = 0.5$ y $\phi_p = 1.1$ (Tabla 4), lo que supondría que el ϕ_p es más determinante incluso que el *mass flux* primario en las temperaturas alcanzadas por el quemador.

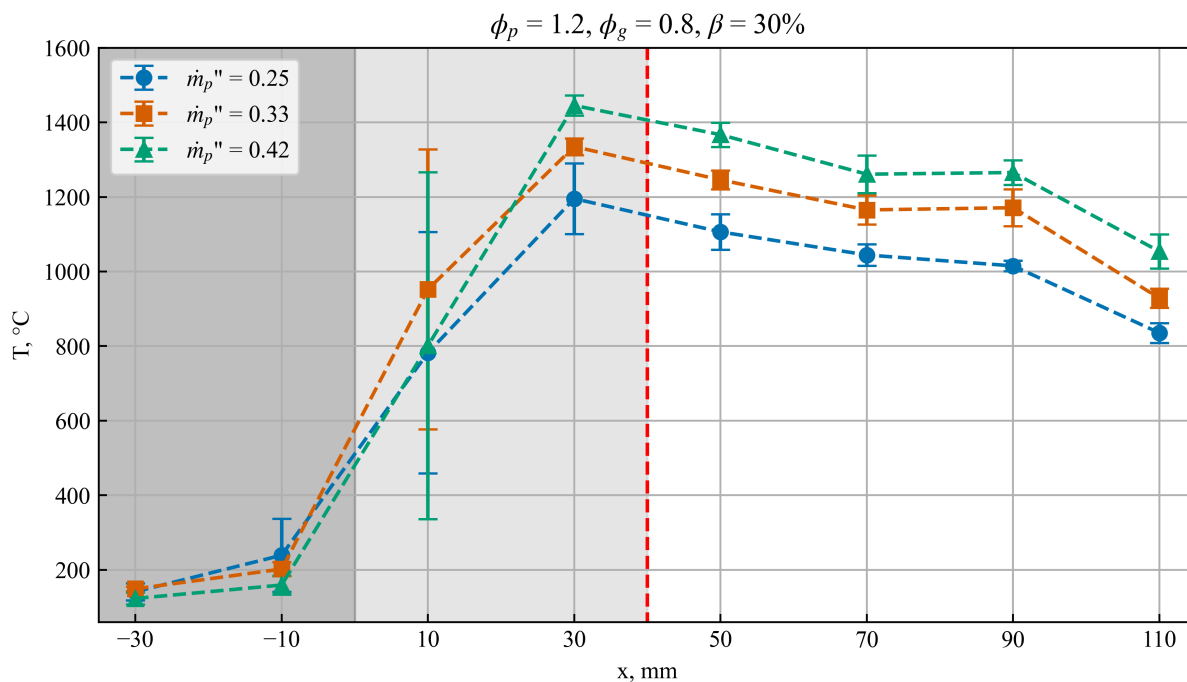


Figura 19: Perfil de Temperaturas para distintos valores de $\dot{m}_p''$. Valores fijos $\phi_p = 1.2$, $\phi_g = 0.8$

