UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Estudio experimental de la combustión de amoniaco sumergida en un medio poroso inerte

Ricardo Esteban Nájera Giraldo

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Modalidad de Práctica

Trabajo de Grado

Asesor

Andrés Adolfo Amell Arrieta, Magíster (MSc) Economía Energética

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
1803

Cita	Nájera Ricardo [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] R. Nájera Giraldo, “Estudio experimental de la combustión de amoniaco en un medio poroso inerte”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2025



Grupo de Investigación. Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía (GASURE)

Sede de Investigación Universitaria (SIU).

Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento al Grupo de Investigación GASURE por la financiación otorgada y por brindarme el espacio y los recursos necesarios para llevar a cabo este trabajo. Agradezco también el acompañamiento de los integrantes del grupo GASURE, cuyo apoyo y colaboración fueron fundamentales durante el desarrollo de esta investigación.

Extiendo un agradecimiento especial al profesor Andrés Amell por su orientación y asesoría a lo largo del proceso. Su experiencia y disposición fueron clave para superar los retos que surgieron en el camino.

Finalmente, agradezco profundamente a Linda por su apoyo incondicional durante la realización de este trabajo. Su compañía, ánimo y comprensión marcaron una diferencia significativa en cada etapa del proceso. Este logro también es tuyo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 11

ABSTRACT 12

1. INTRODUCCIÓN 13

2. OBJETIVOS 16

3. MARCO TEÓRICO 17

3.1. La combustión y sus propiedades. 17

3.2. Amoniaco como combustible. 18

3.2.1. Propiedades de combustión. 18

3.2.2. Compatibilidad de materiales. 23

3.2.3. Aspectos de seguridad. 27

3.2.4. Usos del amoniaco como combustible 28

3.2.4.1. Hornos y calderas 29

3.2.4.2. Motores de combustión interna 34

3.2.4.3. Turbinas de gas. 36

3.2. Combustión en medios porosos inertes. 42

3.3.1 Combustión de amoniaco en medios porosos inertes 52

4. METODOLOGÍA 57

4.1. Estimación teórica de algunas propiedades de combustión del amoniaco. 57

4.2. Metodología experimental 59

4.2.1. Calibración de rotámetro para amoniaco 59

4.2.2. Combustión de amoniaco sumergida en un medio poroso inerte. 61

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS 67

5.1. Estimaciones teóricas de propiedades de combustión del amoniaco. 67

5.2. Resultados experimentales. 69

5.2.1. Calibración de rotámetro. 69
5.2.2. Combustión de amoniaco sumergida en un medio poroso inerte 70
5.2.2.1. Identificación de puntos de combustión sumergida 70
5.2.2.2. Perfiles de temperatura. 74
5.2.2.3. Intensidad de radiación emitida y eficiencia de radiación. 74
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 76
REFERENCIAS 79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del amoniaco, hidrógeno, metano y propano. [5] [15] [16] [18] [20] [22] [23] [24] [25] [26] [27] 23
Tabla 2. Compatibilidad del amoniaco con diferentes materiales. A: Excelente; B: Bueno, efectos menores; C: Efectos moderados, no recomendado para uso continuo; D: No recomendado, daños severos. [6] 26
Tabla 3. Lista de sustancias que reaccionan de forma peligrosa con el amoniaco según la NFPA. [28] 27
Tabla 4. Efectos sobre la salud ocasionados por la exposición a diferentes concentraciones de amoniaco en el aire.[6] 28
Tabla 5. Emisiones de NH3 y H2 generadas en las pruebas realizadas por S Gill (2012) [39]. 35
Tabla 6. Flujo de combustibles en cada una de las mezclas usadas por Kenanoglu et al [43] 38
Tabla 7. Diseño de experimentos 66
Tabla 8. Propiedades de combustión calculadas siguiendo la metodología propuesta. 69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Densidad volumétrica y gravimétrica de H2 en portadores de hidrógeno. [5] 14
Figura 2. Aparato experimental utilizado por A. Hayakawa et al. (2015) [17] 19
Figura 3. Resultados experimentales de velocidad de deflagración en función del dosado relativo, obtenidos por Hayakawa et al (2015) [17] 19
Figura 4. Montaje experimental para la medición de la energía mínima de ignición y la distancia crítica de enfriamiento entre placas paralelas. [18] 20
Figura 5. Propagación de la llama en placas paralelas (a) verticales (b) horizontales usados en los experimentos realizados por K. Takizawa et al. [18] 21
Figura 6. Montaje experimental a) para medición de energía mínima de ignición b) para toma de imágenes Schlieren, utilizado por Zongjie Hu et al [21] 22
Figura 7. Fotografías Schlieren obtenidas por Zongjie Hu et al (2024) para la ignición del amoniaco [21] 22
Figura 8. Micrografías de los aceros SACM645 y SUS304 expuestos a una llama de amoniaco a 550°C durante 5 horas, a diferentes distancias del centro de la llama. [29] 25
Figura 9. Tecnología de oxidación estequiométrica controlada desarrollada por la compañía Duiker [32] 30
Figura 10. Resultados experimentales obtenidos por Murai et al [34] 31
Figura 11. Esquema del funcionamiento del horno desarrollado por la empresa IHI [35] 32
Figura 12. Vista ampliada del quemador de co-combustión de carbón y amoniaco usado por la empresa IHI [35]. 33
Figura 13. Reemplazo en Diesel y reducción de emisiones obtenidas por S. Gill (2012) con a) 3 bar IMEP y b) 5 bar IMEP.[39] 34
Figura 14. Eficiencia térmica al freno obtenida por S Gill (2012) con a) 3 bar IMEP y b) 5 bar IMEP [39]. 35
Figura 15. Esquema de funcionamiento del sistema de suministro de combustible del motor de dos tiempos desarrollado por MAN Energy Solutions para la industria del transporte marítimo.[40] 36
Figura 16. Emisiones promedio de NO, NH3 y H2 en a) quemador de flujo en espiral sin entrada de aire secundario, b) quemador de flujo en espiral con entrada de aire secundario.[42] 37

Figura 17. Efecto de la adición de aire secundario en la cámara de combustión: a) concentración de OH en la cámara de combustión sin aire secundario, con Φ_{pri} = 1.25 y P_0 = 0.5 MPa. b) concentración de OH en la cámara de combustión con aire secundario, con Φ_{pri} = 1.2 y P_0 = 0.5 MPa. [42].....37
Figura 18. Diagrama del sistema electrolizador y turbina utilizado por Kenanoglu et al [43] 38
Figura 19. Resultados obtenidos en las pruebas realizadas por Kenanoglu et al: a) emisiones de NOx, b) potencia al freno y c) eficiencia térmica, para diferentes velocidades de rotación [43] ..39
Figura 20. Instalación utilizada en las pruebas realizadas por Kurata et al (2017): a) diagrama de la instalación, b) fotografía de la instalación[44].....40
Figura 21. Prototipo de la cámara de combustión para la operación con amoniaco: a) esquema del prototipo, b) fotografía del quemador en vista lateral, c) fotografía del swirler y puertos de inyección de amoniaco y keroseno.....40
Figura 22. Desempeño de la turbina operando a diferentes potencias: a) concentración de emisiones con mezcla NH3/CH4, b) eficiencia de combustión y c) eficiencia térmica de la turbina operando con NH3-aire, NH3-CH4-aire y CH4-aire [44]. 41
Figura 23. Combustión en medio poroso inerte. a) Estabilizado en la superficie [11]. b) Combustión sumergida [13].....43
Figura 24. Esquemático del quemador de medio poroso inerte de aire inducido empleado por Iral et al [13] 44
Figura 25. Montaje experimental empleado por Iral et al para determinar la eficiencia térmica, emisiones contaminantes, tasa de aireación primaria y la caída de presión a lo largo del medio poroso. [13] 45
Figura 26. Montaje experimental para medir la eficiencia de radiación utilizado por Iral et al [13] 46
Figura 27. Montaje experimental empleado por Arrieta C et al. [12] y sus componentes: a) rotámetros, b) mezclador de gases, c) mezcla aire-combustible, d) quemador, e) termocuplas, f) medio poroso, g) probeta refrigerada, h) productos de combustión, i) imagen del quemador y j) manta aislante. 48
Figura 28. Diagrama de estabilidad presentado por Arrieta C et al [12]. FL: Retrollama. BL: Desprendimiento. NG: gas natural. 50SG1, 50SG2, 50SG3: mezclas con 50% gas natural y 50% gas de síntesis con relaciones de H_2/CO de 1.5, 2 y 3 respectivamente.....49

Figura 29. Diagrama de estabilidad de llama respecto a la relación entre la velocidad de deflagración laminar y la velocidad del flujo presentado por Arrieta C et al [12].....50
Figura 30. Propagación y estabilización de la llama sobre la superficie de un medio poroso [12]51
Figura 31. Diagrama del montaje experimental y cámara de combustión empleados por Nozari H et al [48] 53
Figura 32. Temperaturas adiabáticas, experimentales y numéricas respecto a la razón de equivalencia para mezclas con a) 70% NH_3 y b) 80% NH_3 reportadas por Nozari H et al [48]....54
Figura 33. Índices de temperatura respecto a la temperatura medida reportados por Nozari et al [10] 54
Figura 34. Eficiencias de combustión reportadas por Nozari H et al [48] 55
Figura 35. Diagramas de estabilidad (en rojo el límite para desprendimiento y en azul para retrollama) para a) 60% NH_3 y b) 70% NH_3 reportados por Nozari H et al [48].....56
Figura 36. Límite superior respecto a la velocidad de la mezcla normalizada a diferentes razones de equivalencia en mezclas con a) 60% NH_3 y b) 70% NH_3 [48] 57
Figura 37. Principio de funcionamiento el medidor de sello húmedo [49]. 60
Figura 38. a) Montaje empleado para la calibración del rotámetro de amoniaco. b) Llama de propano alrededor del puerto de descarga de amoniaco. c) Llama de amoniaco. 61
Figura 39. a) Partes del quemador de prueba y dimensiones de la cámara de combustión: b) vista superior y c) longitud de la cámara de combustión. Medidas en milímetros. Adaptado de [11]...62
Figura 40. Ubicación de los termopares en la cabeza del quemador. Medidas en milímetros. 64
Figura 41. Dimensiones del restrictor y ángulo de visión del radiómetro [51].....65
Figura 42. Montaje experimental empleado en este estudio. L=21.5 cm. 67
Figura 43. Curva de calibración del rotámetro para amoniaco. 70
Figura 44. Encendido del quemador en frío con a) 20% gas natural y Ø=0,6. b) 80% gas natural y Ø=0,8.....71
Figura 45. a) Curva de calentamiento al encender el quemador en frío con 35% de la potencia suministrada con H_2 y Ø= 0,55. b) quemador 5 min, c) 30 min y d) 60 min después de la ignición. 72
Figura 46. Rango de relaciones de equivalencia que producen combustión sumergida estable y la temperatura máxima registrada (T4) cuando se opera a 150 kW/m^2. 73
Figura 47. Perfiles de temperatura reportados. 74

Figura 48. Intensidad de radiación emitida por los gases de combustión. 75
Figura 49. Eficiencia de radiación y temperatura superficial vs relación de equivalencia. 76

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio del estado del arte del amoniaco, sus propiedades, usos, beneficios y desventajas. Como parte del estudio experimental se realizó la adecuación de la infraestructura disponible para la realización de los experimentos, entre las actividades realizadas se calibra un rotámetro empleando un medidor de flujo de sello húmedo. Además, se realiza una exploración de la combustión del amoniaco sumergida en un medio poroso inerte compuesto por una zona de precalentamiento conformada por un Honeycomb de alúmina con poros de 1 mm y una espuma cerámica de carburo de silicio con 10 poros por pulgada. Ambos medios porosos poseen un diámetro y espesor de 70 y 20 mm. Se realizan pruebas con diferentes mezclas de amoniaco con gas natural e hidrógeno y se reporta la estabilidad de la combustión. Se presenta también los perfiles de temperatura, intensidad de radiación de los gases de combustión y la eficiencia de radiación del medio poroso. Se encontró que se puede lograr combustión sumergida estable usando una mezcla de gas natural con 20% de la potencia especifica suplida con amoniaco cuando se opera el quemador a 150 kW/m2 y una relación de equivalencia de 0.8. O usando una mezcla que supla el 35% de la potencia con hidrógeno, en 150 kW/m2 y relación de equivalencia de 0.55. Cuando se opera con 100% amoniaco, la temperatura máxima, así como la intensidad de radiación emitida por los gases de combustión aumentan cuando se disminuye la relación de equivalencia.

Palabras clave — Amoniaco, combustión de premezcla, propiedades de combustión, medios porosos inertes, estabilidad de combustión, intensidad de radiación.

ABSTRACT

This work presents a study of the state of the art on ammonia, including its properties, uses, advantages, and disadvantages. As part of the experimental study, the available infrastructure was adapted for conducting the experiments. Among the activities carried out, a rotameter was calibrated using a wet test flow meter. Additionally, an exploration of ammonia combustion submerged in an inert porous medium was conducted. This medium consists of a preheating zone made up of an alumina honeycomb with 1 mm pores and a silicon carbide ceramic foam with 10 pores per inch. Both porous media have a diameter and thickness of 70 mm and 20 mm, respectively. Tests were carried out using different ammonia mixtures with natural gas and hydrogen, and the combustion stability was reported. Temperature profiles, radiation intensity of the combustion gases, and the radiative efficiency of the porous medium are also presented. It was found that stable submerged combustion can be achieved using a natural gas mixture where 20% of the specific power is supplied by ammonia when operating the burner at 150 kW/m² and an equivalence ratio of 0.8. Alternatively, stable combustion is also achieved using a mixture supplying 35% of the power with hydrogen, at 150 kW/m² and an equivalence ratio of 0.55. When operating with 100% ammonia, both the maximum temperature and the radiation intensity emitted by the combustion gases increase as the equivalence ratio decreases.

Keywords — Ammonia, premixed combustion, combustion properties, inert porous media, combustion stability, radiation intensity.

1. INTRODUCCIÓN

En el pliego de compromisos pactados durante la COP 28, de la cual Colombia es participe, se estableció la meta de triplicar la capacidad instalada de la generación de energía renovable al menos a 11000 GW para 2030, así como la duplicación de la tasa de aumento de eficiencia del 2% al 4% mundial para el mismo año [1]. Durante esta misma conferencia, Colombia, como el país número diez más dependiente de los combustibles fósiles, exhorta a los demás países a detener su explotación [2]. Esto nace de la inversión y el desarrollo impulsado en el país a través de la ruta del hidrógeno donde se apuesta por el crecimiento del mercado de los combustibles renovables [3].

Mediante la ley 2099 de 2021 se incentiva la inversión en toda la cadena de valor del hidrógeno verde y azul, además de sus derivados como el amoniaco. Este representa el 27% del consumo de hidrógeno en la actualidad, y se espera un crecimiento en su producción anual de un 1,5% correspondiente a la creciente demanda de fertilizantes producto del crecimiento demográfico [3]. Inicialmente el país se enfoca en la disminución de las importaciones de amoniaco para la producción de fertilizantes, mediante proyectos piloto como el propuesto desde la empresa Monómeros S.A., para la producción de 100.000 toneladas anuales de amoniaco para el año 2027, usando la energía proporcionada por un parque eólico off-shore ubicado en la ciudad de Barranquilla, se proyecta el autoabastecimiento, uso y exportación del amoniaco verde [4]. Para el año 2021 se importaron 50.000 toneladas, por lo tanto, para cuando el proyecto entre en operación, se espera tener disponibilidad para su uso más allá de la producción de fertilizantes.

El amoniaco también posee otros usos; como refrigerante en enfriadores industriales de gran escala o como aditivo en dispositivos de reducción catalítica selectiva (SCR) en control de emisiones de NOx en grandes centrales termoeléctricas [5], aunque actualmente se plantea como un vector energético de bajas emisiones de carbono que puede ayudar a resolver los retos que plantea el mercado del hidrógeno en materia de almacenamiento y transporte. La mayoría de las moléculas portadoras de hidrógeno requieren energía para absorberlo y/o liberarlo, en cambio, como se puede observar en la Figura 1, la molécula de amoniaco posee una alta densidad de hidrógeno cuando se encuentra en estado líquido, que puede ser usado en la combustión o en pilas de combustible de óxido sólido (SOFC) sin la extracción previa del mismo [5]. Adicionalmente, la

industria del amoniaco cuenta con una experiencia de aproximadamente 100 años en la fabricación, transporte, almacenamiento y usos diversos de esta especie, por lo tanto, la infraestructura necesaria ya cuenta con la madurez para hacer la transición a un menor costo y tiempo de ejecución.

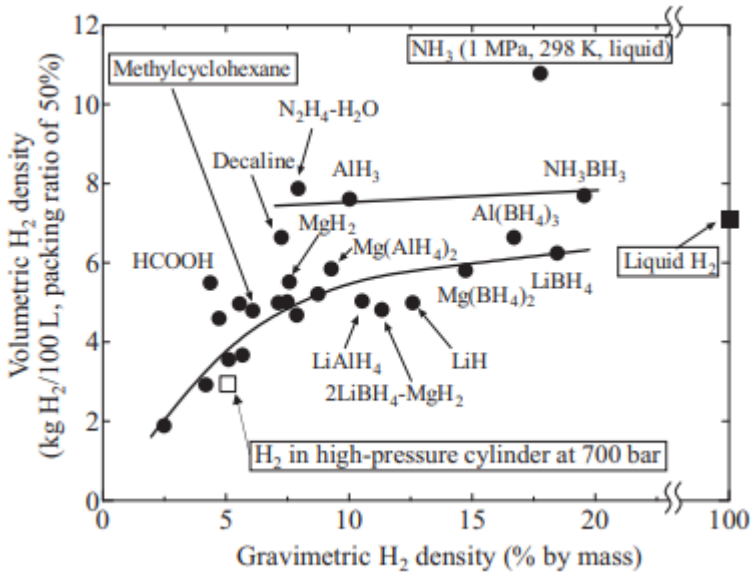

Figura 1. Densidad volumétrica y gravimétrica de H2 en portadores de hidrógeno. [5]

El uso del amoniaco como combustible ha sido probado en motores de combustión interna, tanto de encendido por compresión como por chispa, donde en motores con relaciones de compresión muy altas, generalmente de ciclo Diesel, promete resultados alentadores reduciendo efectos indeseables como el cascabeleo [6]. Empresas como Mahle Powertrains en asociación con Toyota anunciaron en 2023 un sistema capaz de quemar directamente amoniaco en motores Diesel de gran tonelaje [7]. En el caso de las turbinas de gas para generación eléctrica se han probado mezclas de NH3 con otros hidrocarburos, donde se han alcanzado condiciones de operación óptimas, sin embargo, cuando se usa amoniaco puro, la baja velocidad de deflagración y la alta temperatura de autoignición junto con los bajos tiempos de residencia en la cámara de combustión resulta en una disminución de la eficiencia de combustión [8]. Otros estudios han sido llevados a cabo para probar el amoniaco como combustible, con éxito en términos de producción de energía, pero desafortunadamente las emisiones de NOx superan lo permitido por estándares internacionales [9].

Por otra parte, el uso de quemadores de medio poroso inerte ha demostrado ser una excelente alternativa para el uso de este combustible, tomando parte del protagonismo en la búsqueda de propuestas tecnológicas que establezcan su uso de forma segura. Se ha demostrado que mejoran la estabilidad de la combustión y aumentan la densidad energética que se puede obtener, comparado con quemadores convencionales operados bajo las mismas condiciones [10]. El grupo GASURE ha presentado varios estudios en este tipo de quemadores usando diversos combustibles tanto en combustión sumergida como superficial, entre estos se destacan: el estudio numérico y experimental de la combustión estabilizada en la superficie usando gas natural y técnicas láser [11], el estudio de la combustión de mezclas de gas natural y gas de síntesis con alto contenido de hidrógeno en combustión sumergida[12], o el estudio del rendimiento de un quemador de medio poroso con aire inducido para uso doméstico en grandes alturas [13]. En general, los beneficios señalados en estos estudios proveen visión hacia una alternativa tecnológica que puede resolver varios de los inconvenientes relacionados con las propiedades de combustión del amoniaco (baja velocidad de deflagración y poder calorífico pobre).

A pesar de que se han rastreado patentes propuestas para motores de combustión interna de amoniaco desde 1822 por parte de Sir Goldsworthy Gurney (mucho antes de la producción masificada del amoniaco) [14], en Colombia la investigación de su uso térmico ha quedado rezagada por la poca disponibilidad, precio y la rigurosidad en los requerimientos para su obtención y uso comercial. En aras de contribuir al desarrollo energético del país se hace indispensable desarrollar conocimientos locales sobre la combustión del amoniaco y lograr aprovechar su potencial en la transición energética. Para esto se propone estudiar el comportamiento de una llama de premezcla en un quemador de medio poroso utilizando como combustible amoniaco, y determinar sus propiedades de combustión de forma teórica y experimental.

2. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Estudiar la combustión del amoniaco en un medio poroso radiante.

B. Objetivos específicos

- Revisar el estado del arte en relación con sus propiedades de combustión, aplicación del amoniaco en llamas de premezcla y tendencia en infraestructura.
- Identificar teóricamente las propiedades de combustión del amoniaco en relación con su comportamiento en una llama de premezcla.
- Adecuar la infraestructura para el desarrollo de experimentos.
- Estudiar experimentalmente la fenomenología de la llama de premezcla de amoniaco en un medio poroso.

3. MARCO TEÓRICO

3.1.La combustión y sus propiedades.

Cuando se genera la reacción de oxidación de un combustible con la presencia del comburente (generalmente aire), se libera la energía potencial química que poseen los enlaces de las moléculas que conforman el combustible. Este fenómeno es el que conoce como la combustión. Sin embargo, para que ocurra es necesario que se cumplan dos condiciones: que la relación entre combustible y comburente se encuentre en el rango de inflamabilidad de la mezcla y que se provea la energía suficiente para iniciar la cadena de reacciones que generan, por lo general, el efecto lumínico conocido como la llama. Aunque siempre se relaciona la combustión con la presencia de una llama, también puede darse sin la presencia de esta, como es el caso de la combustión catalítica. [15]

Los combustibles, históricamente de origen fósil, son los que poseen la energía química que será liberada durante el proceso de oxidación gracias a la presencia del oxígeno, siempre presente en el comburente. Para un manejo adecuado del combustible y su óptima combustión es necesario conocer sus propiedades, la composición de los gases que se generan y las propiedades de estabilidad de llama. Las propiedades de interés comúnmente utilizadas en la literatura son el poder calorífico superior e inferior (PCS y PCI), índice de Wobbe (Wo), temperatura de llama adiabática, límites de inflamabilidad, tiempos de retardo de ignición, cantidad de aire estequiométrica, volumen de humos secos y húmedos, porcentaje máximo de dióxido de carbono y velocidad de combustión laminar.[15]

Para un apropiado manejo de la combustión es importante resguardar la estabilidad de la llama, más aún cuando el combustible es mezclado con el comburente antes de ingresar a la zona de combustión, o también conocidas como llamas de premezcla. En este caso se pueden presentar dos fenómenos; el desprendimiento de la llama o una retrollama. Cuando uno de estos se presenta se puede evidenciar el desequilibrio entre la velocidad de deflagración y la componente paralela al sentido del flujo de la velocidad de la mezcla combustible-comburente.[16]

3.2. Amoniaco como combustible.

3.2.1. Propiedades de combustión.

El amoniaco gaseoso es una sustancia incolora con un olor bastante característico y penetrante, muy corrosiva, de naturaleza tóxica, con 0.589 veces la densidad del aire al nivel del mar a 25°C, y además también es inflamable. Si bien su poder calorífico por unidad de masa es menor al que se reporta para el hidrógeno, el metano o el propano, o que su temperatura de llama adiabática sea significativamente menor a los demás combustibles, como se presenta en la Tabla 1, este posee otras ventajas en cuanto a su manejo como combustible y emisiones de gases de efecto invernadero, pues posee un rango de inflamabilidad, aunque más estrecho, cercano al que se presenta para el metano, a diferencia del hidrógeno y el propano, para el cual existe una mayor cantidad de proporciones de mezcla combustible-comburente donde pueden ser inflamables. Si bien posee una densidad y una capacidad calorífica cercanas a la del metano, la diferencia en la conductividad térmica sí difiere en varios ordenes de magnitud con respecto a los demás combustibles presentados. Estas propiedades guardan relación en la difusividad térmica del gas, puesto que dicha baja conductividad térmica resulta en una baja difusividad térmica, la cual es una medida de la velocidad con la que se transfiere el calor en la materia. Se encuentra en estado gaseoso a temperatura ambiente y se condensa a -33°C a presión atmosférica, y 9.9 atm a 25°C. Si se compara con el hidrógeno o con el metano, se requiere invertir menos energía para su transporte y almacenamiento en estado líquido [5].

Un factor importante para tener en cuenta en el estudio de la combustión es la velocidad de deflagración laminar; esta fue medida por Akihiro Hayakawa et al (2015) [17] empleando una llama premezclada de amoniaco y aire propagada esféricamente en una cámara de combustión con volumen constante y el uso de fotografías Schlieren, como se esquematiza en la Figura 2. Las pruebas se realizaron para diferentes presiones y dosados relativos. Con los resultados lograron concluir que la velocidad de deflagración es máxima para un dosado de 1.1, independientemente de la presión inicial del gas. Además, así como los demás combustibles, la velocidad de deflagración disminuye con el aumento de la presión sin importar el dosado relativo de la mezcla, como se observa en la Figura 3. Se reporta una velocidad máxima alrededor de 7 cm/s para el amoniaco a 0.1 MPa, lo cual es 40 veces más lento que la presentada para el hidrógeno, 5 veces

menor que la del metano y 6 veces menor que para el propano, de esto se puede inferir que para lograr una llama estable es necesario lograr velocidades de descarga mucho menores que para los otros combustibles presentados.

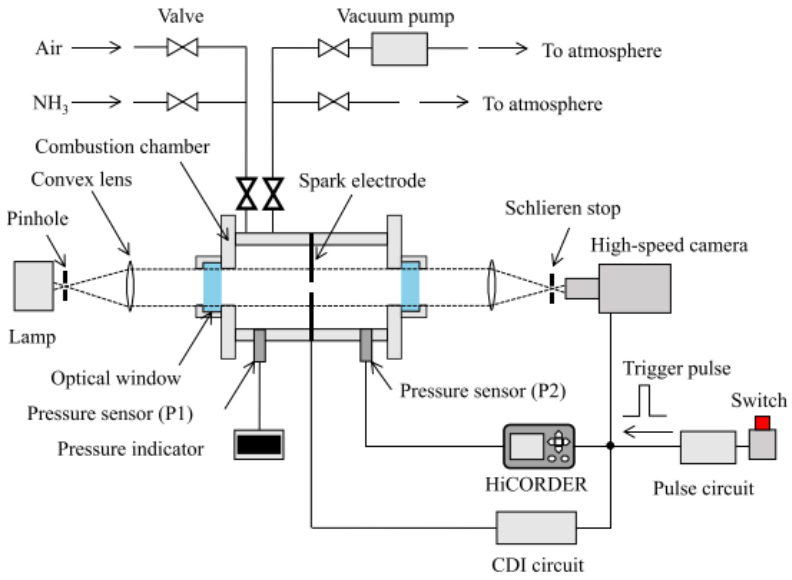

Figura 2. Aparato experimental utilizado por A. Hayakawa et al. (2015) [17]

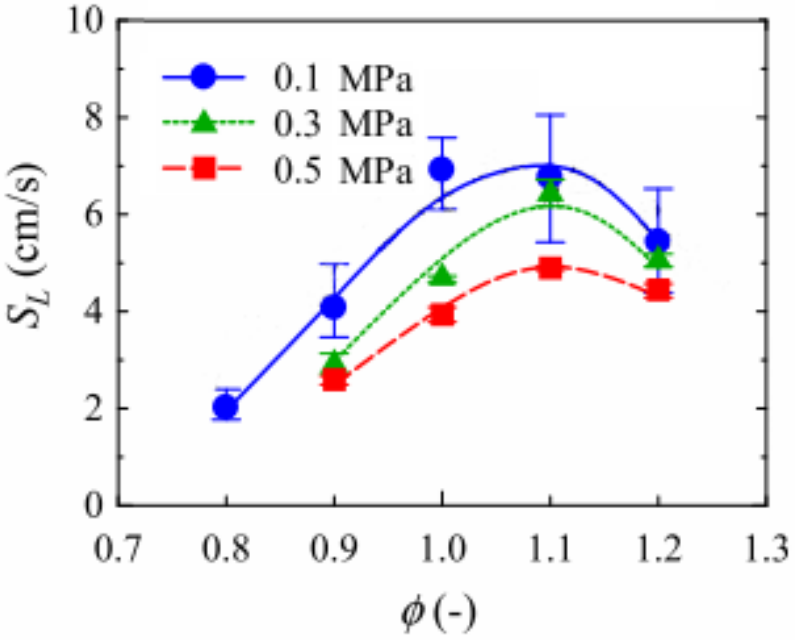

Figura 3. Resultados experimentales de velocidad de deflagración en función del dosado relativo, obtenidos por Hayakawa et al (2015) [17]

K. Takizawa et al (2014) [18] estudiaron las energías mínimas de ignición y la distancia de enfriamiento de diferentes compuestos alta y medianamente inflamables (aquellos con velocidades de deflagración mayores o menores a 10 cm/s, respectivamente), entre estos el amoniaco. El equipo y el procedimiento experimental usado fue similar al propuesto por la norma ASTM E582 [19] como se muestra en la Figura 4. Se usaron placas paralelas de diferentes tamaños, en posición vertical y horizontal. Con este estudio, lograron determinar que para compuestos altamente inflamables la diferencia en la distancia crítica de enfriamiento no era significativa cuando se usaban placas horizontales o verticales, sin embargo, la diferencia se hace notable cuando se trata de combustibles medianamente inflamables.

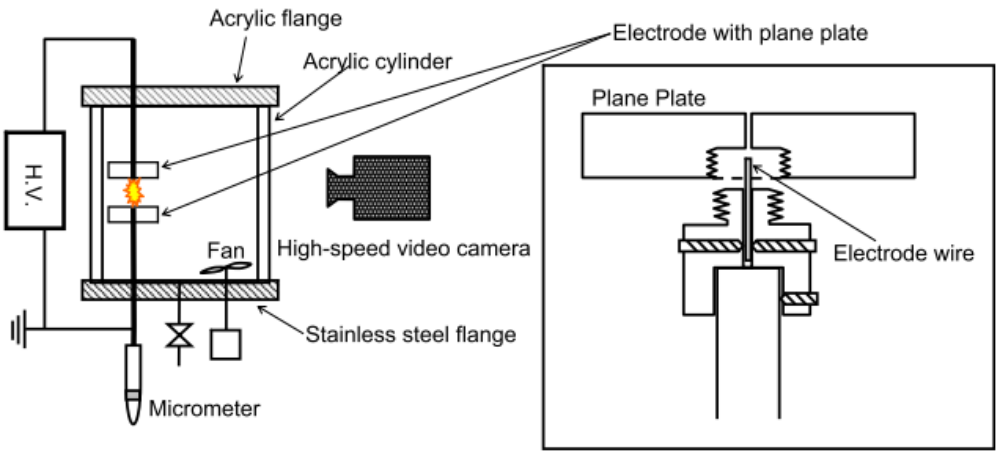

Figura 4. Montaje experimental para la medición de la energía mínima de ignición y la distancia crítica de enfriamiento entre placas paralelas. [18]

Para el amoniaco, en placas horizontales la distancia crítica de enfriamiento es de 8.95 mm, mientras que en vertical es de 7.45 mm, si se compara con la diferencia que presenta el propano, el mismo estudio presenta que para placas horizontales la distancia es de 1.7 mm, sin variación en este valor cuando se usan las placas verticales. Esto se debe al efecto de flotación que mueve el flujo hacia arriba, mientras que cuando se usan las placas paralelas la llama se distribuye en toda su área, en el caso de las placas verticales la llama se concentra en la parte superior de las placas, liberando más calor en esa zona, como se observa en la Figura 5 [18].

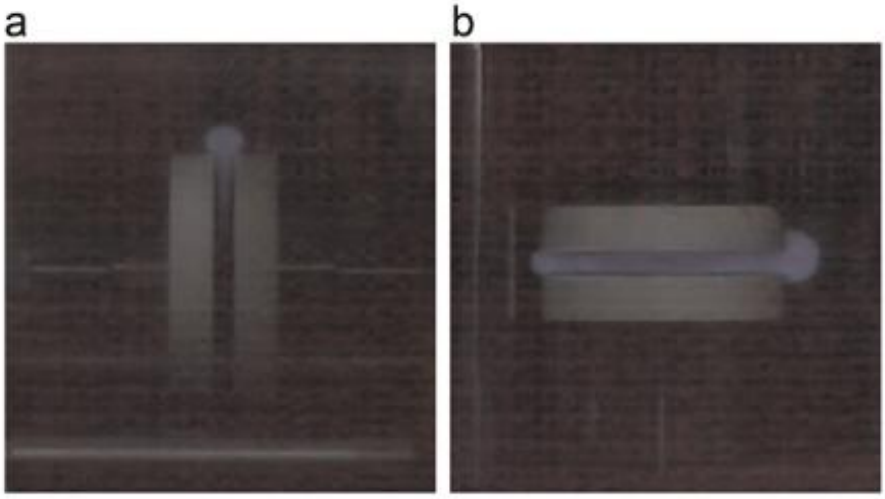

Figura 5. Propagación de la llama en placas paralelas (a) verticales (b) horizontales usados en los experimentos realizados por K. Takizawa et al. [18]

En cuanto a la energía mínima de ignición, el mismo estudio muestra que para la posición vertical la energía mínima de ignición es de 19 mJ, pero en la posición horizontal, este valor aumenta hasta los 45 mJ [18]. Estos resultados, aunque superiores a los presentados en la literatura, son cercanos a los presentados en la literatura, puesto que se reporta una energía de 8 mJ [20]. Por otra parte, en un estudio realizado por Zongjie Hu et al (2024) [21] donde en una atmósfera de 79% argón y 20% oxígeno, y mediante dos electrodos en forma de aguja separados 1 mm entre sus puntas (ver Figura 6), se induce una la combustión del amoniaco al generar una chispa de 54 mJ durante 5 ms. Al cabo de 35 ms la llama empieza a desprenderse debido a la velocidad con la que se liberan los gases de premezcla y la baja velocidad de deflagración laminar del amoniaco como se observa en la Figura 7. Finalmente, este estudio concluye que la energía adecuada para iniciar la combustión del amoniaco es de 52.1 mJ, pero aún se presentan desafíos para generar una llama estable. La Tabla 1 presenta el valor más bajo para la energía mínima de ignición en la literatura presentada.

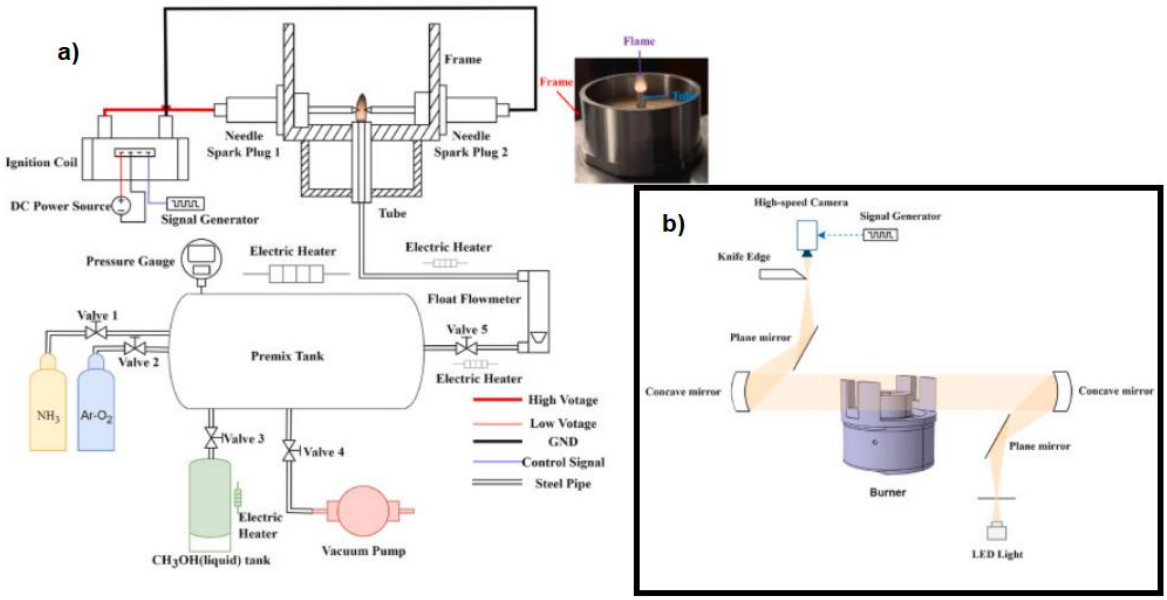

Figura 6. Montaje experimental a) para medición de energía mínima de ignición b) para toma de imágenes Schlieren, utilizado por Zongjie Hu et al [21]

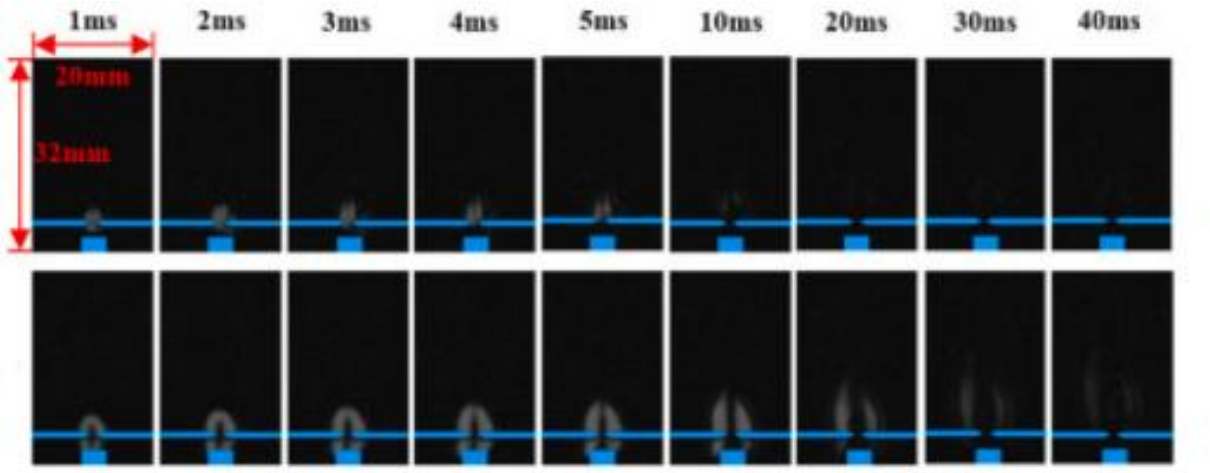

Figura 7. Fotografías Schlieren obtenidas por Zongjie Hu et al (2024) para la ignición del amoniaco [21]

A pesar de existir una gran diferencia en las energías mínimas de ignición entre el amoniaco y los demás combustibles comparados, su temperatura mínima de autoignición es cercana a la del metano, que a su vez también es mayor a la temperatura reportada para el hidrógeno y el propano.

Tabla 1. Propiedades del amoniaco, hidrógeno, metano y propano. [5] [15] [16] [18] [20] [22] [23] [24] [25] [26] [27]

	NH3	H2	CH4	C3H8	Unidades
Peso molecular	17,031	2,016	16,044	44,097	kg/kmol
Densidad @ 1 atm y 300 K	0,7690	0,0826	0,6623	1,8116	kg/m^3_n
Viscosidad	0,0098	0,009	0,011	0,08	centipoises
Temperatura de ebullición @1 atm	239,75	20,15	112,15	231,05	K
Presión de condensación @300 K	9,9	-	-	9,4	atm
Conductividad térmica	0,002219	0,182	0,035	0,017	W/m-K
Capacidad calorífica a presión constante	2,17	14,31	2,26	1,63	kJ/kg-K
Capacidad calorífica a volumen constante	1,64	10,19	1,73	1,36	kJ/kg-K
Presión crítica	111,5	12,86	45,8	42,05	atm
Temperatura crítica	405,15	33,15	190,85	369,15	K
Difusividad térmica	1,33	153,89	23,38	5,76	mm^2/s
Límites de inflamabilidad	0,63~1,4	0,1~7,1	0,5~1,7	0,51~2,5	Dosado relativo
Temperatura de llama adiabática	1800	2110	1950	2000	°C
Velocidad máxima de deflagración laminar	7	291	37	43	cm/s
Temperatura mínima de autoignición	650	520	630	450	°C
Poder calorífico inferior (másico)	5,17	33,31	13,9	12,87	kWh/kg
Poder calorífico inferior (volumétrico)	3.98	2.75	9.2	23.32	kWh/m^3_{st}
Índice de Wobbe	5,55	12,19	13,64	20,7	kWh/m^3_{st}
Distancia critica de enfriamiento	7,45	0,58	2,5	1,75	mm
Energía mínima de ignición	8	0,02	0,28	0,25	mJ
Aire estequiométrico másico.	6,05	34,6	17,3	15,63	kg_{aire}/kg_{comb}

A la luz de las propiedades de combustión descritas, se pueden vislumbrar en primera instancia los problemas de intercambiabilidad del amoniaco con los combustibles gaseosos como el metano, propano e hidrógeno.

3.2.2. Compatibilidad de materiales.

Otro aspecto crucial para el manejo del amoniaco en sistemas de combustión es la selección de materiales compatibles con su uso, puesto que se trata de una sustancia altamente corrosiva que puede comprometer la vida útil de los equipos. El amoniaco reacciona fácilmente con una gran variedad de sustancias, este es incompatible con cobre, zinc, o aleaciones basadas en estos metales, pues la corrosión puede comprometer la integridad de dichos componentes. Sin embargo, algunos rodamientos, bujes y anillos de pistones que contienen cobre pueden ser aceptables debido a que

estos son cubiertos continuamente con una capa de lubricante que no genera reacciones de degradación con amoniaco, pues el amoniaco es virtualmente inmiscible con la mayoría de los aceites lubricantes de origen mineral, aunque el amoniaco líquido arrastrará físicamente el aceite a medida que fluye. El aluminio, acero, y acero inoxidable son compatibles con el amoniaco. Algunos aceros con altas resistencias a la tensión pueden experimentar fracturas de corrosión bajo tensión si el amoniaco es totalmente anhidro. En los aceros al carbono la susceptibilidad a la fractura de corrosión bajo tensión aumenta con la resistencia a la tensión, particularmente en aceros con esfuerzos residuales o aplicados. Otros factores que pueden afectar la corrosión son la concentración de oxígeno y de agua en el ambiente. Cuando la concentración de oxígeno se encuentra por debajo de 5 ppm aumenta la posibilidad de fractura por corrosión, mientras que concentraciones de agua de aproximadamente 0.2% inhiben la corrosión en las paredes del material [28]. Un estudio realizado por Wang et al [29] con un material usado para la nitruración de acero (SACM645) y materiales estructurales o usados comúnmente en componentes de tuberías (SUS304 y SUS301S). Estos fueron expuestos a llamas de amoniaco a 550°C durante 5 horas, mostrando deterioro debido a los efectos de nitruración. Estos están relacionados con la difusión de los átomos de nitrógeno a diferentes profundidades (de 25 a 50 µm en el estudio presentado) dependiendo de la estructura cristalográfica del material, siendo estructuras cúbicas centradas en el cuerpo más propensas a la difusión que las centradas en las caras. El estudio muestra que los materiales expuestos a llamas de amoniaco aumentan su dureza debido a los efectos de la nitruración. Además, esta aumenta conforme se aleja del centro de la llama, en las zonas con más concentración de amoniaco, como se observa en la Figura 8.