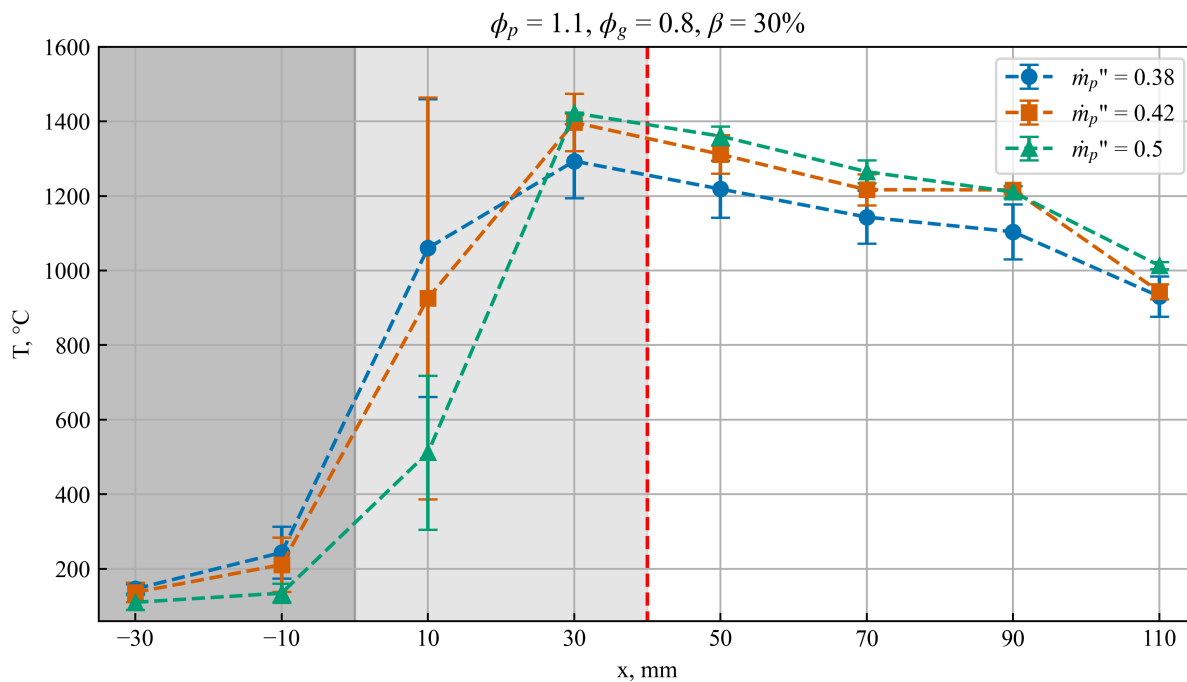


Figura 20: Perfil de Temperaturas para distintos valores de $\dot{m}_p''$. Valores fijos $\phi_p = 1.1$, $\phi_g = 0.8$

Tabla 4: Temperaturas promedio registradas para $\phi_p = 1.2, \dot{m}''_p = 0.42$ (Figura 19) y $\phi_p = 1.1, \dot{m}''_p = 0.5$ (Figura 20).

	TC8	TC7	TC6	TC5	TC4	TC3	TC2	TC1
$\phi_p = 1.2, \dot{m}''_p = 0.42$	123.5	159.5	801.2	1445.2	1366.9	1261	1265.4	1053.87
$\phi_p = 1.1, \dot{m}''_p = 0.5$	110.5	135.1	511.9	1422.3	1360.3	1264.9	1210.3	1013.2

4.2.2. Mezclas con $\beta = 15\%$

Al disminuir la proporción de H_2 en la mezcla, se observa una disminución significativa en las temperaturas, principalmente en la zona secundaria de combustión (Figuras 21 y 22). En cuanto al peak de temperatura, el caso con $\dot{m}''_p = 0.15, \beta = 15\%$ alcanzó los $1198.74\text{ }^\circ\text{C}$, muy similares a los $1195.42\text{ }^\circ\text{C}$ alcanzados con $\dot{m}''_p = 0.25, \beta = 30\%$ (Tabla 5), por lo que ni la disminución en el $\dot{m}''_p$ ni la variación en la proporción de la mezcla de combustible influyeron en el valor máximo de temperatura alcanzado. Otro detalle a considerar, es que para los casos en que se utiliza 15% de H_2 , la diferencia de temperatura entre el peak de temperatura y la última termocupla aguas abajo es entre 500 y $600\text{ }^\circ\text{C}$, mientras que en casos con 30% de H_2 la diferencia es de entre 340 y $410\text{ }^\circ\text{C}$.

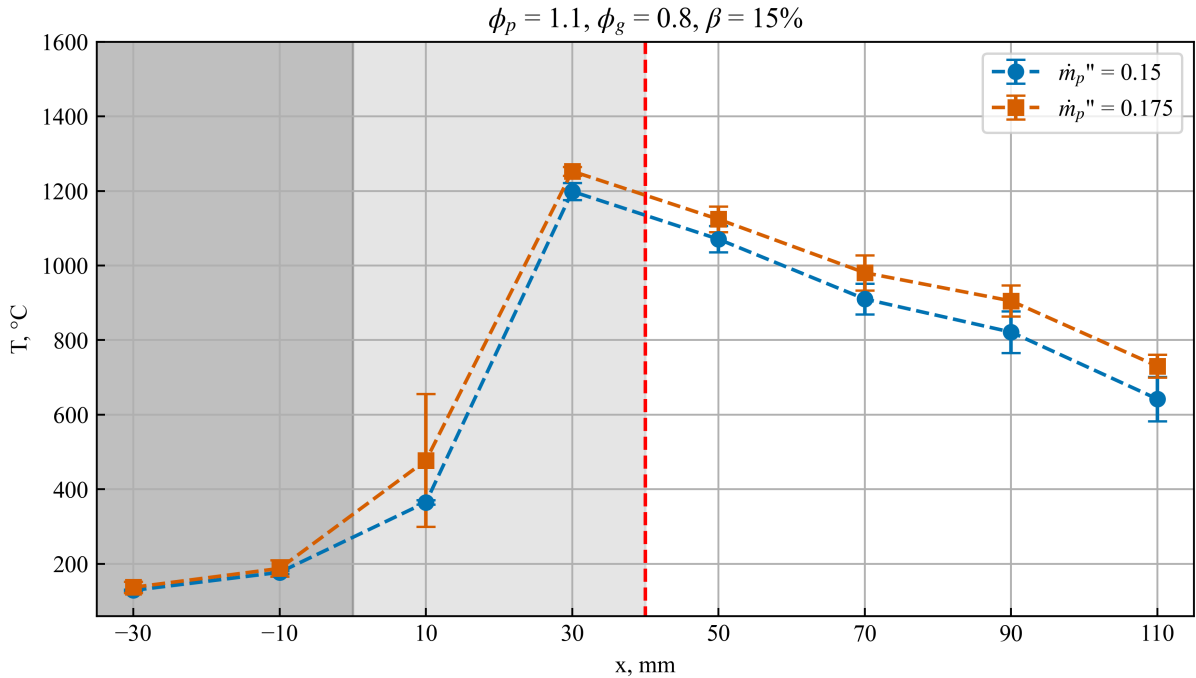


Figura 21: Perfil de Temperaturas para distintos valores de $\dot{m}''_p$. Valores fijos $\phi_p = 1.1, \phi_g = 0.8, \beta = 15\%$