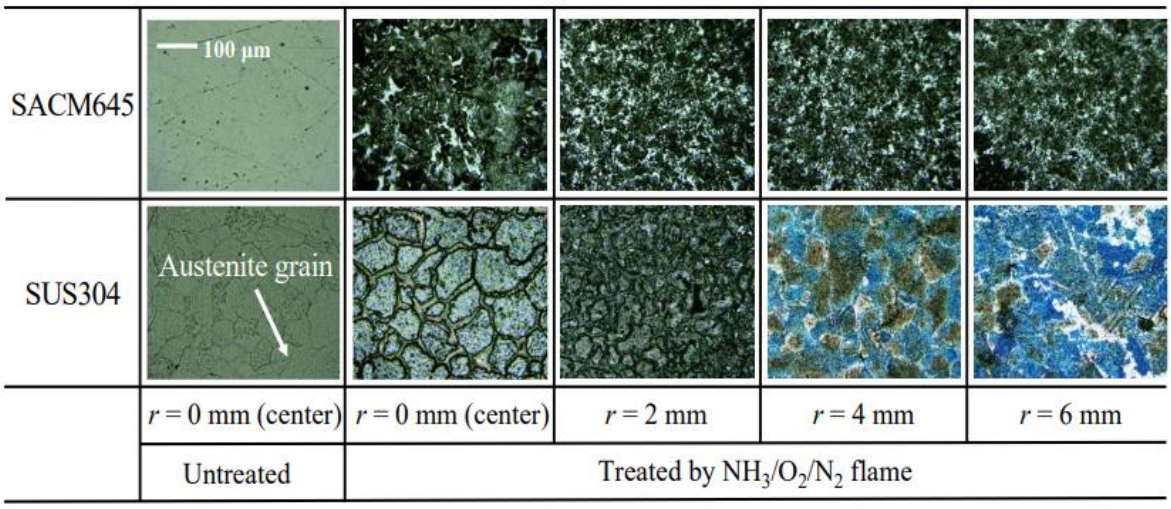

Figura 8. Micrografías de los aceros SACM645 y SUS304 expuestos a una llama de amoniaco a 550°C durante 5 horas, a diferentes distancias del centro de la llama. [29]

Por su naturaleza reactiva el amoniaco presenta ciertos inconvenientes al estar en contacto con algunas sustancias de uso común en la ingeniería, sin embargo, esta es una industria con más de cien años de experiencia en el manejo de este gas, por lo tanto, a pesar de que no se han realizado suficientes estudios sobre los efectos de la combustión del amoniaco sobre los materiales de ingeniería, se cuenta con conocimientos sobre materiales aptos para su manejo. A continuación, la Tabla 2 presenta los grados de compatibilidad entre el amoniaco y diferentes materiales de uso común en la ingeniería.

Tabla 2. Compatibilidad del amoniaco con diferentes materiales. A: Excelente; B: Bueno, efectos menores; C: Efectos moderados, no recomendado para uso continuo; D: No recomendado, daños severos. [6]

	Material	Compatibilidad		Material	Compatibilidad
No metales	ABS	D	**Metales**	Acero al carbono	B
	Acetal	D		Aluminio	A
	Caucho natural	D		Bronce	D
	ChemRaz (FFKM)	B		Carpenter 20	A
	CPVC	A		Cobre	D
	EPDM	A		Fundición de hierro	A
	Epoxy	A		Hastelloy C	B
	Fluorocarbon	D		Latón	D
	Grafito	B		SS 304	A
	Hypalon	D		SS 316	A
	Hytrel	D		Titanio	C
	Kalrez	A			
	Kel-F	A			
	LDPE	B			
	Neopreno	A			
	Nitrilo	B			
	NORYL	B			
	Nylon	A			
	PEEK	A			
	Policarbonato	D			
	Polipropileno	A			
	Poliuretano	D			
	PPS	A			
	PTFE	A			
	PVC	A			
	PVDF	A			
	Silicona	C			
	Tygon	A			
	Viton	D			

3.2.3. Aspectos de seguridad.

Como se ha mencionado anteriormente, el amoniaco puede afectar negativamente a los materiales, pero también a los seres vivos y la naturaleza. Por tanto, se debe tener en cuenta ciertas consideraciones de seguridad y manejo del riesgo. La asociación nacional de protección de incendios (NFPA) de Estados Unidos, ha clasificado al amoniaco como una sustancia tóxica, siendo esta un químico de alto riesgo para la salud. Sin embargo, dada su baja reactividad, los riesgos de combustión accidental o explosiones son mucho menores que para otros gases o líquidos [6]. Por otra parte, si este tiene contacto con ciertas sustancias puede generar reacciones potencialmente peligrosas. Estas se enlistan en la Tabla 3.

Tabla 3. Lista de sustancias que reaccionan de forma peligrosa con el amoniaco según la NFPA. [28]

Sustancias que reaccionan peligrosamente con amoniaco			
Acetaldehído	Anhídrido Crómico	Perclorato de Magnesio	Clorato de Potasio
Acroleína	Cloruro de Cromilo	Mercurio	Ferricianuro de Potasio
Boro	Dicloruro de Etileno	Ácido Nítrico	Mercuricianuro de Potasio
Trióxido de Boro	Óxido de Etileno	Tetróxido de Nitrógeno	Triyanoerurato de Potasio
Bromo	Flúor	Trifluoruro de Nitrógeno	Plata
Ácido Calórico	Oro	Cloruro de Nitrosilo	Cloruro de Plata
Cloro	Hexacloromelamina	Difluoruro de Oxígeno	Sodio
Monóxido de Cloro	Hidrazina	Pentóxido de Fósforo	Estilbeno
Trifluoruro de Cloro	Bromuro de Hidrógeno	Trióxido de Fósforo	Azufre
Cloritos	Ácido Hipocloroso	Ácido Pícrico	Telurio
Clorisilano	Yodo	Potasio	Tricloromelamina

La organización Health and Safety de Reino Unido establece una concentración admisible para periodos de tiempo de 8 horas de 25 pmm, y 35 ppm cuando se trata de cortos periodos de tiempo [6]. La exposición corta al gas puede ocasionar irritación ocular, en la nariz y garganta. Inhalarlo puede irritar los pulmones, ocasionando tos o en algunos casos asfixia. Una exposición prolongada puede causar edema pulmonar. El amoniaco líquido tiene un efecto caustico sobre la piel y en estado gaseoso puede causar quemaduras y congelación. A largo plazo puede generar alergias, por lo tanto, futuras exposiciones pueden causar ataques de asma [30]. La Tabla 4 presenta los efectos que tiene sobre la salud la exposición a diferentes concentraciones de amoniaco en el aire según la NFPA.

Tabla 4. Efectos sobre la salud ocasionados por la exposición a diferentes concentraciones de amoniaco en el aire.[6]

Efecto	Concentración de amoníaco en el aire
Olor fácilmente detectable	20–50 ppm
Sin perjuicio para la salud con exposición prolongada	50–100 ppm
Irritación severa de ojos, oídos, nariz y garganta. Sin efecto duradero con exposición corta	400–700 ppm
Peligroso, menos de ½ hora de exposición puede ser fatal	2000–3000 ppm
Edema grave, estrangulación, asfixia, rápidamente fatal	5000–10000 ppm

Para la manipulación de este gas se recomienda usar el equipo de seguridad apropiado, el cual consta de una máscara de cartucho químico, guantes de neopreno y gafas panorámicas de seguridad (estas deben aislar el área de los ojos del ambiente), se recomienda también usar prendas de vestir que cubran los brazos y piernas. Si bien el ser humano puede detectar el olor del amoniaco en el aire a partir de los 5 ppm, se recomienda usar un instrumento calibrado que notifique mediante alarma cuando la concentración en el ambiente supere los 35 ppm.

3.2.4. Usos del amoniaco como combustible

Bajo la necesidad de descarbonizar los procesos industriales, se ha sugerido el hidrógeno producido a partir de fuentes renovables como portador de energía. Sin embargo, este presenta mayores dificultades en cuanto al transporte y almacenamiento comparado con otros combustibles. El amoniaco derivado del hidrógeno verde es una alternativa prometedora que se vale de una infraestructura ya existente. A pesar de las ventajas, los métodos establecidos para su uso como combustible aún presentan obstáculos, como las fugas, formación de CO (especialmente cuando se mezcla con combustibles fósiles), el sostenimiento de la estabilidad de la llama, y más. En aras de generar un desarrollo para el uso del amoniaco como combustible, se deben tener en cuenta dos aspectos clave, la eficiencia y las emisiones (especialmente de NH3 y NOx), que pueden variar dependiendo de la tecnología usada para su combustión. Actualmente el desarrollo más maduro se encuentra en el transporte naval, con un nivel de preparación tecnológica de 9, es decir, ya se encuentran realizando pruebas comerciales, en cambio en el caso de los motores de combustión interna, hornos, calderas y turbinas, el nivel de preparación de la tecnología se encuentra entre 4 y

5 [31]. A continuación, se presentan diferentes tecnologías que emplean la combustión del amoniaco.

3.2.4.1. Hornos y calderas

Los hornos y calderas son equipos que transforman la energía química de los combustibles en energía térmica. En el caso de los hornos, esta se usa para varios propósitos, como calentar ambientes, evaporar líquidos, tratamientos térmicos, entre otros. Mientras que las calderas tienen la función específica de calentar fluidos (usualmente agua). Proveen vapor a presiones, temperaturas y flujos puntuales para luego ser usado en aplicaciones donde se requiera calentamiento o en la generación de energía. En general, el principio de combustión de estos equipos es muy similar. Además, poseen varias ventajas clave; son robustos y relativamente fáciles de operar, generalmente tienen una larga vida útil y en términos de eficiencia superan a los demás sistemas térmicos, como las plantas de energía térmica o motores de combustión interna. Puesto que estos son equipos generalmente grandes, que requieren grandes cantidades de energía, se espera que su uso con combustibles renovables como el amoniaco no afecte de forma relevante su rendimiento y vida útil para poder competir con otras tecnologías. [26]

El amoniaco es un subproducto de muchos procesos industriales, en especial esos en los que interviene el uso de grandes cantidades de combustibles fósiles. Esto es relevante en la industria del acero, carbón, exploración o explotación de petróleo y gas o procesos de gasificación. Puesto que no se había propuesto el amoniaco como un combustible viable, se tiende a descartar a la atmosfera. Con esta oportunidad de mejora, la compañía Duiker Combustión Engineers busca apoyar procesos como la eliminación de agua agria en refinerías de petróleo, ya que los humos contienen trazas de amoniaco junto con otros químicos que incrementan los problemas de corrosión durante la recuperación de azufre. Debido a que la separación del amoniaco aumenta los costos de operación, estos gases deben ser usados aún sin separar para la producción de calor adicional y reducir el consumo de gas natural. El diseño del horno está basado en el uso de la oxidación estequiométrica controlada, la cual mediante un par de cámaras asegura la combustión de una mezcla rica seguida por oxidación de una mezcla pobre, lo cual habilita el control de la combustión estequiométrica, asegurándose que el amoniaco sin quemar de la primera etapa reaccione apropiadamente con los óxidos de nitrógeno formados durante el proceso de combustión. Esto

mediante la adición de aire en la segunda cámara, completando la reacción mientras se obtienen altos perfiles de calentamiento. La Figura 9 esquematiza el principio de operación del horno desarrollado por la compañía Duiker. Las emisiones de óxidos de nitrógeno se redujeron a <80 ppm y las temperaturas variaron de 2000 a 1100 K entre las secciones. Los últimos sistemas comisionados por la compañía han alcanzado a oxidar hasta 2684 kg/h de amoniaco. [32]

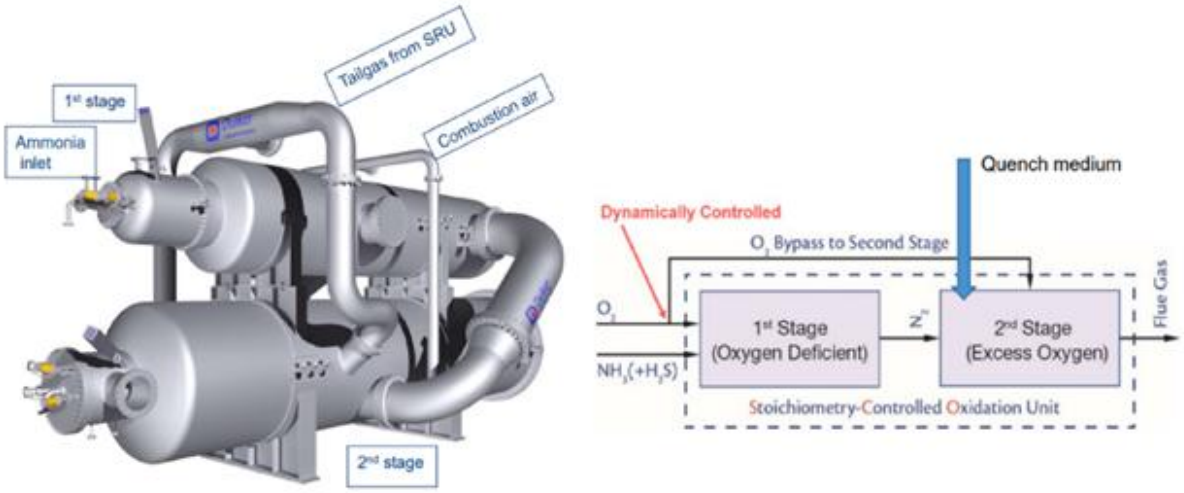

Figura 9. Tecnología de oxidación estequiométrica controlada desarrollada por la compañía Duiker [32]

Basado en el mismo principio de operación, S. Mashruk et al (2020) [33] realizaron un estudio numérico usando una mezcla de 70% amoniaco con 30% hidrógeno en volumen, con ingreso de gases a 560 K y 9.67 bar y un flujo de aire secundario de 3.22 kg/s a 960 K. Adicionalmente se añade vapor en una proporción de 40% combustible/vapor. La unidad fue simulada con una potencia de 10.4 MW. Como resultado se obtuvo que los gases de escape generados por la combustión de la mezcla consistían en 99.97% agua, nitrógeno y oxígeno. Este estudio muestra que la adición de vapor reduce las emisiones de óxidos de nitrógeno a menos de 100 ppm.

Otra opción es el uso de aire enriquecido. El oxígeno es un subproducto obtenido de las unidades de separación de aire usadas para generar nitrógeno en las plantas de amoniaco, así como también es un subproducto de la electrólisis del agua. Este puede ser usado para mejorar el proceso

de combustión y la estabilidad de la llama en los puntos que demandan energía térmica en estas plantas. Debido a la falta de carbono, la combustión del amoniaco tiene una baja transferencia de calor por radiación. Sin embargo, en el trabajo experimental presentado por Murai et al [34] donde se compara la operación de un horno a 10kW, con amoniaco y aire, metano y aire, y amoniaco con aire enriquecido. Se muestra que cuando se usa aire enriquecido la combustión del amoniaco puede liberar más calor por radiación y alcanzar mayores temperaturas que el metano con aire, como se puede observar en la Figura 10. En todos los casos el factor de aireación fue de 1.05, mientras que la concentración de oxígeno en el aire enriquecido es del 30%.

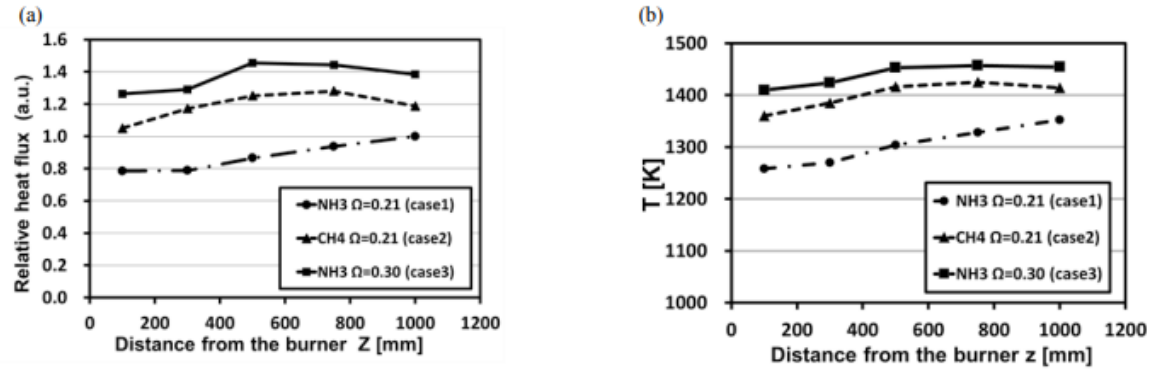

Figura 10. Resultados experimentales obtenidos por Murai et al [34].

Otro caso de éxito es el presentado por la empresa japonesa IHI, que demostró numérica y experimentalmente el uso de la co-combustión de amoniaco con carbón pulverizado en una caldera ya existente [35]. Como se observa en la Figura 11, el equipo de 10 MW cuenta con un quemador frontal. El aire suministrado por el ventilador de tiro forzado (FDF) ingresa al intercambiador de calor donde recupera energía térmica de los gases de combustión para ser precalentado antes de ingresar al quemador como aire de combustión. Parte de este aire de combustión es ingresado por un puerto de sobre aireación (OAP) localizado en la parte superior del horno. El aire suministrado por el ventilador del pulverizador también es ingresado al intercambiador de calor, y luego de ser calentado se ingresa en el pulverizador para secar y mover el carbón pulverizado. El aire que suministra el ventilador de aire primario (PAF) es usado para arrastrar el carbón pulverizado e ingresarlo en el quemador. La presión en la caldera es negativa debido a que se usa un ventilador de tiro inducido (IDF) para evacuar los gases de combustión. La medición de la composición de los gases de escape se realiza en la ubicación mostrada en la Figura 11.

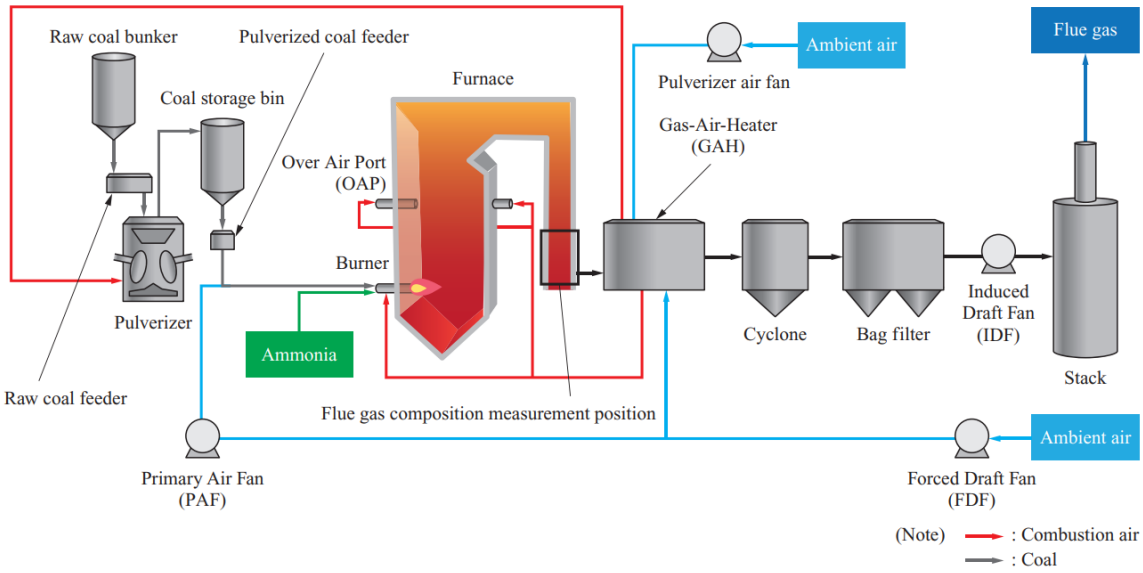

Figura 11. Esquema del funcionamiento del horno desarrollado por la empresa IHI [35]

El quemador de este equipo tiene una estructura simétrica, con canales para el carbón pulverizado, resistencias de aire y cajas de viento organizados de forma simétrica alrededor del centro, como se ilustra en la Figura 12. El aire primario es suministrado en la caldera por los canales para el carbón, mientras que el aire de combustión se ingresa por las cajas de viento. Las resistencias de aire poseen unos álabes a los que se les puede ser ajustar el ángulo de incidencia para regular la fuerza de swirl en el aire de combustión, este se añade para generar un flujo de circulación de gases dentro de la caldera. Este flujo mezcla rápidamente los gases calientes de combustión y el combustible, formando una llama estable y reduciendo NOx en la atmosfera de reducción. Se suministra una cantidad de amoniaco correspondiente al 20% de la energía de operación con base al poder calorífico inferior, con un factor de aireación de 1.2.[35]

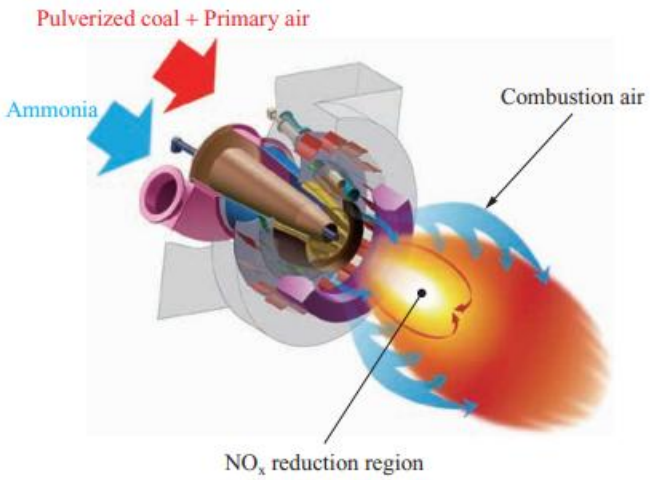

Figura 12. Vista ampliada del quemador de co-combustión de carbón y amoniaco usado por la empresa IHI [35].

En su estudio, los ingenieros de la compañía encontraron que las concentraciones de NOx en los gases de escape no superaban las reportadas cuando el equipo se opera sólo con carbón (200 ppm). El quemador diseñado por la empresa también puede inyectar sólo amoniaco, generando emisiones de NOx similares a cuando se usa en co-combustión, esto si se hace recircular los gases lo suficiente, lo cual también disminuye la concentración de amoniaco sin quemar. Sin embargo, la temperatura de los gases es menor cuando se añade amoniaco. Además, es importante contar con un sistema capaz de suministrar el gas en las cantidades necesarias, lo cual, para equipos de alta potencia se traduce en grandes sistemas de almacenamiento y suministro de amoniaco [35].