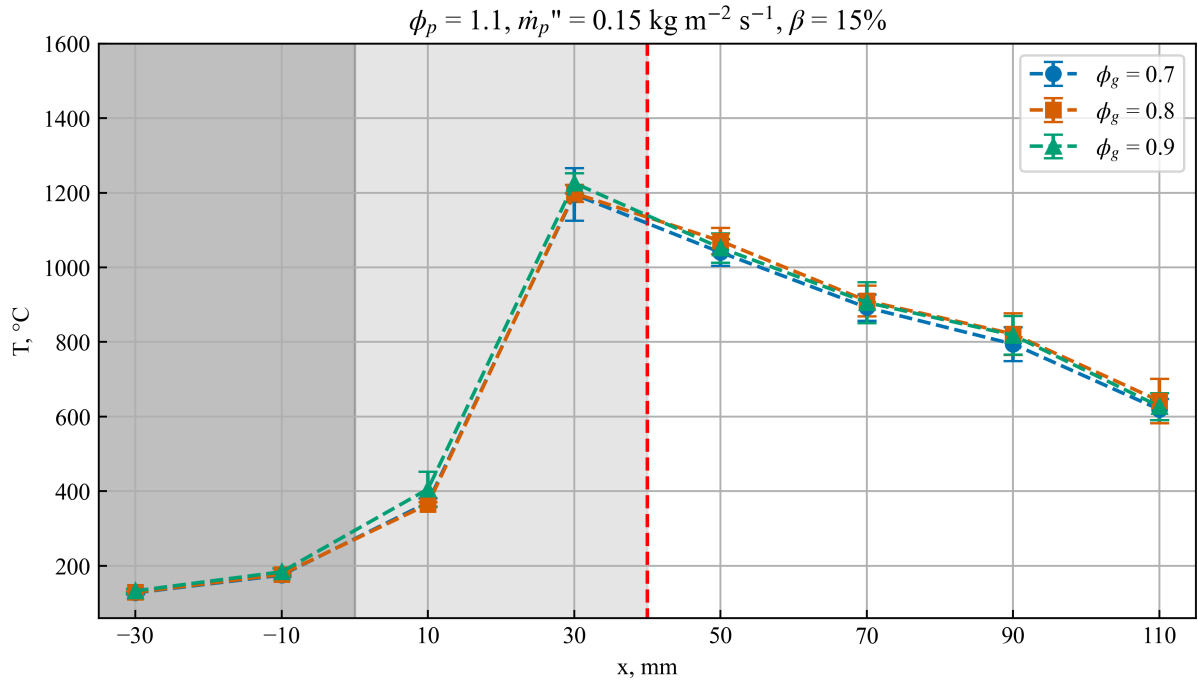


Figura 22: Perfil de Temperaturas para distintos valores de ϕ_g . Valores fijos $\phi_p = 1.1$, $\dot{m}_p'' = 0.15 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $\beta = 15\%$

Tabla 5: Temperaturas promedio registradas para $\phi_p = 1.2, \dot{m}_p'' = 0.25, \beta = 30\%$ (Figura 19) y $\phi_p = 1.1, \dot{m}_p'' = 0.15, \beta = 15\%$ (Figura 21).

	TC8	TC7	TC6	TC5	TC4	TC3	TC2	TC1
$\phi_p = 1.2, \dot{m}_p'' = 0.25$	141.4	239.3	782.6	1195.4	1106.2	1044.4	1015.1	835.5
$\phi_p = 1.1, \dot{m}_p'' = 0.15$	129.1	177.5	365.2	1198.7	1070.6	910.2	821.5	642.1

Podría concluirse que aumentar la proporción de NH_3 en la mezcla no afecta tanto el peak de temperatura alcanzado en TC5, sin embargo, provoca una disminución significativa en las temperaturas alcanzadas aguas abajo. Una posible explicación es que el hidrógeno, al tener una reactividad y velocidad de llama muy altas, se consume casi en su totalidad en la primera etapa de combustión, elevando la temperatura máxima a niveles comparables con los alcanzados en mezclas con una menor proporción de NH_3 y un mayor *mass flux* primario. En la segunda etapa, el combustible restante sería casi exclusivamente NH_3 no quemado en la primera etapa, por lo que la reacción decae abruptamente debido a la baja reactividad del NH_3 , enfriando la matriz porosa en la zona.

4.3. Emisiones de NO_x y NH_3 no quemado

Las mediciones de NO_x y NH_3 no quemado fueron realizadas con el detector de amoníaco de la figura 11 y el analizador de gases testo 350 (Figura 10). Una vez recopiladas las mediciones en ppm, estas fueron corregidas a una concentración de 15 % de O_2 en base seca, utilizando la siguiente fórmula:

$$ppm(dry, 15 \%O_2) = ppm * \frac{20.9 - 15}{20.9 - \%O_2} \quad (5)$$

Siendo $\%O_2$ valor medido por el analizador testo 350.

4.3.1. Mezclas con $\beta = 30 \%$

Las figuras 23 y 24 muestran los niveles de emisión de NO_x y NH_3 en función de la relación de equivalencia global. A simple vista, puede notarse que al aumentar el ϕ_g (disminuyendo el flujo de aire secundario), en el rango entre 0.6 y 0.9, se reducen las emisiones de ambos compuestos, aproximadamente en un 44 % para los NO_x y un 40.5 % para el NH_3 . Al sobrepasar el rango de $\phi_g = 0.9$, las emisiones de NO_x mantienen su tendencia descendente, sin embargo, se disparan las emisiones de NH_3 no quemado hasta las 314.9 ppm, lo cual supone un aumento del 76 % respecto a lo alcanzado con $\phi_g = 0.9$. Esto evidencia que la falta de oxidante en la zona secundaria no permite que el NH_3 se combustione completamente.

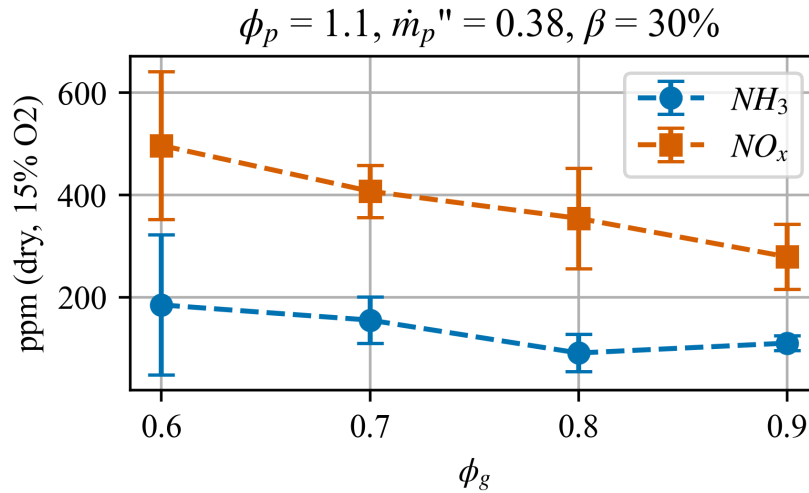


Figura 23: Emisiones de NH_3 y NO_x en función del ϕ_g . Valores fijos $\phi_p = 1.1$, $\dot{m}_p'' = 0.38$ $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$.

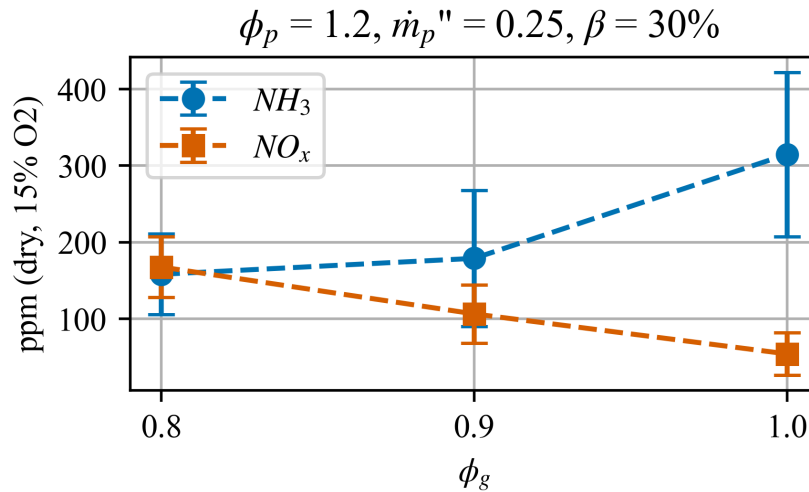


Figura 24: Emisiones de NH_3 y NO_x en función del ϕ_g . Valores fijos $\phi_p = 1.2$, $\dot{m}_p'' = 0.25$ $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$.

Las figuras 25, 26 y 27 muestran la variación en las emisiones en función del $\dot{m}_p''$, para distintas configuraciones de ϕ_p y manteniendo fijo el valor de $\phi_g = 0.8$. Al analizar en conjunto los resultados, se observa que los niveles de emisión tienden a mantenerse estables en la mayoría de casos. Sin embargo, al operar con un $\phi_p = 1.2$, se observa un aumento sostenido en las emisiones de NO_x al sobrepasar $\dot{m}_p'' = 0.33\ kg\ m^{-2}\ s^{-1}$, acompañado de una mayor dispersión en $\dot{m}_p'' = 0.42\ kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ (Figuras 25 y 27(a)). Específicamente, un aumento del 49.33 % entre $\dot{m}_p'' = 0.33\ kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ y $\dot{m}_p'' = 0.42\ kg\ m^{-2}\ s^{-1}$.