Por otra parte, en la planta de energía de Yantai, del grupo de energía de China, realizaron en enero de 2022 la primera co-combustión de carbón con 35% de amoniaco en una caldera de 40 MW. El horno cuenta con la tecnología de combustión por etapas, con un factor de aireación de 1.2. La muestra el banco de pruebas utilizado. Con este trabajo se demostró que se puede lograr una combustión estable con una adición de hasta 35% de amoniaco, con mejor eficiencia de combustión comparado a cuando sólo se usa carbón. Además, las emisiones de NOx llegaron a ser menores a cuando se usa carbón puro. El incremento en el factor de aireación no resulta en un cambio considerable en las emisiones de NOx, sin embargo, sí disminuye la concentración de CO y material particulado, además de mejorar la eficiencia térmica. [36]

3.2.4.2. Motores de combustión interna

El amoniaco puede usarse en motores de encendido por chispa y compresión, gracias a su alto octanaje (~130), pero requiere eliminar componentes de cobre o bronce por corrosión [37]. Debido a su baja velocidad de deflagración y resistencia a la autoignición, se optimiza mezclándolo con otros combustibles [6]. Un ejemplo es el caso del Instituto coreano para la Investigación de la Energía que presenta el El Instituto Coreano de Energía desarrolló el AmWeh, vehículo con 70% NH_3 y 30% gasolina. Adaptaron un motor GLP-gasolina, sustituyendo componentes metálicos incompatibles [38].

En un estudio realizado por S. Gill (2012) [39] se inyectó NH_3 en el múltiple de admisión de un motor Diesel (8.6 kW, 733 cm³, relación 15.1:1). Se probaron NH_3 puro, H_2 puro y NH_3 disociado (~1–2% NH_3, 75% H_2, 23–24% N_2). A 3 bar IMEP, el Diesel se redujo en 10% (NH_3) y 16% (H_2 o NH_3 disociado). A 5 bar, el reemplazo fue ~10–11% para todos, como se muestra en la Figura 13.

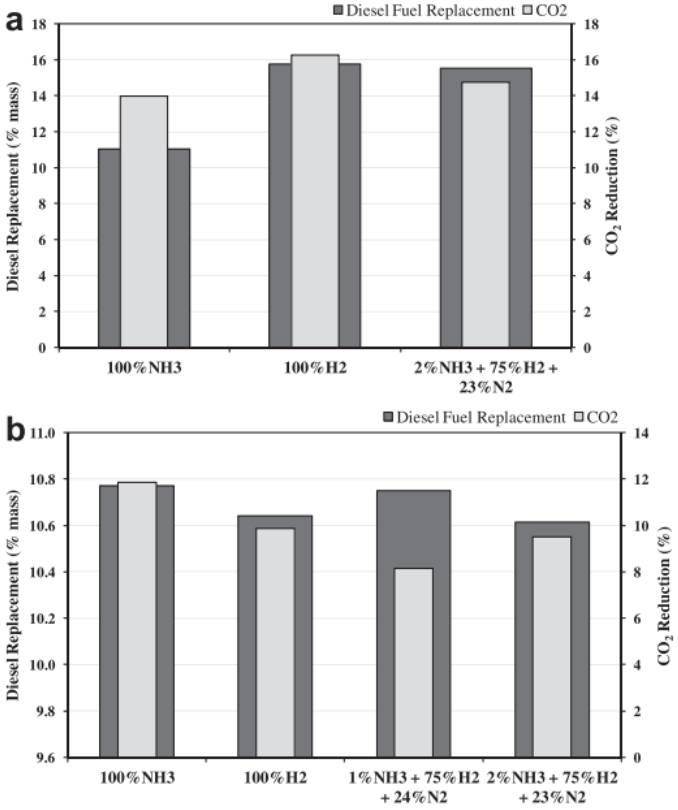

Figura 13. Reemplazo en Diesel y reducción de emisiones obtenidas por S. Gill (2012) con a) 3 bar IMEP y b) 5 bar IMEP.[39]

Con adición de NH_3 o H_2, la eficiencia térmica al freno cayó 3%, como se observa en la Figura 14 (IMEP 3 y 5 bar), por baja temperatura de combustión y mayor emisión de combustibles sin quemar, como se presenta en la Tabla 5.

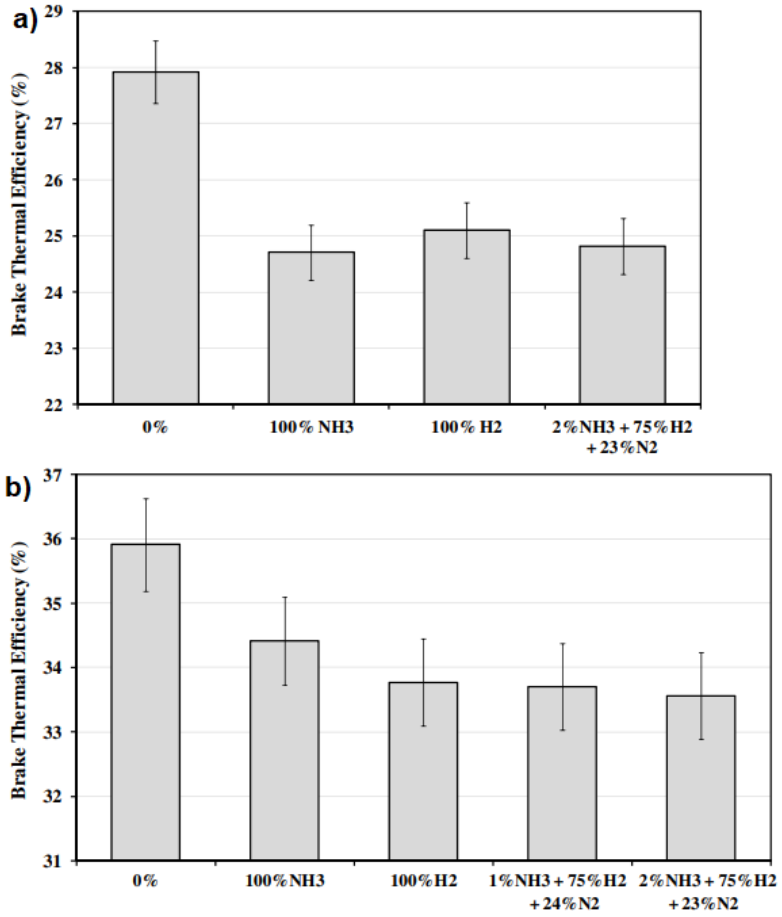

Figura 14. Eficiencia térmica al freno obtenida por S Gill (2012) con a) 3 bar IMEP y b) 5 bar IMEP [39].

Tabla 5. Emisiones de NH3 y H2 generadas en las pruebas realizadas por S Gill (2012) [39].

Composición del gas	Caudal [l/min]	5 bar IMEP				3 bar IMEP			
		NH3		H2		NH3		H2	
		ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%
0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100% NH3	7,5	2941,44	18,59	0	0	46,6	29,82	0	0
100% H2	11,25	0	0	4135,41	17,78	0	0	6895,38	29,67
1%NH3+75%H2+24%N2	15	46,72	14,45	3981,57	16,7	-	-	-	-
2%NH3+75%H2+23%N2	15	93,18	14,4	3697,24	15,49	157,17	24,83	7291,77	31,33

El amoniaco genera más NOx y N_2O por su contenido de nitrógeno. Su baja temperatura de combustión también produce más hidrocarburos sin quemar. H_2 ofrece mejor desempeño, pero más NOx. NH_3 disociado permite postratamiento más eficiente al absorber calor [39].

MAN Energy Solutions (2019) diseñó un motor marítimo dual-fuel NH_3/Diesel (5% Diesel para ignición) (Ver Figura 15). Sus emisiones de NOx son comparables al Diesel y se controlan con SCR que usa amoniaco como reductor. [40].

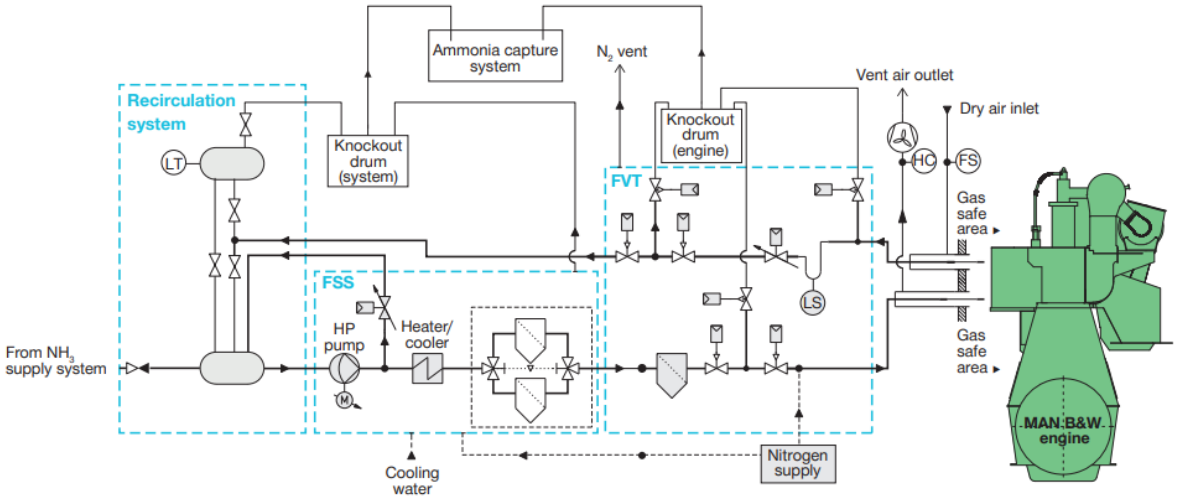

Figura 15. Esquema de funcionamiento del sistema de suministro de combustible del motor de dos tiempos desarrollado por MAN Energy Solutions para la industria del transporte marítimo.[40]

3.2.4.3. Turbinas de gas.

En los 60s, el uso de NH_3 en turbinas mostró menor potencia y mayores costos operativos, por lo que se descartó [41].

Somarathne et al (2017) realizaron simulaciones con quemadores de flujo en espiral. Sin aire secundario, la presión reduce NO y NH_3 sin quemar (Figura 16a). Con aire secundario, baja NH_3 y H_2, pero aumenta NO por mayor formación de radicales OH (ver Figura 17).[42]

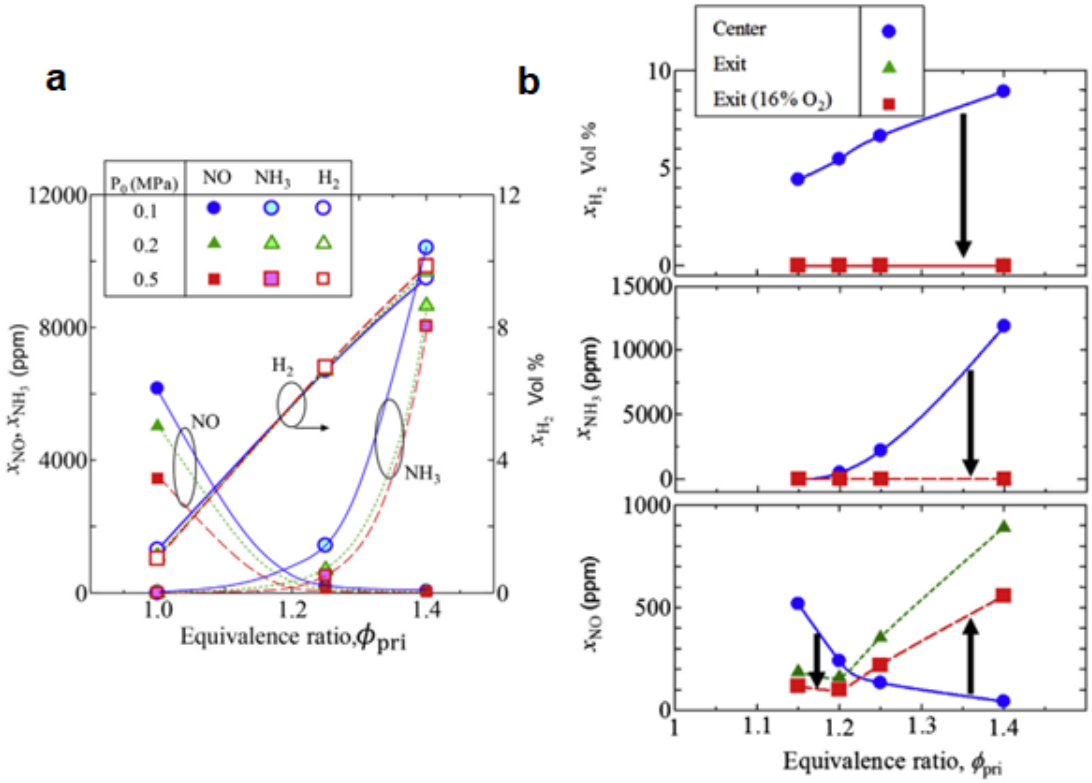

Figura 16. Emisiones promedio de NO, NH3 y H2 en a) quemador de flujo en espiral sin entrada de aire secundario, b) quemador de flujo en espiral con entrada de aire secundario.[42]

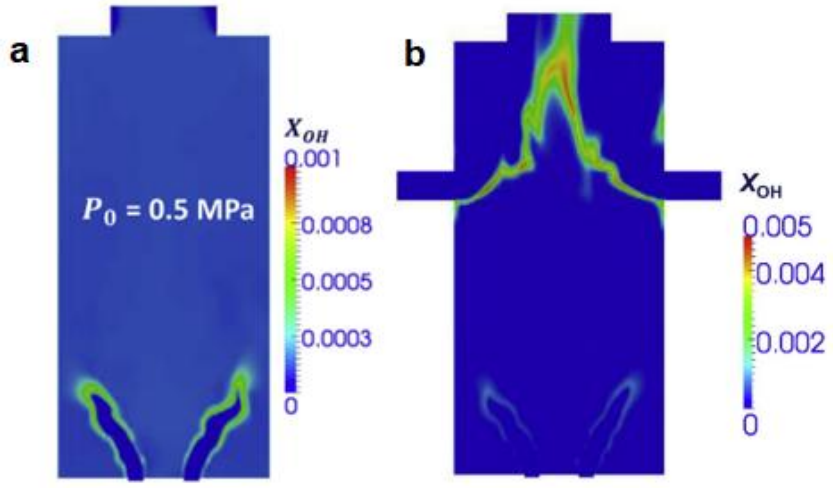

Figura 17. Efecto de la adición de aire secundario en la cámara de combustión: a) concentración de OH en la cámara de combustión sin aire secundario, con $\Phi_{pri} = 1.25$ y $P_0 = 0.5$ MPa. b) concentración de OH en la cámara de combustión con aire secundario, con $\Phi_{pri} = 1.2$ y $P_0 = 0.5$ MPa. [42]

Por otra parte, Kenanoglu et al (2021) evaluaron una turbina de 1 kW con NH_3 enriquecido con HHO (gases del electrolizador) (ver Figura 18) con los flujos presentados en la Tabla 6. Agregar 3 L/min de HHO mejoró la potencia en 25% y la eficiencia térmica en 3% (ver Figura 19). Mezclas con 5 y 7 L/min de HHO superaron incluso el desempeño del propano, aunque generaron >300% más NOx por formación de radicales OH [43]

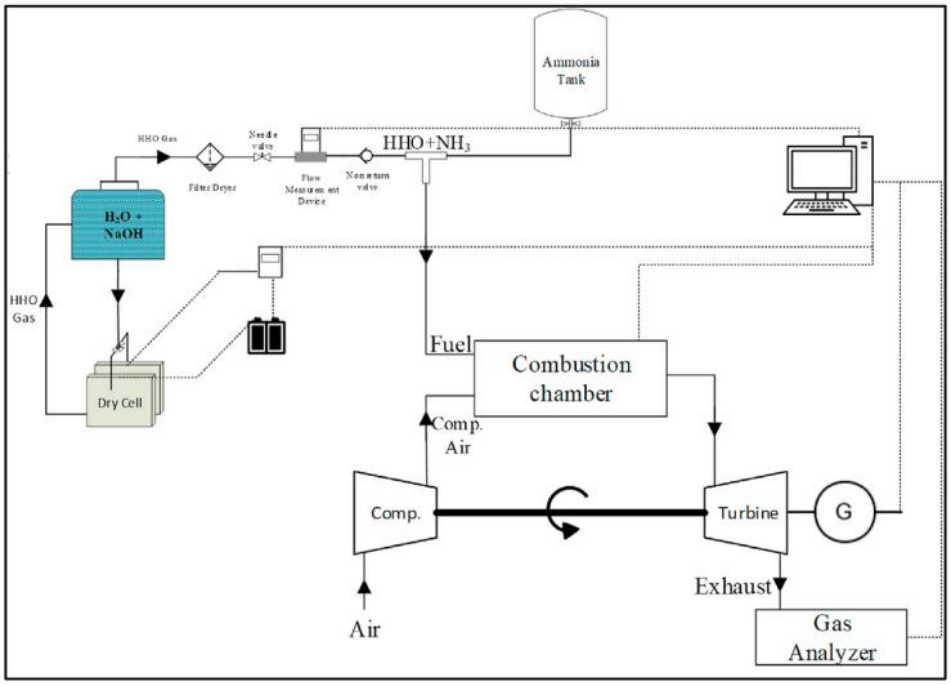

Figura 18. Diagrama del sistema electrolizador y turbina utilizado por Kenanoglu et al [43]

Tabla 6. Flujo de combustibles en cada una de las mezclas usadas por Kenanoglu et al [43]

Mezcla	Flujo NH3 [L/min]	Flujo HHO [L/min]
NH3 + 3 HHO	10	3
NH3 + 5 HHO	10	5
NH3 + 7 HHO	10	7

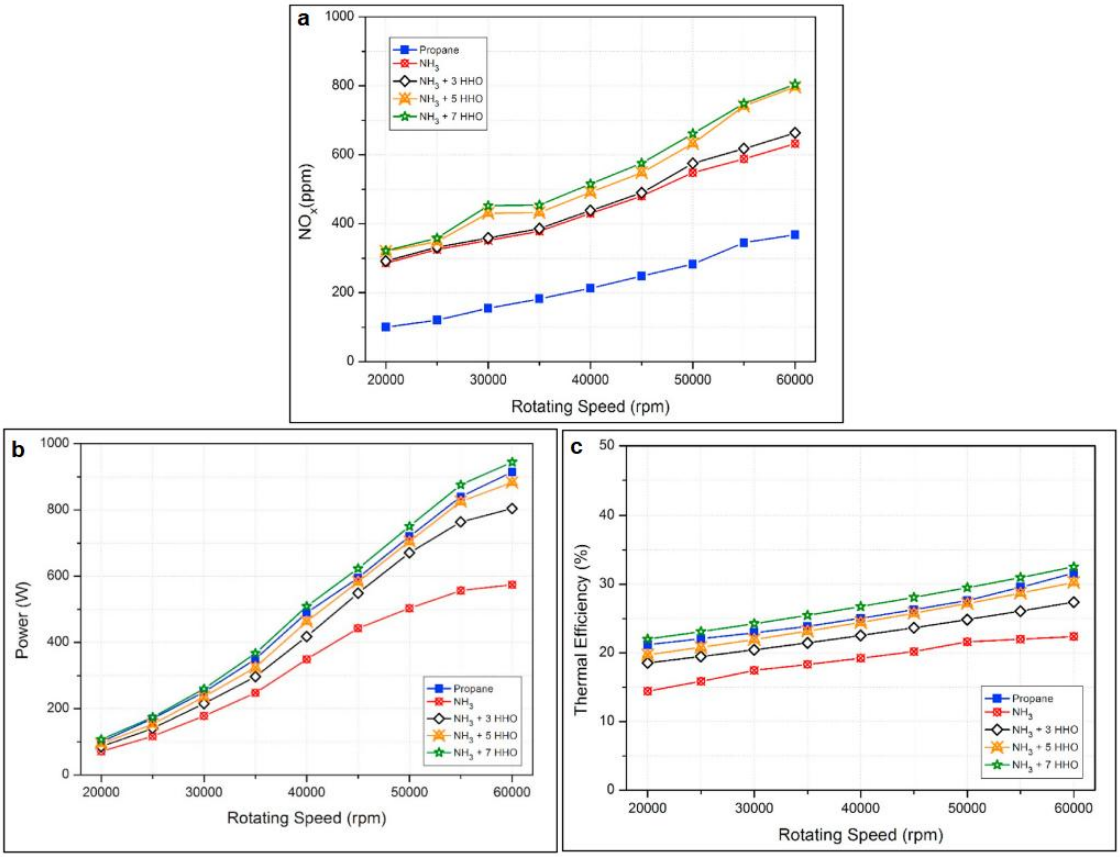

Figura 19. Resultados obtenidos en las pruebas realizadas por Kenanoglu et al: a) emisiones de NOx, b) potencia al freno y c) eficiencia térmica, para diferentes velocidades de rotación [43]

Kurata et al (2017) probaron una microturbina de 50 kW con NH_3 y mezclas NH_3/CH_4. El sistema incluye vaporizador, compresor y control de NOx vía SCR (ver Figura 20). La combustión se inicia con keroseno y se reemplaza gradualmente por NH_3 [44]