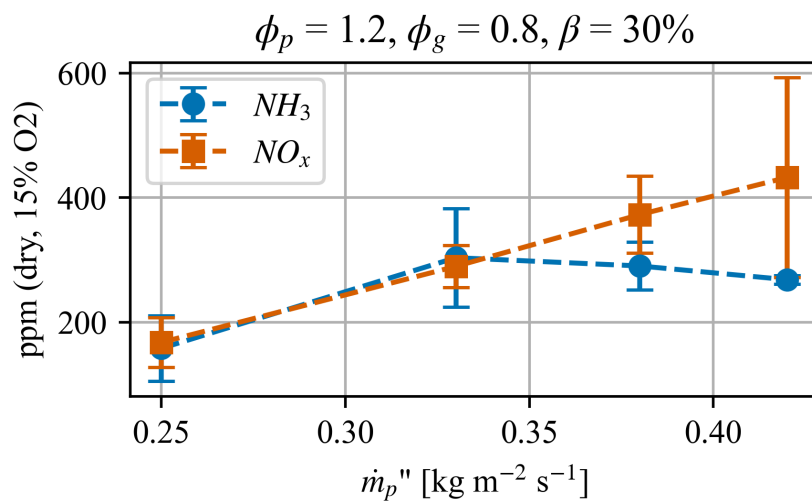


Figura 25: Emisiones de NH_3 y NO_x en función del $\dot{m}_p''$. Valores fijos $\phi_p = 1.2$, $\phi_g = 0.8$.

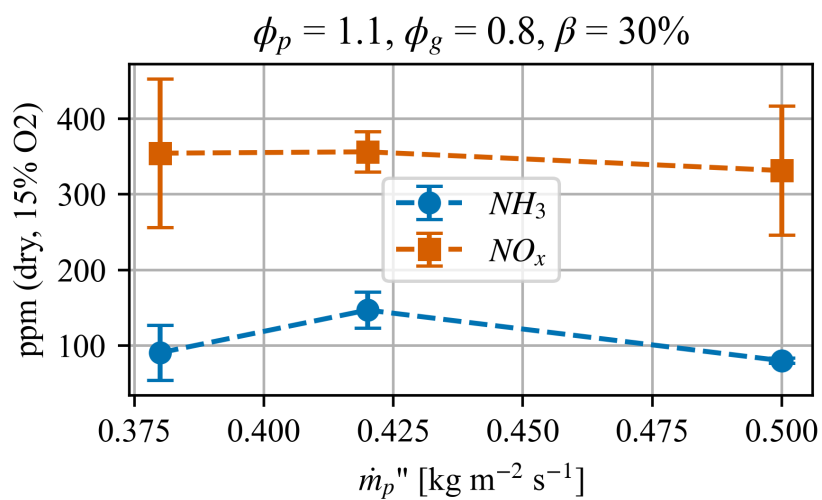


Figura 26: Emisiones de NH_3 y NO_x en función del $\dot{m}_p''$. Valores fijos $\phi_p = 1.1$, $\phi_g = 0.8$.

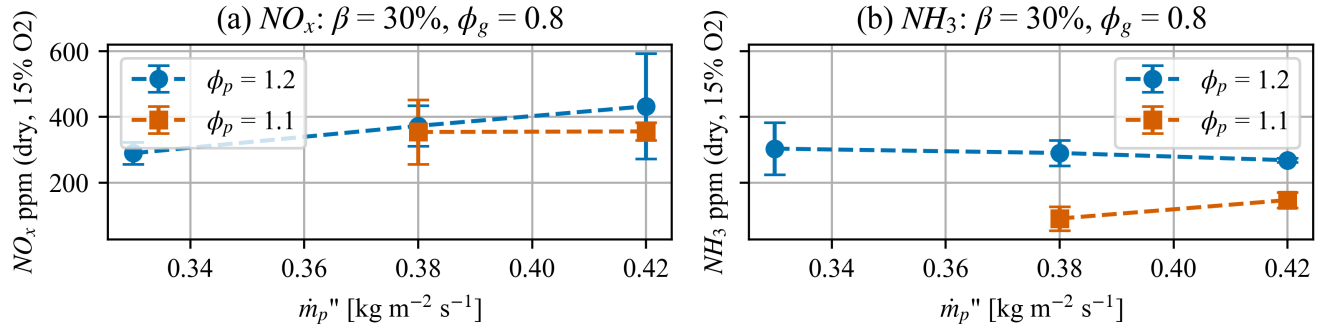


Figura 27: (a) Emisiones de NO_x en función del $\dot{m}_p''$. (b) Emisiones de NH_3 en función del $\dot{m}_p''$. Valor fijo $\phi_g = 0.8$

4.3.2. Mezclas con $\beta = 15\%$

Al aumentar la proporción de NH_3 en la mezcla, se observa que las emisiones de NH_3 no quemado son mucho mayores en general, superando las emisiones de NO_x , lo cual contrasta con las mezclas con $\beta = 30\%$, donde ocurría lo contrario. En condiciones de relación de mezcla global más pobre ($\phi_g = 0.7$), las emisiones de NH_3 superan las 640 ppm, mientras que en la condición de referencia ($\phi_g = 0.8$) llegan a 469 ppm (Figura 28), superando en casi 154 ppm el caso con mayores emisiones de NH_3 registrado con $\beta = 30\%$ (Figura 24).

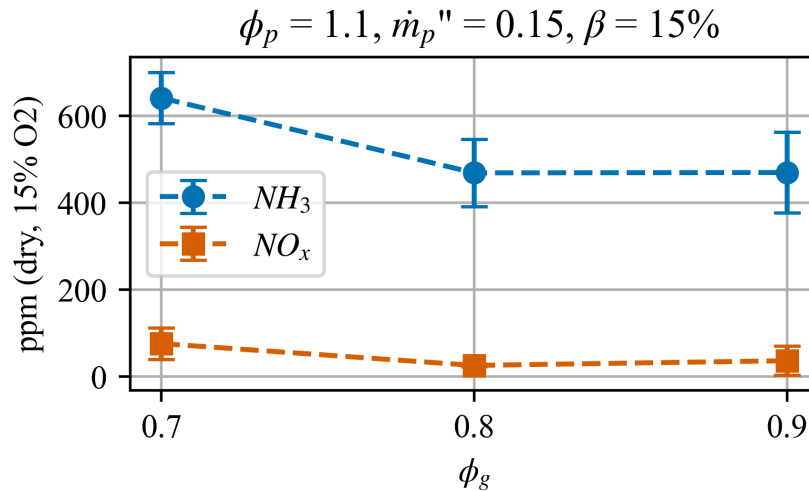


Figura 28: Emisiones de NH_3 y NO_x en función del ϕ_g . Valores fijos $\phi_p = 1.1$, $\dot{m}_p'' = 0.15$ kg m⁻² s⁻¹.

Al observar el efecto del *mass flux* primario en las emisiones (Figura 29), ocurre un

descenso de un 60.14 % en las emisiones de NH_3 no quemado al pasar de $\dot{m}''_p = 0.15 \text{ kg } m^{-2} s^{-1}$ a $\dot{m}''_p = 0.175 \text{ kg } m^{-2} s^{-1}$, acompañado de un incremento en las emisiones de NO_x , que pasan de 26 a 70 ppm aproximadamente.

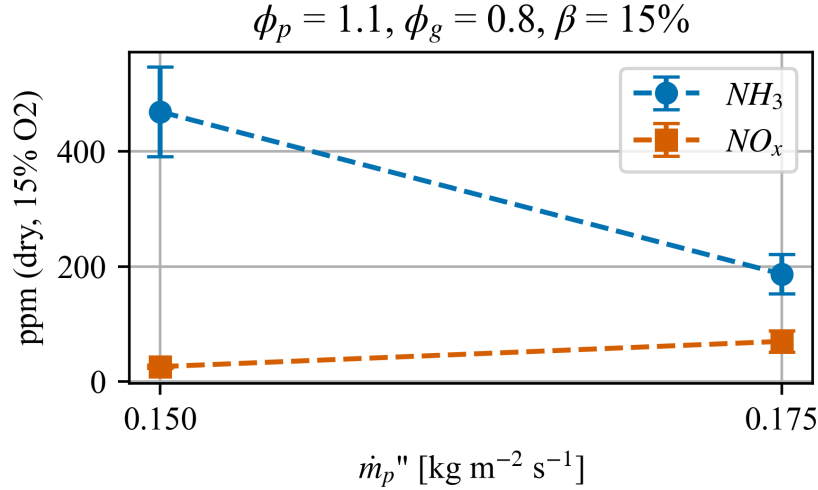


Figura 29: Emisiones de NH_3 y NO_x en función del $\dot{m}''_p$. Valores fijos $\phi_p = 1.1$, $\phi_g = 0.8$.

4.3.3. Comparación de resultados

Se realizó una comparación entre las emisiones de este estudio y los resultados reportados por Vignat et al.(2024) [14]. Para ello, se graficaron emisiones de NH_3 en función de las emisiones de NO_x , de la misma forma que en la Figura 6 (c).

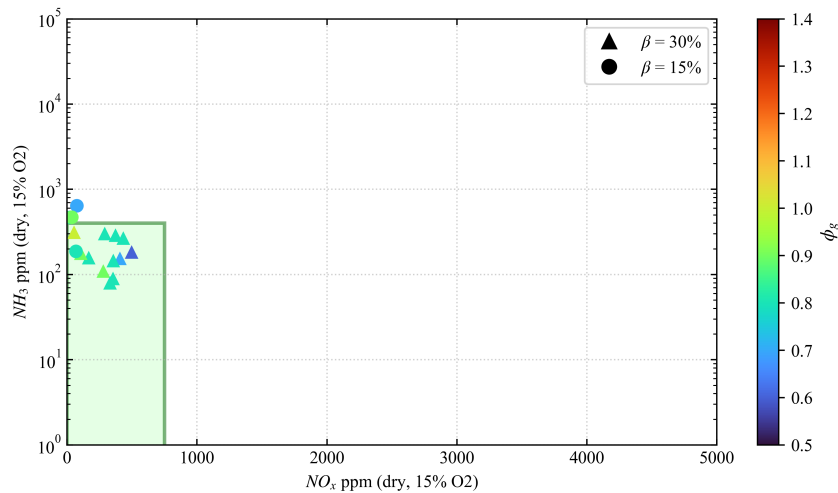


Figura 30: Emisiones de NH_3 en función de las emisiones de NO_x .