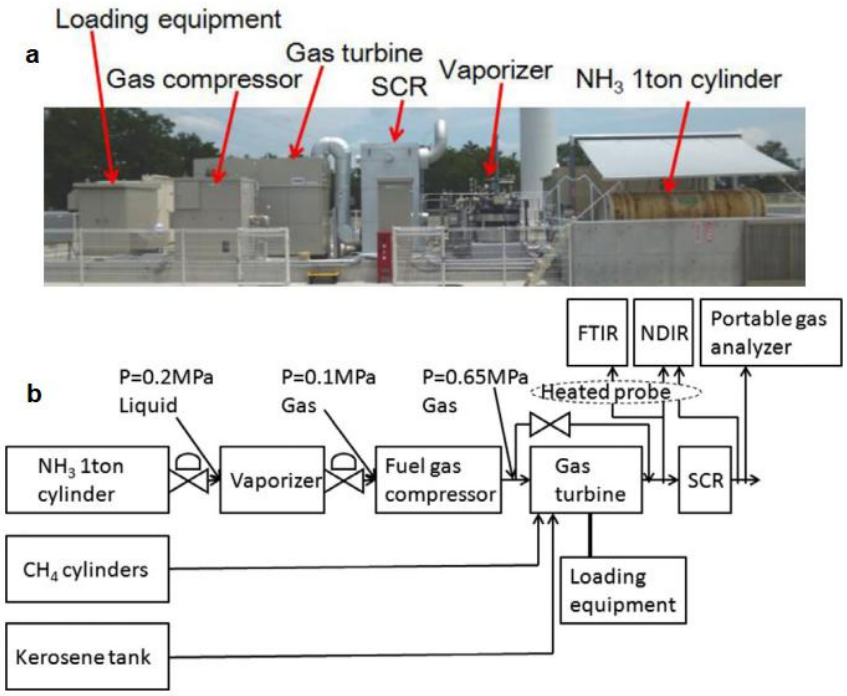

Figura 20. Instalación utilizada en las pruebas realizadas por Kurata et al (2017): a) diagrama de la instalación, b) fotografía de la instalación[44]

El quemador diseñado opera sin premezcla, con 12 orificios de NH_3 alrededor del inyector de keroseno (ver Figura 21)[44]

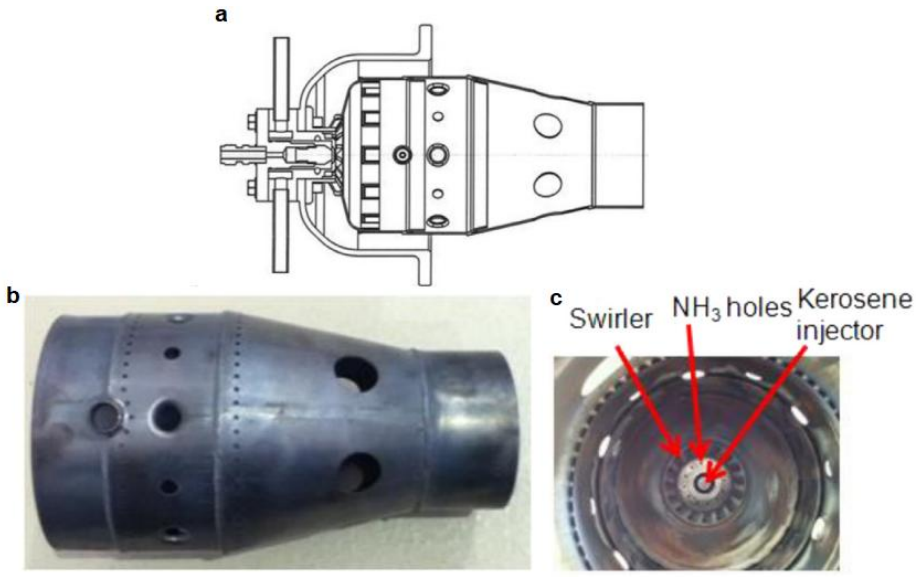

Figura 21. Prototipo de la cámara de combustión para la operación con amoniaco: a) esquema del prototipo, b) fotografía del quemador en vista lateral, c) fotografía del swirler y puertos de inyección de amoniaco y keroseno.

La mezcla NH_3/CH_4 mejora eficiencia térmica y de combustión comparada al uso exclusivo de NH_3. A mayor concentración de NH_3 aumentan los NOx, pero luego disminuyen por reducción con NH_3 residual. [44]. En general, este caso demuestra que es posible operar una turbina de gas utilizando solamente amoniaco, sin embargo, la pérdida de potencia y el aumento en la concentración de NOx en los gases de escape resaltan el potencial en el uso de mezclas de amoniaco con hidrocarburos sobre el amoniaco puro.

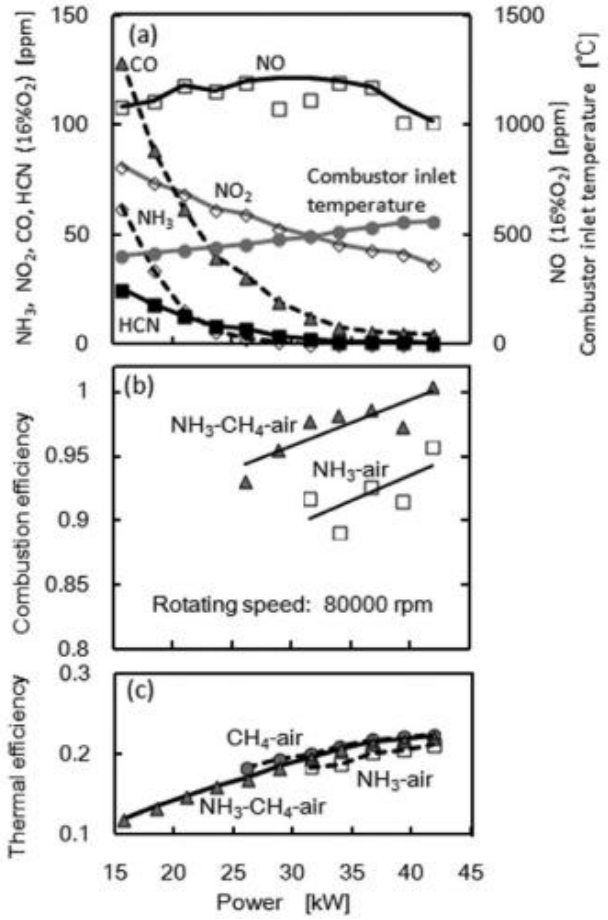

Figura 22. Desempeño de la turbina operando a diferentes potencias: a) concentración de emisiones con mezcla NH3/CH4, b) eficiencia de combustión y c) eficiencia térmica de la turbina operando con NH3-aire, NH3-CH4-aire y CH4-aire [44].

3.2. Combustión en medios porosos inertes.

Los medios porosos son estructuras que consisten en una fase sólida que forma concavidades interconectadas en las cuales se aloja un fluido que interactuará con ella. Gracias a esto, los medios porosos han ocupado diversas funciones, como filtros, soporte de catalizadores, membranas, entre otras. Las propiedades que influencian en todos estos usos son la topología usada y la densidad relativa (relación entre la densidad de la estructura porosa y la densidad del material con el que está hecha), además de las propiedades del material usado [45]. Estos se identifican de acuerdo con la cantidad de poros por unidad de longitud o de área y el porcentaje de porosidad, que representa el porcentaje de área abierta.

Normalmente los quemadores son diseñados para generar una llama de la cual se extrae la energía térmica a usar, estas se caracterizan por tener una zona de reacción muy delgada, produciendo un alto gradiente de temperatura a través del frente de llama. Este pequeño espesor de la zona de reacción es resultado de la baja conductividad térmica del gas, generando una combustión ineficiente que implica una mayor formación de contaminantes. Por otra parte, la interacción de las fases sólida y gaseosa incentiva la formación de muchas micro llamas contenidas en los poros de la matriz sólida inerte, esto potencia los mecanismos de transferencia de calor, lo cual promueve una combustión más eficiente y una disminución de emisiones contaminantes [46]. Los quemadores de medios porosos inertes generan una recirculación de calor desde los productos de combustión hacia los reactivos. Estos al precalentarse amplían sus límites de inflamabilidad y aumentan su velocidad de deflagración además de la temperatura máxima que pueden alcanzar al liberar su energía química, lo cual se traduce en un aumento de la densidad energética y un mayor rango de operación de mezclas de aire-combustible. [12]. Por su cualidad de generar altas densidades de energía, los quemadores de medios porosos son identificados de acuerdo con el rango de potencia especifica en el que operan, es decir, la potencia por unidad de área. Variando desde los 100 kW/m2 hasta 2000 kW/m2. [11]

Se pueden distinguir dos modos de operación para los quemadores en medios porosos; La combustión estabilizada en la superficie (Figura 23a), cuando el frente de llama se propaga aguas arriba hacia el medio cerámico y se enfría en su cercanía, generando como consecuencia una disminución de la velocidad de deflagración, equilibrándose esta con la velocidad de descarga y

estabilizándose en la superficie o parcialmente sumergida. Para que esto ocurra, la porosidad del medio sólido debe ser tal que impida el desplazamiento del frente de llama aguas arriba o añadiendo una malla metálica en la superficie para cumplir el mismo fin. [11]

El segundo modo se conoce como combustión sumergida o de superficie radiante (Figura 23b), en su operación se pueden distinguir dos secciones, la zona de precalentamiento, donde la porosidad del medio impide la propagación de la llama aguas arriba mientras que la fase sólida precalienta los gases que ingresan a la segunda zona, la de reacción. En esta segunda sección se libera la energía química contenida en el combustible. Cuenta con un medio sólido inerte de una porosidad mucho mayor que permite contener la llama en su interior. En algunos casos se añade una tercera zona, de gases inquemados, donde se aprovecha el calor que fluye aguas abajo. [46]

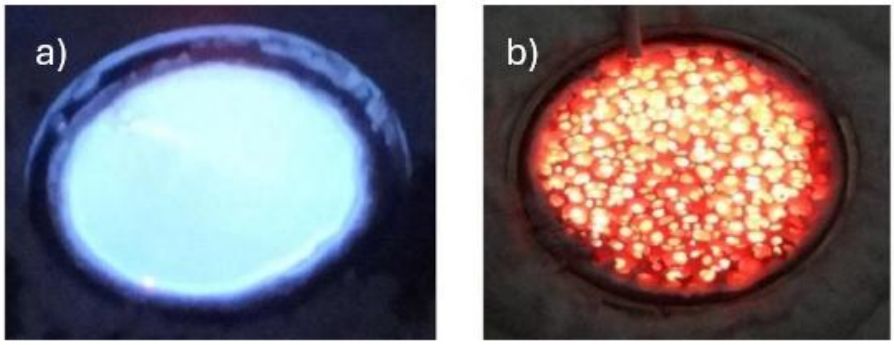

Figura 23. Combustión en medio poroso inerte. a) Estabilizado en la superficie [11]. b) Combustión sumergida [13].

En el estudio realizado por Iral et al [13] donde se utiliza un quemador de medio poroso radiante de aire inducido a 1550 m sobre el nivel del mar, el cual cuenta con un honeycomb monolítico de alúmina de 64 mm de diámetro con una densidad de poros de 400 ppi y 3 espesores (7, 15 y 20 mm), seguido de una zona de reacción de carburo de silicio de 64 mm de diámetro y 20 mm de espesor, con una densidad de poros de 10 ppi, equivalente a una porosidad del 90%. El inyector empleado posee un diámetro de 0.71 mm y el combustible usado es gas natural de cilindros a alta presión (200 bar). En la Figura 24 se observa un esquemático del quemador utilizado.

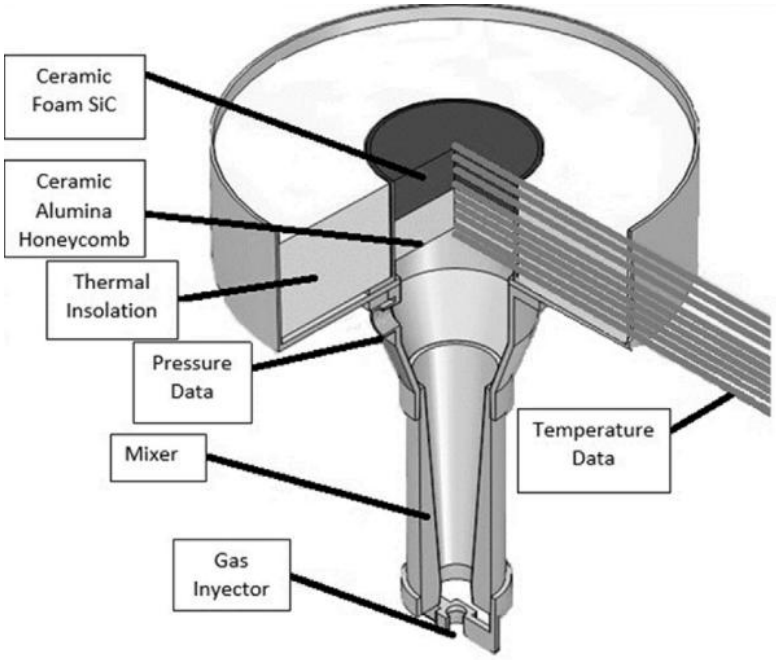

Figura 24. Esquemático del quemador de medio poroso inerte de aire inducido empleado por Iral et al [13]

Se realizan pruebas a 370, 480 y 670 kW/m^2 con presiones de descarga de 30, 50 y 100 mbar respectivamente utilizando los tres espesores en la zona de precalentamiento. En estas, se determina la eficiencia térmica, eficiencia de radiación, el perfil de temperatura, emisiones contaminantes, la tasa de aireación primaria y la caída de presión en frío y en caliente (sin combustión y con combustión).

Para determinar la eficiencia térmica se procede según la norma NTC 2832. El gas natural pasa a través de un regulador de presión antes de ingresar al rotámetro. Las pruebas se realizan calentando 3.7 kg de agua en una olla de aluminio a una temperatura máxima de 90°C. El perfil de temperatura se determina con 9 termocuplas tipo S. Las concentraciones de las emisiones contaminantes (CO y NOx) se obtienen mediante un analizador de gases SICK MAIHAK s710. Para obtener la tasa de aireación primara se mide la concentración de CH_4 en la premezcla. La caída de presión se determina a partir de las propiedades de los medios porosos y del gas en función de su temperatura. La Figura 25 ilustra el montaje experimental empleado.

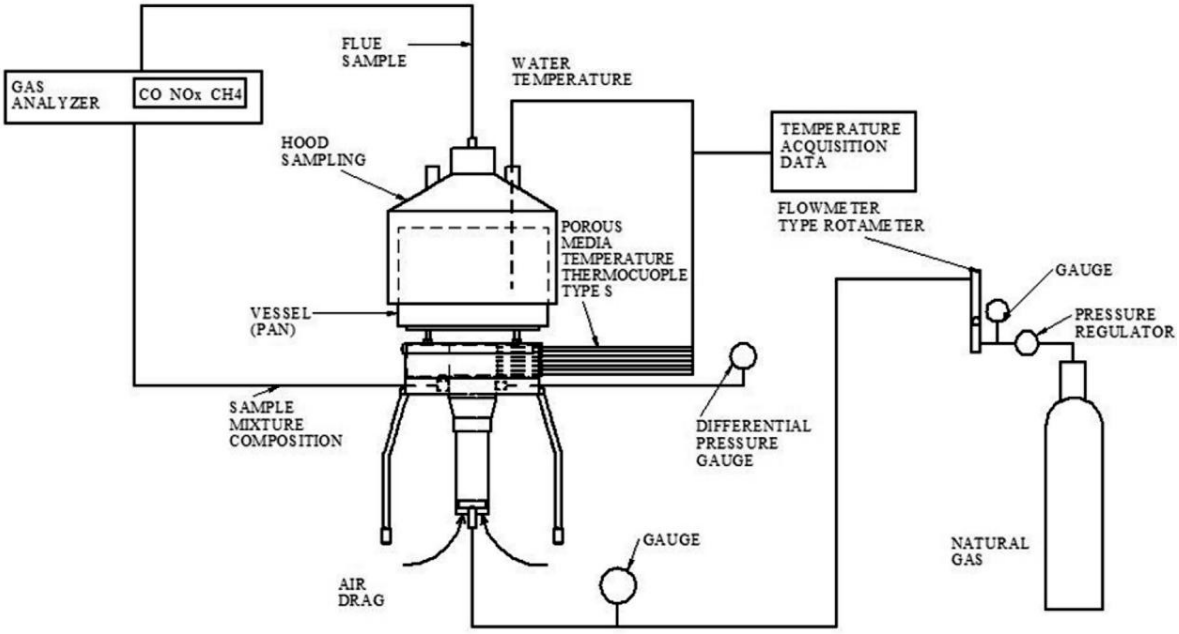

Figura 25. Montaje experimental empleado por Iral et al para determinar la eficiencia térmica, emisiones contaminantes, tasa de aireación primaria y la caída de presión a lo largo del medio poroso. [13]

Para medir la eficiencia de radiación, se modificó el anterior montaje ubicando el quemador en posición horizontal, empleando la medición multipunto propuesta por Mital et al [47] en un cuarto del área que ocupa la olla usada para determinar la eficiencia térmica mediante la ecuación (3.3). Con una distancia de 110 mm entre el radiómetro y el quemador para evitar la transferencia de calor por convección, como se ilustra en la Figura 26. El radiómetro utilizado es el modelo SBG01 de la compañía Huskeflux, con un límite de medición máxima de 5kW/m^2 y contiene un indicador LI19 con una sensibilidad de 0.001 mv. Este tiene un restrictor con un ángulo de 14° y un diámetro interno de 20 mm [13].

$$Flux_{total} = \sum Flux_{punto} \qquad (3.1)$$

$$Q_R = 4Flux_{total} A_R N_R \qquad (3.2)$$

$$\eta_R = \frac{Q_R}{P_T} \qquad (3.3)$$

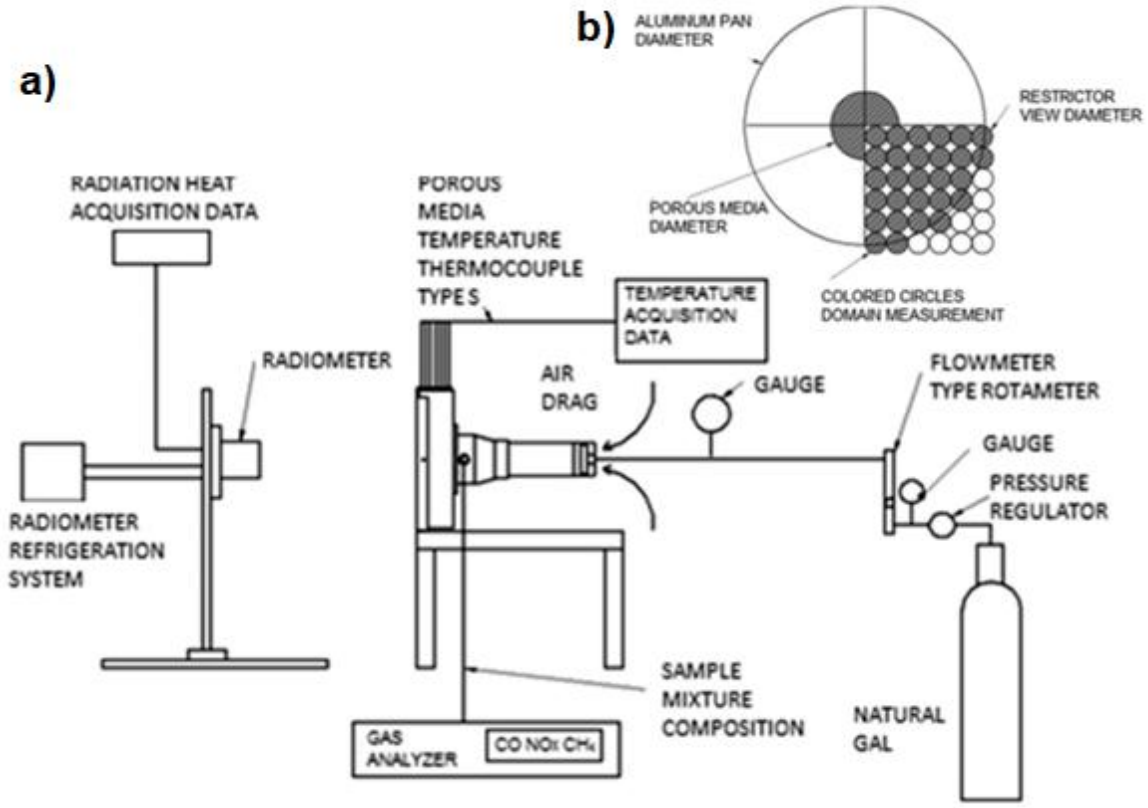

Figura 26. Montaje experimental para medir la eficiencia de radiación utilizado por Iral et al [13]

En general, el estudio muestra que la caída de presión aumenta cuando hay combustión, además, como consecuencia se disminuye la tasa de aireación primaria. También se logró determinar que la tasa de aireación primara no depende del impulso generado por la descarga del combustible cuando los parámetros geométricos del quemador permanecen constantes. En cuanto al perfil de temperatura, se observó que a 370 y 480 kW/m^2 la reacción se encuentra anclada a la zona de precalentamiento, mientras que a 670 kW/m^2 la reacción alcanza a realizarse en parte de la zona de precalentamiento cuando esta posee un grosor de 15 y 20 mm. Cuando se compararon los perfiles de temperatura a diferentes potencias con diferentes espesores en la zona de precalentamiento se logró distinguir que el quemador con 15 mm de espesor en la zona de precalentamiento obtuvo las mayores temperaturas, lo cual es un indicio de una mejor eficiencia de recirculación de calor respecto a los experimentos realizados con 7 y 20 mm en dicho espesor [13].

Respecto a la eficiencia térmica, el quemador con zona de precalentamiento de 15 mm con una potencia de 370 kW/m^2 alcanza la máxima eficiencia térmica alcanzada en todas las pruebas. En el estudio se realizaron pruebas con un quemador atmosférico doméstico comercial, el cual logró un 4% más de eficiencia. Esto debido a que la zona de reacción en el medio poroso no permite el ingreso de aire secundario, ya que el oxígeno presente en el aire primario no es suficiente para lograr la oxidación completa del combustible además de la baja temperatura de los gases aguas abajo, lo cual se manifiesta en la alta concentración de CO, que excede los 1000 ppm permisibles en quemadores atmosféricos. Sin embargo, las bajas temperaturas aguas abajo desincentivan la formación de NO_x, con un máximo alcanzado de 32 ppm para el quemador de 15 mm de espesor de precalentamiento a 480 kW/m^2 [13].