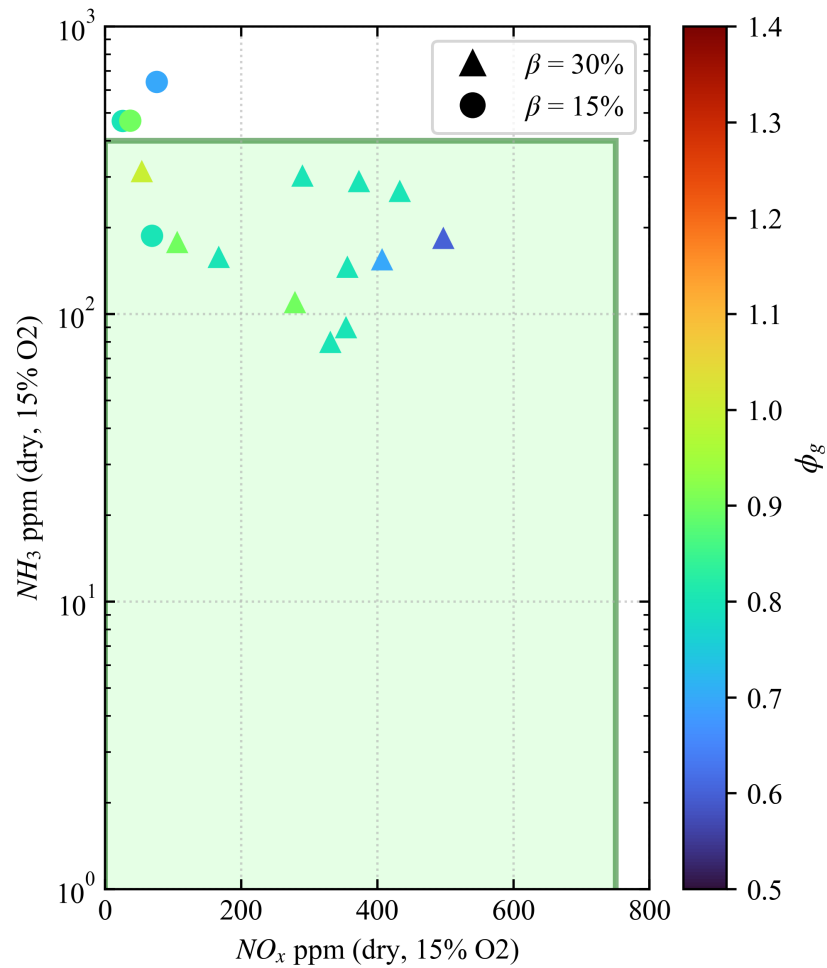


Figura 31: Detalle de la Figura 30.

Se observa que la mayoría de los ensayos realizados en el quemador de dos etapas del presente estudio se encuentran dentro del rectángulo utilizado por Vignat para delimitar las emisiones de su quemador de dos etapas. La región comprende emisiones de hasta 750 ppm de NO_x y hasta 400 ppm de NH_3 no quemado.

Sin embargo, a diferencia del estudio de referencia, en el presente trabajo todos los ensayos se concentran en la parte superior del rectángulo, independientemente de la configuración de ϕ_g utilizada, lo que indica que las emisiones de NH_3 fueron, en general, más altas. Además, hubo tres ensayos que sobrepasaron el límite de 400 ppm de NH_3 , todos correspondientes a mezclas con $\beta = 15\%$.

Capítulo 5

Conclusiones

En el presente estudio se realizó la caracterización de un quemador de medio poroso inerte de dos etapas, ejecutando pruebas en donde se modificaron parámetros como el ϕ_p en el rango entre 1.1 y 1.2, ϕ_g entre 0.6 y 1, y $\dot{m}''_p$ entre 0.15 kg m^{-2} y 0.5 kg m^{-2} .

Se revisó el estado del arte asociado a la combustión en medios porosos utilizando hidrógeno y amoníaco como combustibles, concluyendo que la inclusión de H_2 en la mezcla permite ampliar el rango operativo y favorecer la estabilidad de llama en comparación con utilizar únicamente NH_3 como combustible. Además, la inclusión de la segunda etapa de quemado reduce significativamente las emisiones de NO_x y NH_3 no quemado.

Se determinó un rango de operación estable entre 0.25 kg m^{-2} y 0.42 kg m^{-2} de $\dot{m}''_p$ para $\phi_p = 1.2$ y entre 0.38 kg m^{-2} y 0.5 kg m^{-2} para $\phi_p = 1.1$, en mezclas con $\beta = 30\%$. Al disminuir el porcentaje de hidrógeno a $\beta = 15\%$, el rango de operación se limitó a una pequeña ventana entre 0.15 kg m^{-2} y 0.175 kg m^{-2} para $\phi_p = 1.1$.

Respecto a la influencia del ϕ_g , al incrementar la relación de equivalencia en el rango entre 0.6 y 0.9 se redujeron las emisiones tanto de NO_x como de NH_3 . Además, produjo un aumento general en las temperaturas. Al superar $\phi_g = 0.9$ aumentaron considerablemente las emisiones de NH_3 , mientras que los NO_x continuaron descendiendo.

Se encontró que las condiciones más favorables de operación para mezclas con $\beta = 30\%$ es con $\phi_p = 1.2$ y $\phi_g = 0.9$, ya que combina mayores temperaturas y menores emisiones en general.

Finalmente, se concluyó que la inyección de aire secundario mejora el desempeño térmico, al aumentar las temperaturas a lo largo del quemador, siempre y cuando el régimen de operación sea globalmente pobre.

Bibliografía

- [1] UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change, *El acuerdo de París*, Recuperado 3 de diciembre de 2025. dirección: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>.
- [2] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, *Transición Energética de Chile - Política Energética Nacional: Actualización 2022*, Carlos Barría, 2022.
- [3] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile - Unidad Gestión de Información División Energías Sostenibles, “Identificación y Cuantificación de Potenciales de Energías Renovables 2021 Chile Continental,” Ministerio de Energía, inf. téc., 2021.
- [4] M. A. Mujeebu, M. Z. Abdullah, M. Z. Abu Bakar, A. A. Mohamad, R. M. N. Muhad y M. K. Abdullah, “Combustion in Porous Media and Its Applications – A Comprehensive Survey,” *Journal of Environmental Management*, vol. 90, 2009, ISSN: 0301-4797. DOI: 10.1016/j.jenvman.2008.10.009.
- [5] M. A. Habib, G. A. Q. Abdulrahman, A. B. S. Alquaity y N. A. A. Qasem, “Hydrogen Combustion, Production, and Applications: A Review,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 100, págs. 182-207, 2024. DOI: 10.1016/j.aej.2024.05.030.
- [6] A. R. Barron, *Chemistry of the Main Group Elements*. Midas Green Innovations, 2020.
- [7] A. Campari, F. Ustolin, A. Alvaro y N. Paltrinieri, “A Review on Hydrogen Embrittlement and Risk-Based Inspection of Hydrogen Technologies,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, n.º 90, págs. 35 316-35 346, 2023. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.293.
- [8] A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, W. I. F. David y P. J. Bowen, “Ammonia for Power,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 69, págs. 63-102, 2018. DOI: 10.1016/j.pecs.2018.07.001.

- [9] G. Vignat, B. Akoush, E. R. Toro et al., “Combustion of Lean Ammonia-Hydrogen Fuel Blends in a Porous Media Burner,” *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023. DOI: 10.1016/j.proci.2022.07.054. dirección: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.07.054>.
- [10] V. Bubnovich, M. Toledo, L. Henríquez, C. Rosas y J. Romero, “Flame stabilization between two beds of alumina balls in a porous burner,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, n.º 2, págs. 92-95, 2010, ISSN: 1359-4311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.04.001>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431109001100>.
- [11] F. J. Weinberg, “Combustion Temperatures: The Future?” *Nature*, vol. 233, n.º 5317, págs. 239-241, 1971. DOI: 10.1038/233239a0. dirección: <https://doi.org/10.1038/233239a0>.
- [12] J. L. Schurr, A. Bhattacharya, A. A. Konnov y O. Kaario, “Super adiabatic combustion of carbon-free and carbon-containing fuels,” *Combustion and Flame*, vol. 276, pág. 114106, 2025, ISSN: 0010-2180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2025.114106>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218025001440>.
- [13] Z. Al-Hamamre y A. Al-Zoubi, “The use of inert porous media based reactors for hydrogen production,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, n.º 5, págs. 1971-1986, 2010, ISSN: 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.079>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319909018497>.
- [14] G. Vignat, T. Zirwes, É. Boigné y M. Ihme, “Experimental demonstration of a two-stage porous media burner for low-emission ammonia combustion,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 40, n.º 1, pág. 105491, 2024, ISSN: 1540-7489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2024.105491>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1540748924002992>.
- [15] S. Silva, “Investigación experimental del proceso de combustión de amoníaco-hidrógeno-metano en reactor de medio poroso inerte de dos etapas de quemado.,” Tesis de Ingeniería Civil Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, 2025.
- [16] P. Palies, “2 - Premixed combustion for combustors,” en *Stabilization and Dynamic of Premixed Swirling Flames*, Academic Press, 2020, págs. 57-103, ISBN: 978-0-12-819996-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819996-1>

1.00010-X. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012819996100010X>.