Por otra parte, las mediciones experimentales demostraron que, si la potencia de operación permanece constante, entonces la eficiencia de radiación depende del espesor o altura de la zona de calentamiento. Esta muestra una tendencia decreciente a medida que aumenta la eficiencia térmica. En el caso del quemador con 20 mm de espesor en la zona de precalentamiento se obtuvo la mayor eficiencia de radiación respecto a las otras configuraciones con un 32%, lo cual corresponde a un 75% de la energía transferida, reflejando la predominancia de la transferencia de calor por radiación en este tipo de quemadores [13].

En otro estudio experimental presentado por Arrieta C et al. [12] se estudia el efecto de la sustitución del gas natural en un 50% con diferentes mezclas de hidrógeno y monóxido de carbono de alta pureza emulando tres gases de síntesis con relaciones de H_2/CO de 1.5, 2 y 3. Esto, en un quemador de medio poroso inerte que cuenta con una zona de precalentamiento alúmina con diámetro de 70 mm y 19 mm de espesor, cuyo diámetro de poros de 1 mm, equivale a un 3% de porosidad. La zona de combustión es de carburo de silicio, de 70 mm de diámetro y 20 mm de espesor, con una densidad de poros de 10 ppi (90% de porosidad). El flujo de los combustibles y el aire se controla a partir de un rotámetro calibrado específicamente para cada gas, que luego ingresan a un mezclador, de donde se obtiene la mezcla deseada para cada punto de operación. En este estudio se mide el perfil de temperatura a lo largo del medio poroso utilizando 3 termocuplas tipo S en la zona de combustión y 3 tipo K en la zona de precalentamiento, además de una termocupla tipo S en la interfase. Se determina la eficiencia de radiación con una termocupla tipo

S en contacto con la superficie exterior del medio poroso, teniendo en cuenta que este radia de forma similar a un cuerpo negro. Si bien los quemadores de medio poroso radiante presentan 3 fuentes de radiación (llama, medio poroso y gases de escape), no se tiene en cuenta la radiación proveniente de los gases de escape debido a la falta de un sistema de confinamiento. Por simplicidad, sólo se tiene en cuenta la radiación del medio poroso al determinar la eficiencia de radiación, la cual se puede obtener por medio de la ecuación (3.4). Por otra parte, también se realiza seguimiento de la concentración de las emisiones. Por medio de una probeta refrigerada por agua ubicada a 5 cm del centro del quemador, recibiendo el flujo de gases aguas abajo, se hace seguimiento de las concentraciones de O_2, NO_x, CO_2 y CO. Debido a la dilución con el aire, este último valor es ajustado para una concentración de CO al aire libre. La Figura 27 presenta un esquema del montaje experimental empleado [12]

$$\eta_R = \frac{\varepsilon\sigma\left(T_{sup}^4 - T_\infty^4\right)}{P_o} \qquad (3.4)$$

Donde:

ε: Emisividad del medio poroso.

σ: Constante de Stefan-Boltzmann (5,67 x10^{-8} W/m^2-K^4)

T_{sup}: Temperatura superficial del medio poroso [K]

T_∞: Temperatura ambiente [K]

P_o: Potencia especifica de operación [kW/m^2]

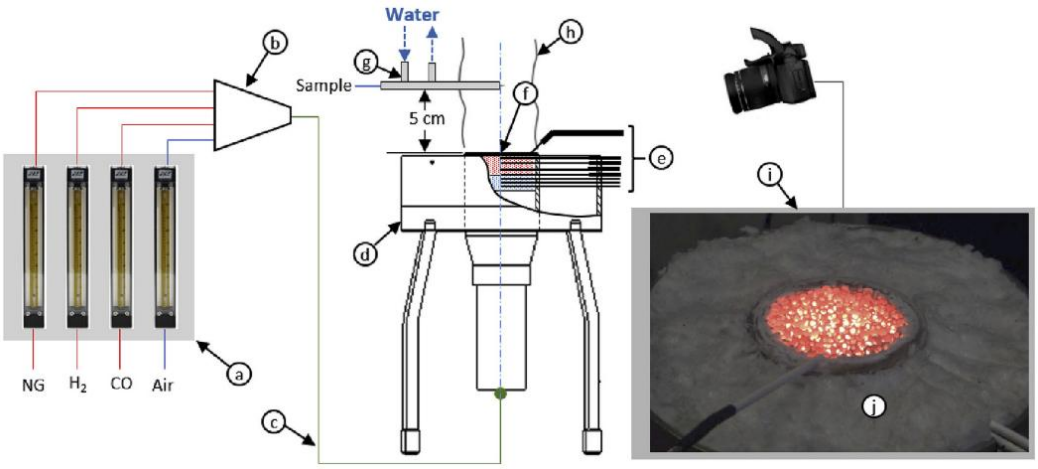

Figura 27. Montaje experimental empleado por Arrieta C et al. [12] y sus componentes: a) rotámetros, b) mezclador de gases, c) mezcla aire-combustible, d) quemador, e) termocuplas, f) medio poroso, g) probeta refrigerada, h) productos de combustión, i) imagen del quemador y j) manta aislante.

El quemador es operado a 300, 400 y 500 kW/m^2 desde temperatura ambiente hasta alcanzar el estado estable (60 a 75 min), utilizando las 3 mezclas de gas natural con los gases de síntesis mencionados anteriormente además del gas natural como caso base de comparación, sobre los que se presenta un rango de estabilidad variando la relación de equivalencia hasta un valor máximo de Ø = 1. Identificando los puntos donde se presenta desprendimiento de la llama o retrollama se logra trazar un mapa de estabilidad para la operación del quemador con los diferentes combustibles empleados en el estudio, el cual se presenta en la Figura 28. Si bien se marca un límite de desprendimiento de llama en Ø = 1 para el gas natural, en este punto no se presentó dicho fenómeno. Sin embargo, las mezclas de gas natural con gas de síntesis sí presentaron retrollama antes del punto estequiométrico operando con potencias mayores a 300 kW/m^2, esto debido al aumento de la velocidad de deflagración por la adición de hidrógeno en la mezcla y su aproximación al punto estequiométrico, donde tiende a ser el punto de mayor velocidad de deflagración. La adición de una mayor proporción de hidrógeno induce a que el fenómeno de la retrollama ocurra para relaciones de equivalencia desde 0,7 cuando se opera a 500 kW/m^2. Por otra parte, las mezclas de gas natural con hidrógeno presentan desprendimiento de llama a relaciones de equivalencia cada vez menores a medida que aumenta la proporción de hidrógeno en la mezcla. Es de mencionar que las mezclas de gas natural con gas de síntesis con proporciones de H_2/CO de 2 y 3 presentan desprendimiento y retrollama en los mismos puntos. [12]

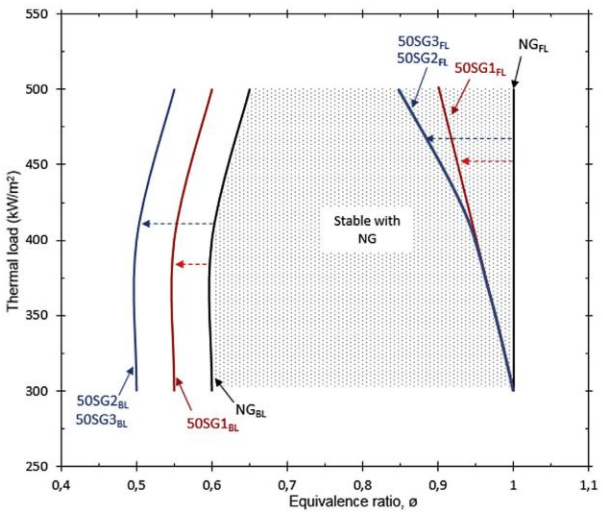

Figura 28. Diagrama de estabilidad presentado por Arrieta C et al [12]. FL: Retrollama. BL: Desprendimiento. NG: gas natural. 50SG1, 50SG2, 50SG3: mezclas con 50% gas natural y 50% gas de síntesis con relaciones de H_2/CO de 1.5, 2 y 3 respectivamente.

Puesto que la turbulencia en un medio poroso radiante no es suficiente para afectar la velocidad de deflagración laminar, distribución de temperatura y transferencia de calor por convección, los flujos se caracterizan considerando que son laminares y por lo tanto su velocidad de deflagración será la de un flujo laminar [12]. Por esta razón, en el estudio mencionado se presenta un diagrama de la relación entre la velocidad de deflagración (S_L) y la velocidad del flujo (V_u) contra la relación de equivalencia (Ø). En la Figura 29 se puede observar que la zona de desprendimiento de llama se encuentra cuando $\frac{S_L}{V_u} < 1$.

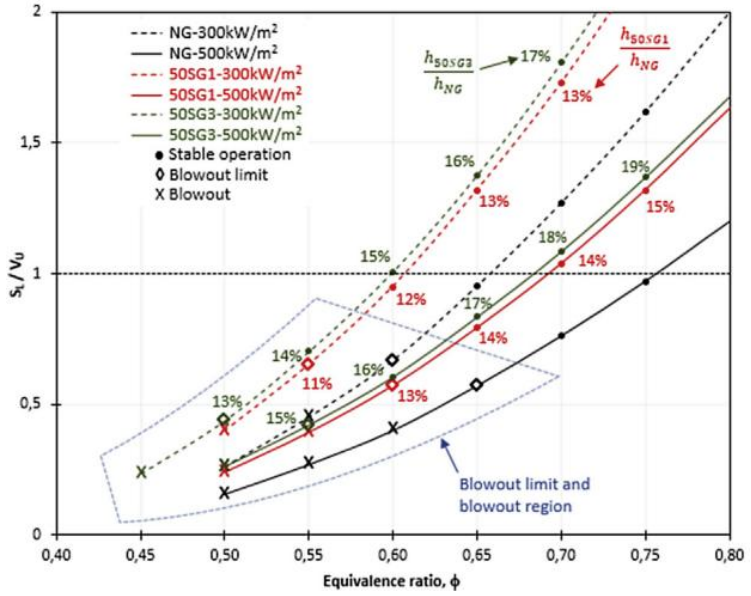

Figura 29. Diagrama de estabilidad de llama respecto a la relación entre la velocidad de deflagración laminar y la velocidad del flujo presentado por Arrieta C et al [12]

Desde el momento de la ignición se evidencian 3 etapas; La primera cuando S_L es un poco menor a V_u ($S_L < V_u$). Durante esta etapa la llama avanza aguas arriba hasta que alcanza la superficie de la zona de combustión. En la etapa 2 ($S_L > V_u$), debido al acercamiento de la llama a la superficie del medio poroso, se genera una transferencia de calor hacia el medio poroso, que a su vez precalienta la mezcla de aire-combustible, aumentando su velocidad de deflagración laminar y, en consecuencia, la llama empieza a penetrar el medio poroso. En la etapa final ($S_L \gg V_u$), la temperatura en el medio poroso es mayor y, por lo tanto, también aumenta la transferencia de calor hacia la premezcla de gases [12]. En este punto la velocidad de deflagración laminar de la premezcla es mucho mayor que la velocidad de salida de los gases generando una llama al interior del medio poroso. La Figura 30 presenta fotografías de cada una de las etapas. En el estudio de

Arrieta C et al [12] se reporta que cuando se opera en la zona de desprendimiento de llama ($\frac{S_L}{V_u} < 1$) esta no alcanza a completar la primera etapa, pues se desprende inmediatamente. También se reporta que cuando $1 < \frac{S_L}{V_u} < 3$, el proceso de estabilización llega inmediatamente a la etapa 2. Mientras que cuando $\frac{S_L}{V_u} > 3$ la llama se estabiliza directamente en la etapa 3. [12]

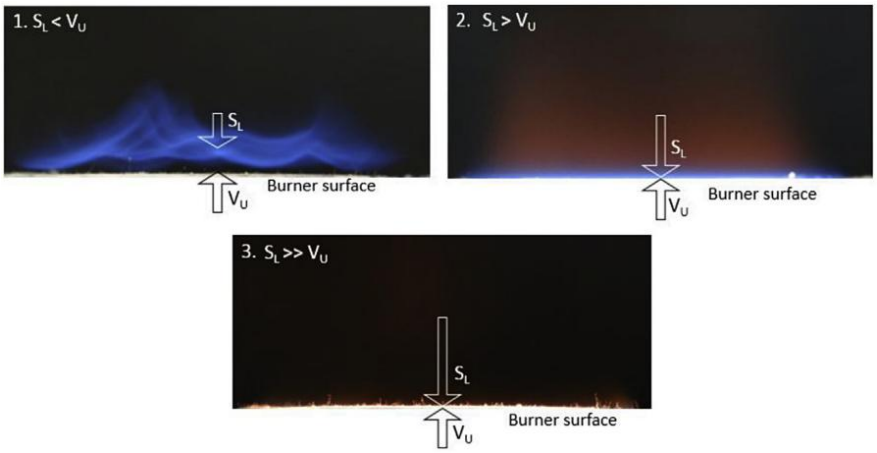

Figura 30. Propagación y estabilización de la llama sobre la superficie de un medio poroso [12]

Respecto al perfil de temperatura, se observa que en general se alcanzan valores mayores cuando se usan mezclas con más contenido de hidrógeno, además, esta aumenta con la potencia y la relación de equivalencia. Todos estos factores influyen en la temperatura de llama adiabática de la premezcla. Este aumento de la temperatura mejora la transferencia de calor hacia la fase sólida, y por ende aumenta la radiación emitida. Sin embargo, cuando se aumenta la potencia térmica, disminuye la eficiencia de radiación, esto se puede atribuir al aumento en la velocidad de la fase gaseosa, que reduce el tiempo de residencia de los gases en el medio poroso, lo cual dificulta el aumento de la temperatura del medio poroso. Este efecto sobre la eficiencia de radiación al aumentar la potencia se atenúa en las mezclas de gas natural con gases de síntesis con relaciones de H_2/CO de 2 y 3 [12].

En general, para la mayoría de los puntos de operación estudiados por Arrieta C et al. Las emisiones de CO no superaban los 50 ppm. Sin embargo, en los puntos cercanos a la zona de

desprendimiento de llama las emisiones alcanzaron los 136 y 190 ppm para mezclas de gas natural con gases de síntesis con relación de H_2/CO de 2 y 3 respectivamente. [12]

3.3.1 Combustión de amoniaco en medios porosos inertes

Como se ha mencionado anteriormente, las propiedades de combustión del amoniaco presentan un obstáculo en cuanto a la estabilización de las llamas, la energía entregada y las emisiones de NO_x. Sin embargo, al utilizar quemadores de medios porosos inertes estas propiedades se ven mejoradas, lo que permite la utilización del combustible en un mayor rango de operación estable, aumentando la densidad de energía y disminuyendo las emisiones contaminantes. En 2017 Nozari H et al [48] reportaron pruebas con mezclas de hidrógeno y amoniaco en altas concentraciones en un quemador de medio poroso inerte de carburo de silicio de 7.62 cm de diámetro, 7 cm de altura y 10 poros por pulgada, encerrado en una cámara de acero inoxidable con una ventana de cuarzo. La base de la cámara mide 194 X 200 mm y tiene 640 mm de altura. Los gases ingresan al medio poroso mediante un tubo de alimentación de 22.3 mm de diámetro interior, con una proporción de longitud/diámetro de 50 para asegurar un flujo totalmente desarrollado en la entrada del quemador. Aguas arriba del tubo de alimentación se usa un atrapallamas para evitar que una retrollama pueda ocasionar daños en los equipos. Dos controladores de flujo regulan el flujo de hidrógeno y amoniaco al 99.9% de pureza que ingresan en las proporciones deseadas a una cámara de mezclado junto con aire seco, cuyo flujo se controla mediante un rotámetro. Se emplea una termocupla tipo R para medir la temperatura a 30 mm aguas abajo del quemador. A la salida de la cámara se toma una muestra de los gases de escape y medir la concentración de NO_x. Adicionalmente, la técnica de quimioluminiscencia de OH* se utiliza como una herramienta confiable para evaluar el comportamiento de las llamas, incluyendo su forma. La distribución de los radicales OH* permite identificar con precisión la ubicación de la combustión y la forma de la llama, que se espera que ocurra aguas abajo del medio poroso. Se capturan imágenes bidimensionales promedio en el tiempo mediante una cámara intensificada HiSense MkII CCD, equipada con un filtro de banda que detecta luz a una longitud de onda de 310 nm. La cámara tiene una resolución de 1600x1200 píxeles. Para cada imagen, el sensor se activa durante 10 ms, registrándose un total de 500 imágenes para promediar y eliminar el ruido de fondo. Se realizan pruebas con concentraciones de amoniaco del 60 al 90% y relaciones de equivalencia entre 0.9 y 1.5, con un rango de velocidades de entrada de 4 a 18 m/s. Cabe resaltar que el quemador

no generaba llamas estables para premezclas con 100% amoniaco. La Figura 31 presenta un diagrama del montaje experimental [48]

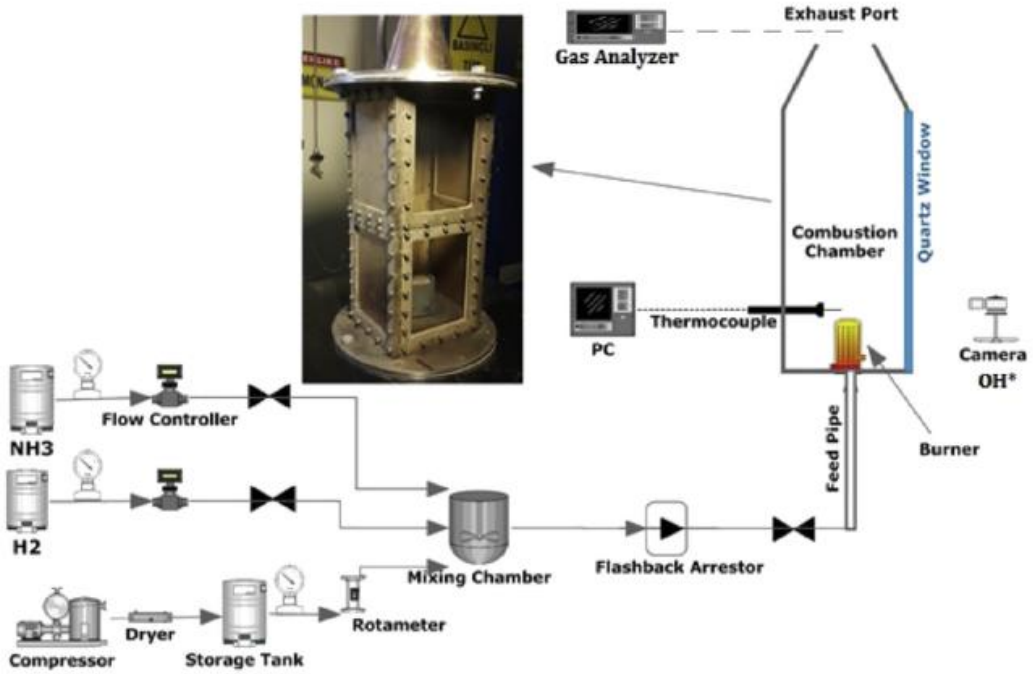

Figura 31. Diagrama del montaje experimental y cámara de combustión empleados por Nozari H et al [48]

En el estudio señalado se determinó que la máxima temperatura de llama se alcanza en mezclas estequiométricas, además de que esta temperatura también decrece a medida que aumenta la concentración de amoniaco en la mezcla de combustibles. En la Figura 32 se señala que las temperaturas obtenidas son significativamente menores a la de llama adiabática, por lo tanto, realizaron modelos numéricos que confirman las pérdidas por transferencia de calor hacia las paredes del quemador. Sin embargo, las temperaturas obtenidas en dicho modelo numérico eran alrededor de un 5% superiores a las que se reportan en la experimentación, por lo tanto, se cree que esta diferencia en la temperatura se debe a la incompletitud de la combustión. Asumiendo esto, se presenta la eficiencia de la combustión como una razón entre la temperatura medida en el experimento y la temperatura en el modelo numérico. La Figura 32 presenta las temperaturas reportadas por Nozari H et al. [48]

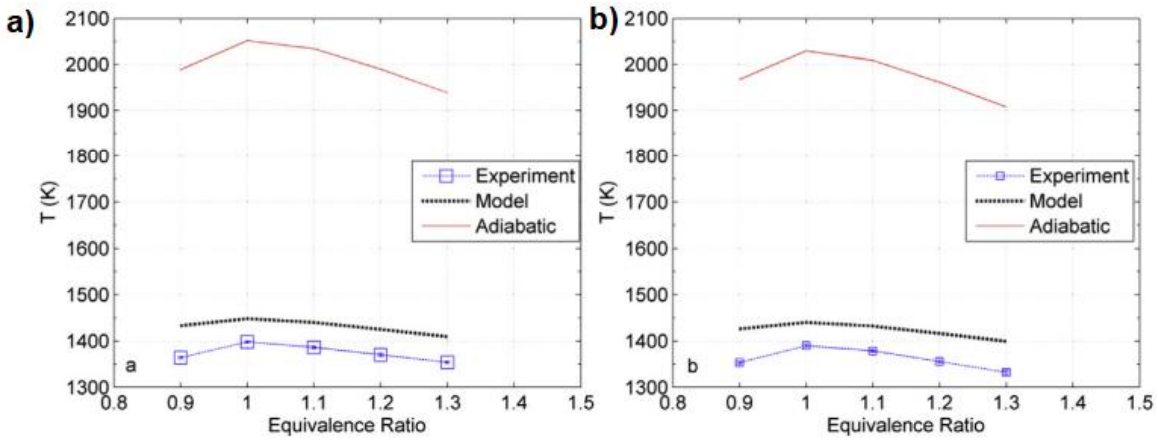

Figura 32. Temperaturas adiabáticas, experimentales y numéricas respecto a la razón de equivalencia para mezclas con a) 70% NH_3 y b) 80% NH_3 reportadas por Nozari H et al [48]

Por otra parte, define el índice de temperatura como la razón entre la temperatura medida y la temperatura adiabática de la llama para la razón de equivalencia a la cual se está operando (ecuación 3.5). Mediante este índice se puede establecer si las pérdidas reportadas corresponden a una deficiencia en la combustión o a las pérdidas de calor y permite conocer en qué puntos de operación la combustión es más completa. A pesar de que se presenta una tendencia a disminuir dicho índice a medida que aumenta la temperatura de la llama, este decrecimiento es de apenas un 2% La presenta los índices de temperatura reportados por Nozari et al [10]

$$(T_{indx})_i = \left(\frac{T_{medida}}{T_{ad}}\right)_i \qquad \text{(ecuación 3.5)}$$

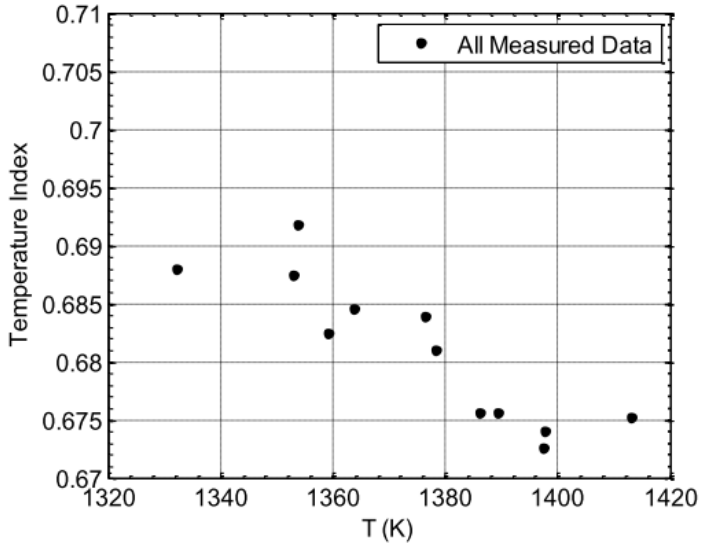

Figura 33. Índices de temperatura respecto a la temperatura medida reportados por Nozari et al [10]

En el estudio, el autor define la eficiencia de combustión mediante la relación entre la temperatura máxima obtenida en el modelo numérico y la temperatura máxima registrada experimentalmente. La Figura 34 muestra que las eficiencias de combustión son superiores al 95% para todas las mezclas, lo cual respalda a los quemadores de medio poroso como una alternativa prometedora para la generación de potencia en aplicaciones prácticas. Se observa también que al aumentar la concentración de amoniaco disminuye la eficiencia de combustión, debido al decrecimiento en la velocidad de combustión de la premezcla al poseer menores proporciones de hidrógeno [48].

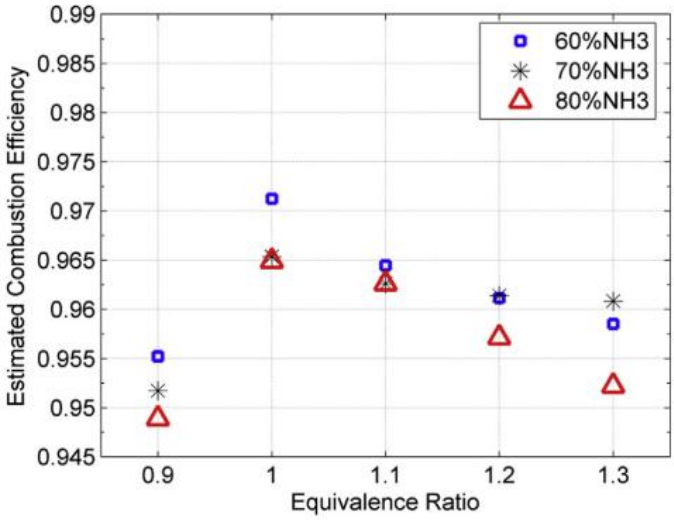

Figura 34. Eficiencias de combustión reportadas por Nozari H et al [48]

En el trabajo experimental mencionado se estudió la estabilidad de la llama determinando los límites superior e inferior. Esto se realiza cambiando la velocidad de salida del gas en el tubo de alimentación desde un punto estable hasta que se presente la inestabilidad para cada razón de equivalencia, en cada mezcla de combustibles. Se determinó que en el límite inferior se pueden presentar dos fenómenos, de retrollama para mezclas cercanas a la estequiométrica y de extinción para mezclas ricas. El primero se debe al aumento de la velocidad de deflagración laminar por encima de la velocidad de descarga de los gases, el segundo es debido a dos mecanismos paralelos; A medida que la mezcla se acerca al límite inferior, la combustión ocurre en un punto más cercano a la entrada de los gases, lo que disminuye la distancia en la que los gases pueden precalentarse antes de reaccionar, por lo tanto, disminuye la velocidad de deflagración. Puesto que se disminuye la velocidad a la que la mezcla reacciona, también se afecta la tasa de liberación de calor, la cual

llega a ser menor al calor liberado en pérdidas al entorno, lo cual imposibilita la continuación de la reacción y se presenta la extinción de la llama [48]. Se observa también que el límite inferior disminuye al aumentar el contenido de amoniaco en la mezcla, lo que amplía los puntos en los que puede operar el quemador. Para el límite superior se realizó un procedimiento similar al usado para determinar el límite inferior, pero a la inversa. Es decir, aumentando la velocidad de salida de los gases para la misma razón de equivalencia. En este caso el límite se establece cuando la llama presenta inestabilidades, si se aumenta sólo un poco la velocidad de entrada de los gases al quemador, las oscilaciones aumentarán y la llama eventualmente se desprenderá. En mezclas con 90% amoniaco no se alcanzó el límite de desprendimiento para razones de equivalencia superiores a 1.1. Esto debido a que se excedía el límite de flujo máximo que podía entregar el controlador de flujo de amoniaco. La Figura 35 presenta los diagramas de estabilidad obtenidos por Nozari H et al [48].

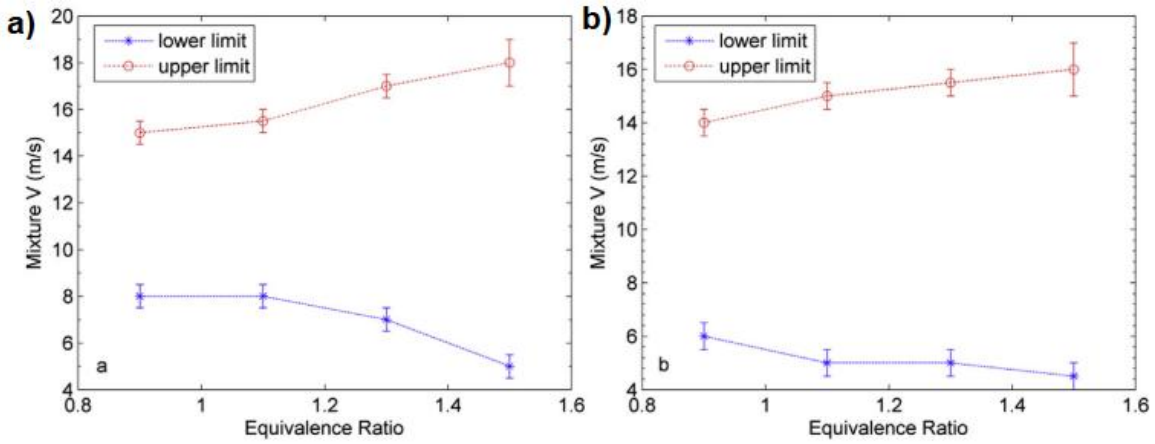

Figura 35. Diagramas de estabilidad (en rojo el límite para desprendimiento y en azul para retrollama) para a) 60% NH_3 y b) 70% NH_3 reportados por Nozari H et al [48]

Se comparó también la capacidad que tiene el quemador para sostener la llama a mayores velocidades respecto a otro quemador de prueba (dumb combustor) con las mismas características del quemador usado previamente, pero con 18 cm de altura. Esto usando la velocidad normalizada respecto a la velocidad de deflagración laminar teórica en cada punto. En la Figura 36 se presenta la comparación gráfica de los límites superiores de cada quemador. En esta se evidencia un mínimo para una razón de equivalencia de 1.1, esto debido a que en este punto se presenta la máxima velocidad de deflagración laminar. Otro aspecto para resaltar es que el quemador de 7 cm de altura presenta un límite superior a velocidades un 40% mayores que el quemador de 18 cm [48]. Además,

como se ha mencionado antes, el aumento en la concentración de amoniaco aumenta el límite superior de estabilidad.

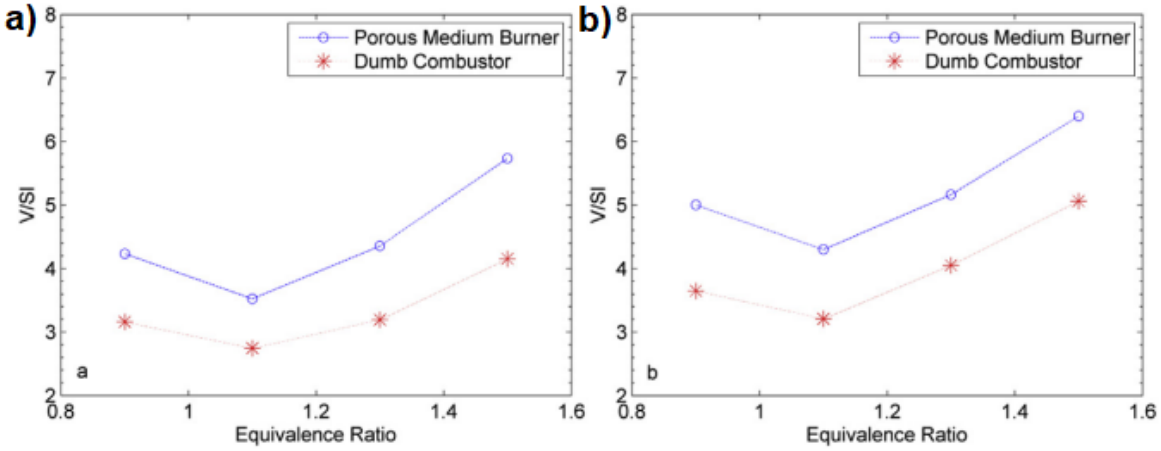

Figura 36. Límite superior respecto a la velocidad de la mezcla normalizada a diferentes razones de equivalencia en mezclas con a) 60% NH_3 y b) 70% NH_3 [48]

Respecto a la concentración de emisiones de NO_x para una mezcla de combustibles con 80% amoniaco, se reportó un máximo cuando la razón de equivalencia es cercana a la estequiométrica, con tendencia a disminuir a medida que se enriquece la mezcla, esto hasta reportar 35 ppm para una razón de equivalencia de 1.5 [48].

4. METODOLOGÍA

Este estudio principalmente experimental plantea investigar el desempeño de un quemador de medio poroso diseñado por el grupo GASURE de la Universidad de Antioquia mientras es operado con amoniaco. Sin embargo, se incluye una metodología numérica con la cual se calculan algunas propiedades de la combustión de amoniaco no identificadas en la literatura consultada.

4.1. Estimación teórica de algunas propiedades de combustión del amoniaco.

Se plantea una metodología numérica con la cual se pretende identificar las propiedades ideales de la combustión del amoniaco, es decir, usando una reacción global de un paso con combustión completa, estequiométrica y sin emisiones de NO_x, con reactivos a 25°C y 1 atm (ecuación 4.1).

$$NH_3 + 0.75(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 1.5H_2O + 3.32N_2 \qquad (4.1)$$

A partir de estas proporciones estequiométricas se puede calcular el volumen y la masa estequiométrica de aire, el volumen y la masa de humos húmedos, el volumen y la masa de humos secos, el volumen y la masa de agua en los humos y la temperatura de rocío. Además, a partir de algunos datos recopilados del estado del estar se puede calcular también el índice de Wobbe, el diámetro crítico de enfriamiento y la potencia específica. Aunque algunos de estos valores se reportan en la Tabla 1, los presentados a continuación son valores ideales. Para comparar, se calculan también las propiedades de los combustibles presentados en la Tabla 1.

Masa y volumen estequiométrico de aire: Es la masa o el volumen de aire necesario para oxidar estequiométricamente una unidad de masa o volumen de combustible. Se obtiene sumando las moles de oxígeno y nitrógeno en los reactivos (ecuación 4.1) y relacionando dicho volumen con la densidad para obtener el valor másico.

Masa y volumen de humos húmedos: Se refiere a la masa o el volumen de humos generados en la combustión, incluyendo el vapor de agua, por unidad de combustible. Se calcula sumando las moles de los productos (ecuación 4.1). Relacionando las moles de cada producto con su respectiva densidad se obtiene un valor en unidades de masa

Masa y volumen de humos secos: Cantidad de masa o volumen de humos generados en la combustión al retirar el vapor de agua por unidad de combustible. Se obtiene sumando las moles de los productos, menos las moles de agua (ecuación 4.1). Si se relaciona la densidad con el volumen o moles de cada especie, se obtiene un valor másico

Masa y volumen de agua: Luego de la combustión, es la masa o el volumen de agua producidos por unidad de combustible. Se obtiene a partir de las moles de agua producidas en la ecuación (4.1), si se relaciona con su densidad se obtiene un valor másico

Temperatura de rocío: Para una presión correspondiente es la temperatura a la cual el agua presente en los humos se condensa. Se obtiene encontrando la temperatura de saturación a la presión parcial del agua en los humos húmedos. [15]

Índice de Wobbe: Es la relación entre el poder calorífico de un gas y la raíz cuadrada de su densidad relativa (ecuación 4.2). Este índice permite comparar la intercambiabilidad de un

combustible por otros, pues combustibles con el mismo índice de Wobbe pueden entregar la misma potencia en la combustión, sin cambiar los parámetros geométricos del quemador.[15]

$$W = \frac{PCI}{\sqrt{d}} \qquad (4.2)$$

Potencia específica: Se define como la cantidad de energía liberada en el frente de llama primario por unidad de área y tiempo. Es una forma de medir la densidad de energía liberada en el frente de llama. A partir de la velocidad de deflagración laminar (S_L) y el poder calorífico inferior volumétrico (PCI_v) se puede calcular la potencia especifica a partir de la ecuación 4.4 [15]

$$P_s = S_L PCI_v \qquad (4.3)$$

4.2. Metodología experimental

La combustión del amoniaco es un campo de corta experiencia a nivel local. Por lo tanto, la adecuación de la infraestructura disponible es el primer paso para su estudio experimental. Luego, es necesario realizar una exploración para identificar flujos y proporciones de combustible/aire que generan una combustión estable de la cual se pueda extraer información experimental con los equipos disponibles.

4.2.1. Calibración de rotámetro para amoniaco

Inicialmente se cuenta con un rotámetro ABB 10A6100 con tubo FP-1/8-25-G5 y flotador de acero inoxidable, el cual se eleva hasta una altura proporcional al flujo que se hace pasar, gracias al empuje proporcionado por el gas mediante el principio de Arquímedes. Se realiza un montaje que permita su calibración usando como dispositivo patrón un medidor de flujo de sello húmedo Shinagawa W-NKA-5Bo. Este medidor funciona desplazando un volumen de agua igual al volumen del gas ingresado dentro de un tambor giratorio. Este tambor está conectado a una aguja en la cara frontal del equipo, la cual gira a una velocidad proporcional al flujo que se hace pasar [49]. La Figura 37 ilustra el principio de funcionamiento del medidor de sello húmedo. El gas empleado es llevado a un quemador de coflujo que cuenta con una llama de propano premezclado alrededor del puerto de descarga de amoniaco que asegura su combustión, lo cual disminuye en gran medida la cantidad de gas tóxico liberado al ambiente. La presión de entrada en el rotámetro es de 1 bar, mientras que el aire y el propano son mezclados antes de ingresar al quemador con 2 bar de presión. Para evitar daños en los equipos ocasionados por una retrollama, se ubica un

atrapallamas aguas arriba del quemador en la línea de propano premezclado, como se ilustra en la Figura 38.

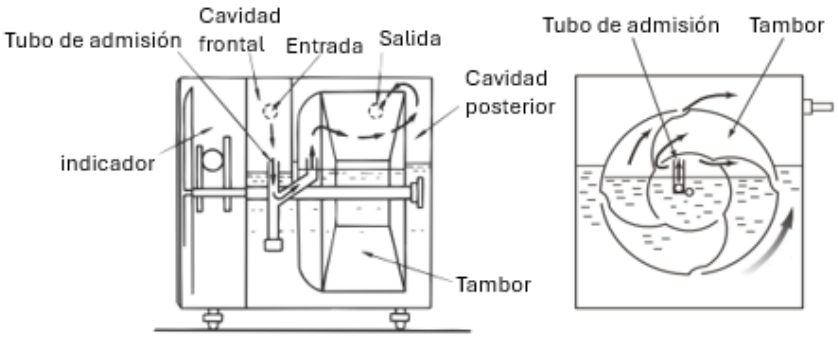

Figura 37. Principio de funcionamiento el medidor de sello húmedo [49].

La calibración se llevó a cabo ajustando el flujo en función de la altura del indicador en el rotámetro de 20 a 125 mm, con saltos de 5 mm. Luego, se reporta el flujo en litros por hora en sitio que indica el medidor de sello húmedo. Se realizaron 4 mediciones en cada punto. Al finalizar la calibración se procede a purgar el equipo con nitrógeno durante 10 min, luego, se reemplaza el agua contaminada con amoniaco por agua desmineralizada. Este proceso se repite varias veces, como lo recomienda el fabricante para prolongar la vida útil del equipo.

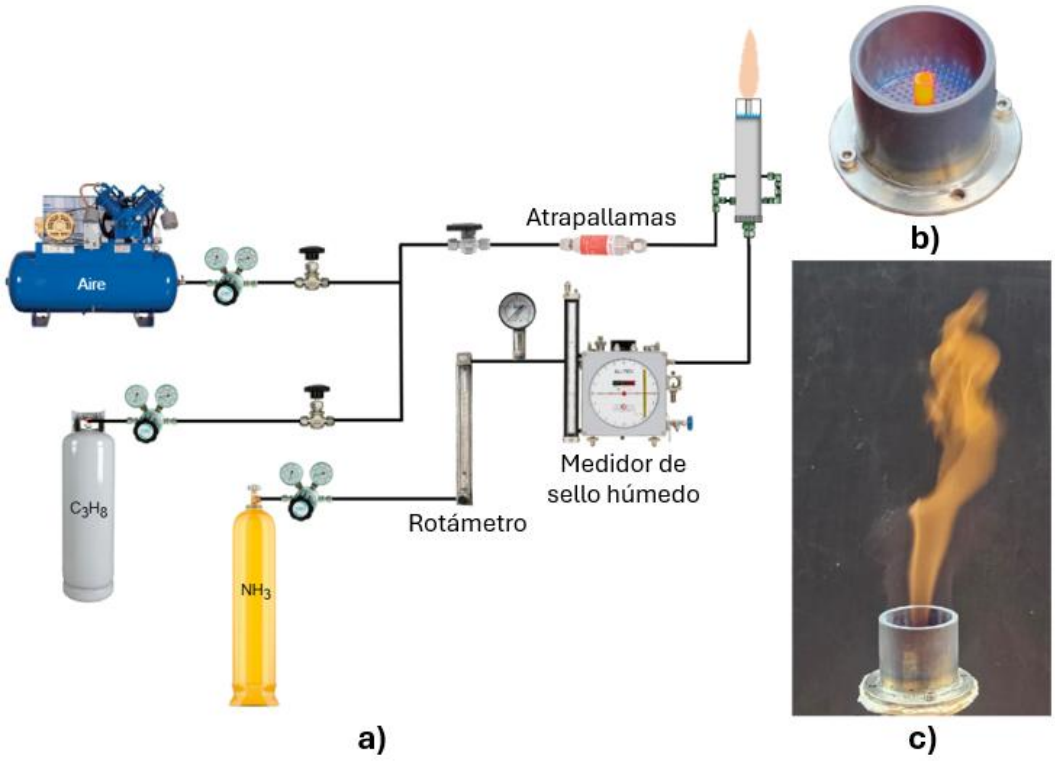

Figura 38. a) Montaje empleado para la calibración del rotámetro de amoniaco. b) Llama de propano alrededor del puerto de descarga de amoniaco. c) Llama de amoniaco.

4.2.2. Combustión de amoniaco sumergida en un medio poroso inerte.

Bajo ciertas condiciones de relación de equivalencia y potencia especifica se puede generar una llama sumergida en el interior de un medio poroso inerte, estas condiciones son las que se entienden como un punto de combustión sumergida estable. Estos puntos son específicos para cada quemador y dependen principalmente de sus dimensiones.

El quemador empleado está constituido por cuatro partes principales:

1. Zona de mezclado: Espacio donde se encuentran el combustible y comburente antes de ingresar al medio poroso.
2. Medios porosos: Medios porosos inertes cuyos diámetros de poro permiten la combustión en su interior o aguas abajo.

3. Cabeza del quemador: Pieza que contiene al medio poroso y lo fija en su posición. Posee perforaciones para el ingreso de termopares que permiten la medición de la temperatura a lo largo del eje en el sentido del flujo en su interior.
4. Cámara de combustión: Espacio en el cual se contienen y redirigen los gases de combustión para su liberación de forma segura en el sistema de extracción. Posee 3 ventanas de cuarzo que permiten la visibilidad hacia el medio poroso en su interior. Además, posee una ranura que permite la salida de los termopares que ingresan al medio poroso.

En la Figura 39 se presentan las diferentes partes del quemador de prueba desarrollado por el grupo Gasure, junto con las dimensiones de la cámara de combustión.

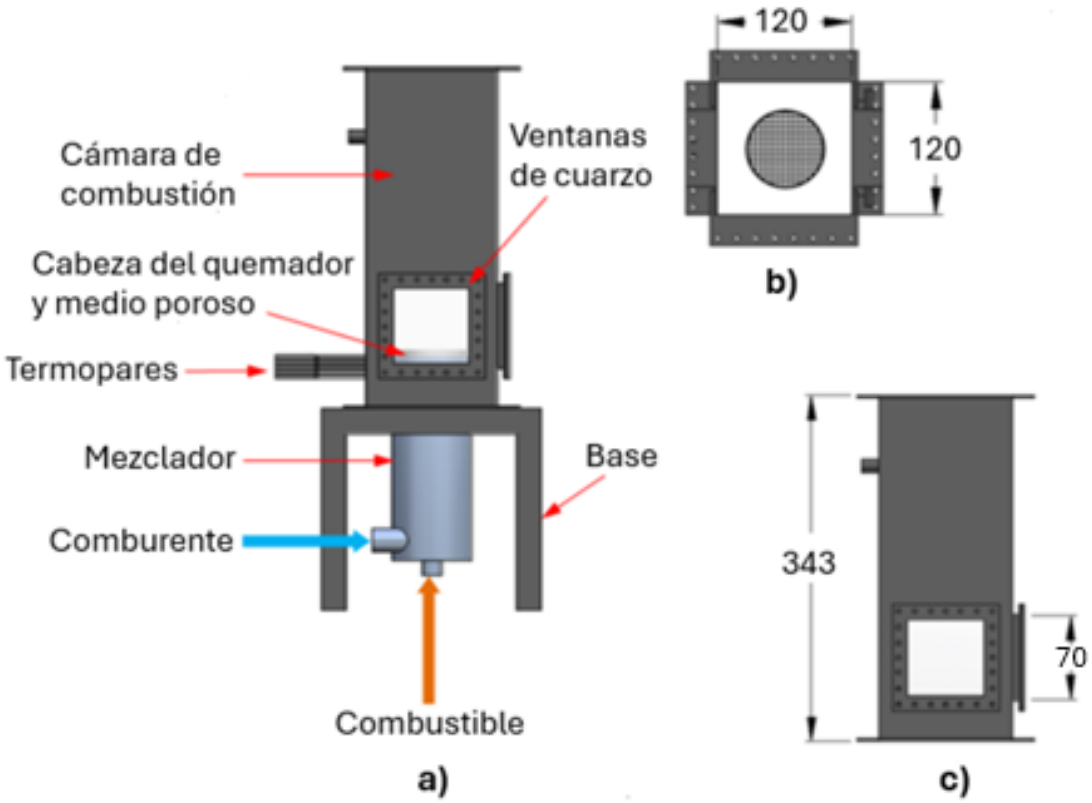

Figura 39. a) Partes del quemador de prueba y dimensiones de la cámara de combustión: b) vista superior y c) longitud de la cámara de combustión. Medidas en milímetros. Adaptado de [11].

Por otra parte, el quemador cuenta con dos medios porosos inertes. El primero, que corresponde a la zona de precalentamiento, es un honeycomb de alúmina de 70 mm de diámetro con poros de 1 mm y espesor de 20 mm. Luego, la zona de combustión está compuesta por un medio poroso de carburo de silicio de 70 mm de diámetro, 20 mm de espesor y una densidad de poros de 10 PPI. La construcción de medio poroso empleada fue previamente propuesta por Arrieta C. et al [12], la cual posee un tamaño de poro en la zona de precalentamiento mucho menor a la distancia crítica de enfriamiento para el amoniaco, como se presenta en la Tabla 1, lo cual evita que la combustión se propague aguas arriba, mientras que la porosidad de la zona de reacción permite que una llama de amoniaco pueda estabilizarse en su interior, como lo demostró Nozari et al [10][48] al emplear una espuma de carburo de silicio de 10 PPI en la zona de combustión.

Para determinar un punto de combustión sumergida se fija la potencia especifica a la cual se opera el quemador en 150 kW/m^2 y se varía la relación de equivalencia desde 0,4 hasta 1,1 con aumentos de 0,05. Se realiza este procedimiento añadiendo gas natural o hidrógeno al flujo de amoniaco de forma gradual hasta identificar un punto donde se presente la combustión sumergida. Cuando el quemador se encuentra en estado estable se cambia la mezcla de combustible por 100% amoniaco, manteniendo constante la potencia y la relación de equivalencia. Luego se varía la relación de equivalencia y se reportan las condiciones en las que se presenta la combustión sumergida estable, sus perfiles de temperatura, la temperatura superficial del medio poroso de carburo de silicio y la radiación emitida por los gases de combustión. El diseño de experimentos se presenta en la Tabla 7.

Para determinar el perfil de temperaturas al interior del medio poroso se usan termopares, los cuales se valen del efecto Seebeck para generar una diferencia de potencial eléctrico a partir de una diferencia de temperaturas entre dos metales diferentes. Se ubica un termopar tipo K con alambre de 33 µm aguas arriba de la zona de precalentamiento para registrar la temperatura de los gases antes de ingresar a esta (T1) y dos termopares tipo K adicionales en la zona de precalentamiento (T2 y T3). En la interfaz entre la zona de precalentamiento y de combustión se ubica un termopar tipo S con alambre de 33 µm (T4) y en la zona de combustión se ingresan dos termopares tipo S (T5 y T6). La Figura 40 ilustra la ubicación de los termopares en la cabeza del

quemador. Para medir la temperatura superficial del medio poroso se pone en contacto con un termopar tipo S y se registra la temperatura cuando se ha alcanzado el estado estable.

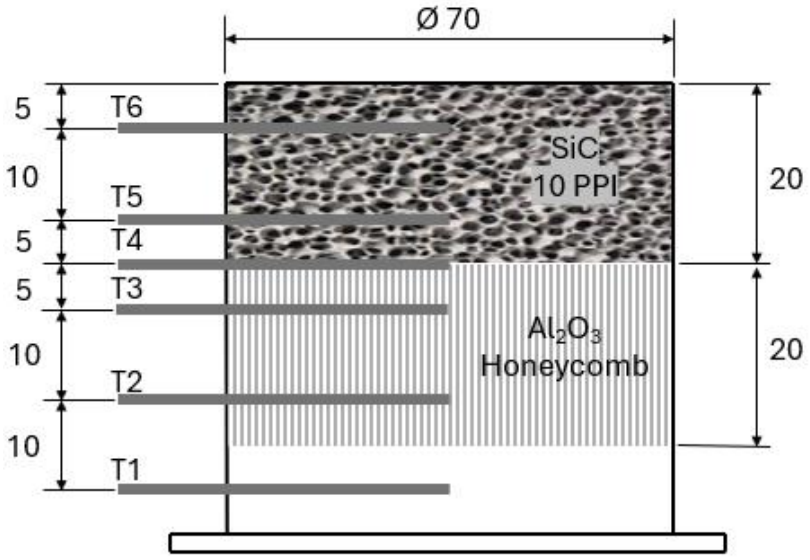

Figura 40. Ubicación de los termopares en la cabeza del quemador. Medidas en milímetros.

La intensidad de radiación emitida por los gases de combustión se mide con un radiómetro Huskeflux modelo SBG01. Este funciona gracias a una termopila, que está conformada por termopares conectados en serie, Estos termopares están en contacto con una superficie negra que aumenta su temperatura proporcionalmente a la radiación infrarroja recibida y un cuerpo que actúa de sumidero de calor. La diferencia de temperatura entre estas superficies induce una diferencia de potencial en el circuito. Este sensor detecta la radiación en un ángulo de 180°, razón por la cual se utiliza un restrictor que reduce el ángulo de visión en un valor conocido. El cual, si se ubica a la distancia adecuada mide la intensidad de radiación emitida en un área circular conocida [50]. En este caso, el restrictor permite la detección de la radiación en un ángulo de 28°, por lo tanto, para medir la intensidad de radiación que atraviesa la ventana de cuarzo de la cámara de combustión se ubica el radiómetro a L=21.5 cm de esta. La Figura 41 presenta las dimensiones del restrictor. Para estas mediciones se asume lo siguiente:

- La fuente de emisión es difusa.

- El área abierta del restrictor y el área donde se va a medir la intensidad de radiación deben ser mucho menores que el cuadrado de la distancia entre ellas.
- Los vectores normales de ambas superficies coinciden en el mismo eje.

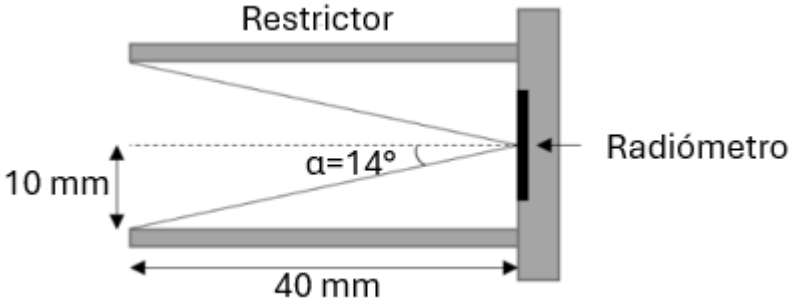

Figura 41. Dimensiones del restrictor y ángulo de visión del radiómetro [51].

Luego de realizar las mediciones se hace una corrección de los datos obtenidos mediante la ecuación (4.5) [50]

$$G = \frac{1}{2}\left[S - \sqrt{S^2 - 4\left(\frac{r_j}{\tan(\alpha)L}\right)^2}\right]\left(\frac{\tan^2(\alpha)L^2}{r_j^2}\right)E \qquad (4.4)$$

Donde:

$$S = 1 + \frac{L^2 + r_j^2}{\tan^2(\alpha)L^2} \qquad (4.5)$$

G: Intensidad de radiación real [kW/m^2]

r_j: Radio de la superficie del radiómetro (5 mm [52]) [m]

L: Distancia del radiómetro a la ventana de cuarzo [m]

E: Intensidad de radiación medida [kW/m^2]

α: Ángulo de visión del radiómetro [°]

Tabla 7. Diseño de experimentos

Potencia especifica [kW/m2]	Potencia de operación [W]	Relación de equivalencia (Ø)	Variables respuesta
150	577	0,4 a 1,1 incrementando 0,05	Estabilidad de combustión
			Perfil de temperatura
			Temperatura superficial
			Radiación de gases de combustión

Se realiza un montaje experimental para suplir el amoniaco a partir de un cilindro a 10 bar, cuya presión se reduce a 2 bar mediante un regulador de presión con resistencia interna de 150 W. Luego, se añade calor adicional en un evaporador para regresar a la fase gaseosa la parte del fluido que se condensó en la expansión en la válvula anterior. Un segundo regulador de presión amortigua las variaciones de la presión ocasionadas por el cambio de fase y entrega una presión constante al sistema de 1 bar aguas abajo. El flujo del gas se mide mediante el rotámetro calibrado previamente. Se hace seguimiento de la temperatura y la presión para verificar que el gas se encuentra a 300 K y presión atmosférica al ingresar al mezclador, donde el amoniaco se mezcla con gas natural de la red o hidrógeno producido mediante electrólisis en el laboratorio. Mediante un controlador de flujo AALBORG GFC17 con rango de 0 a 5 slpm de hidrógeno, se suple la cantidad de combustible a mezclar con amoniaco. El aire se toma de la red de aire seco del laboratorio y se suple mediante un controlador de flujo AALBORG GFC47 con rango de 0 a 60 slpm, en el mezclador del quemador de prueba. Las señales emitidas por los termopares son interpretadas por un lector digital Autonics KRN1000 recorder. Para registrar la intensidad de radiación emitida por los gases de combustión se emplea una unidad de lectura/registro de datos de alta precisión LI-19. La Figura 42 presenta un diagrama del montaje experimental descrito anteriormente.

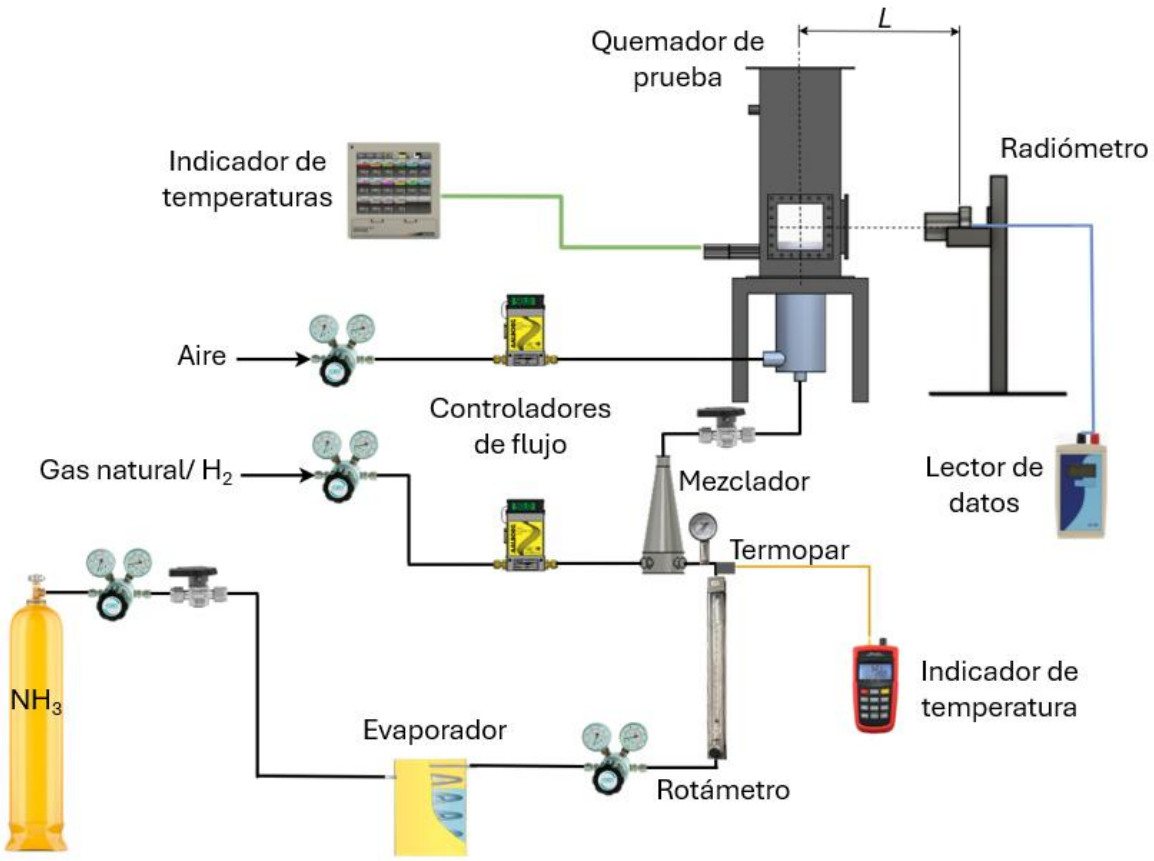

Figura 42. Montaje experimental empleado en este estudio. *L*=21.5 cm.

Con los datos obtenidos se realiza una aproximación a la eficiencia de radiación teniendo en cuenta sólo la radiación emitida por la superficie del medio poroso usando la ecuación 3.4.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante la metodología planteada anteriormente.

5.1. Estimaciones teóricas de propiedades de combustión del amoniaco.

Los resultados presentados en la Tabla 8 presentan algunas propiedades de combustión que no se reportan en la literatura consultada. Se puede notar que el amoniaco requiere menos volumen de aire que el metano y el propano, y un poco más que el hidrógeno para la combustión estequiométrica, pero cuando se compara la masa de aire estequiométrica, es el hidrógeno quien requiere más masa de aire que los otros combustibles presentados debido a su baja densidad. Por

otra parte, el amoniaco requiere menos masa de aire respecto a la masa de combustible para lograr la combustión estequiométrica. También se puede observar que el 29 y 25% de los gases de combustión para amoniaco e hidrógeno es vapor de agua, mientras que para el metano y el propano la proporción llega a 14 y 11%, lo cual indica que las pérdidas por calor latente de vaporización del agua llegan a ser mayores para el amoniaco, aunque no muy alejado del hidrógeno en este sentido. Sin embargo, estos últimos tienen una mayor temperatura de rocío, lo cual facilita la condensación del agua en dispositivos de recuperación de calor. En cuanto a la intercambiabilidad del amoniaco con otros gases, su bajo índice de Wobbe indica un menor aporte energético por unidad de volumen, por lo tanto, al añadir amoniaco en una mezcla de combustibles se disminuye la energía suministrada por metro cúbico de la mezcla. Además, las llamas de amoniaco tienden a tener mayores espesores y longitudes que otros combustibles, esto debido a su baja potencia especifica. Otro aspecto importante que se presenta en la Tabla 8 es el diámetro crítico de enfriamiento. Si bien este fue calculado suponiendo condiciones ideales, este presenta una diferencia en hasta dos órdenes de magnitud con respecto a los otros combustibles.

Tabla 8. Propiedades de combustión calculadas siguiendo la metodología propuesta.

	NH3	H2	CH4	C3H8	Unidades
Masa estequiométrica de aire	6,09	34,51	17,26	15,69	kg_{aire}/kg_{comb}
Volumen estequiométrico de aire	3,57	2,38	9,52	23,8	m^3_{aire}/m^3_{comb}
Masa de humos húmedos	7,06	35,32	18,16	16,6	kg_{humos}/kg_{comb}
Volumen de humos húmedos	4,82	2,88	10,52	25,8	m^3_{humos}/m^3_{comb}
Masa de humos secos	5,47	26,32	15,91	14,96	kg_{humos}/kg_{comb}
Volumen de humos secos	3,32	1,88	8,52	21,8	m^3_{humos}/m^3_{comb}
Masa de H2O por unidad de combustible	1,59	9	2,25	1,64	kg_{H2O}/kg_{comb}
Volumen de H2O por unidad de combustible	1,5	1	2	4	m^3_{H2O}/m^3_{comb}
Temperatura de rocío	70,13	72,6	59,16	54,83	°C
Índice de Wobbe	5,68	12,79	14,11	21,73	kWh/m^3
Potencia específica	219,47	8523,37	1164,87	1455,62	kW/m^2

5.2. Resultados experimentales.

5.2.1. Calibración de rotámetro.

Para la adecuación de la infraestructura disponible en el laboratorio se realizó la calibración del rotámetro con amoniaco. A pesar de realizarse las pruebas en el menor tiempo posible para minimizar las afectaciones que pueda sufrir el medidor de sello húmedo, este tiempo fue suficiente para presentar congelamiento en la válvula reductora de presión. Para solucionar esto se usó una válvula reductora de presión con una resistencia de 150 W. Sin embargo, así como se puede observar en la Figura 43, a medida que se aumenta el flujo, aumenta la desviación estándar de los datos recolectados. Esto es debido a que el calor añadido por la resistencia en la válvula reductora de presión no es suficiente para contrarrestar el efecto Joule-Thompson y en consecuencia parte del flujo se condensa al expandirse y luego se evapora a medida que avanza aguas abajo. Por esta razón el flotador en el rotámetro presenta oscilaciones que van en aumento con el aumento del flujo que se hace pasar por el mismo.

Finalmente, se añade una línea de tendencia lineal con un R^2 de 0.99, cuya ecuación predice el flujo que se hace pasar por el rotámetro en función de la altura del flotador en él. Sin embargo, debido a que los datos a partir de 70 mm de altura de flotador tienen una gran dispersión, sus estimaciones pueden no ser confiables.

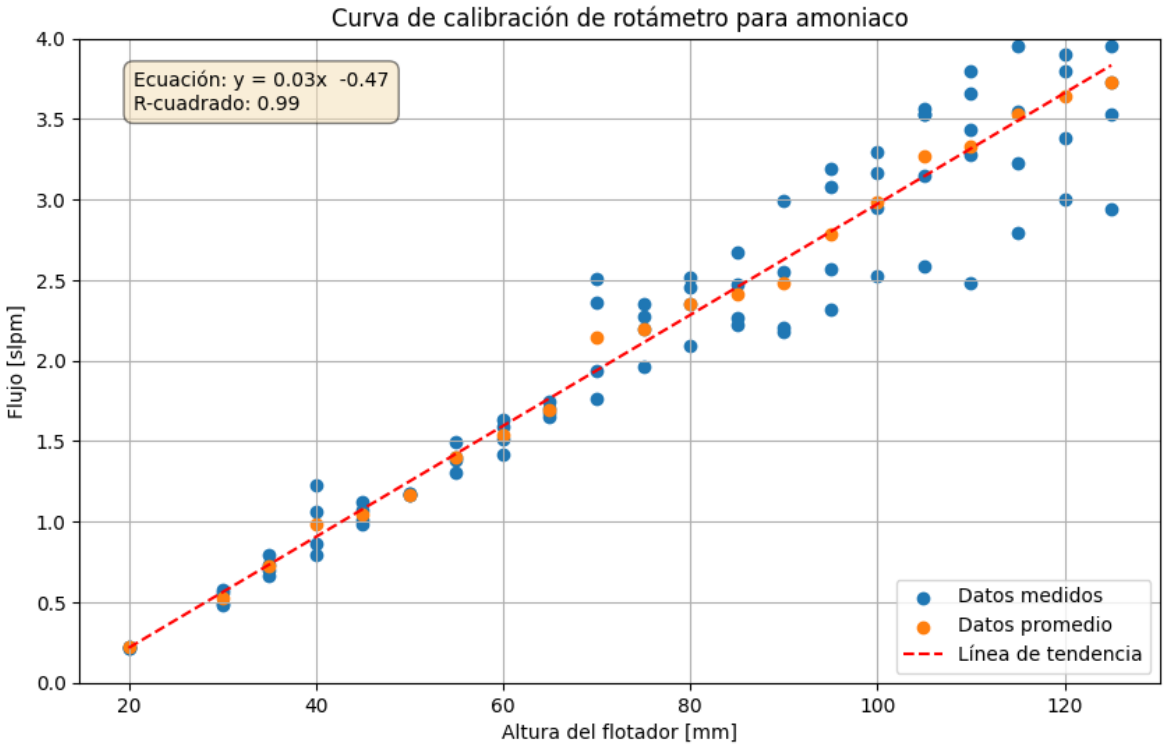

Figura 43. Curva de calibración del rotámetro para amoniaco.

5.2.2. Combustión de amoniaco sumergida en un medio poroso inerte

5.2.2.1. Identificación de puntos de combustión sumergida

Inicialmente se realizaron pruebas con aire y amoniaco puro a 150 kW/m^2 haciendo ignición con el quemador en frío, y bajo ningún dosado relativo se presentó una llama estable, pues siempre se desprende hasta extinguirse fuera de la cámara de combustión, por lo tanto, fue necesario adicionar otros combustibles al flujo de amoniaco para encontrar un punto de combustión sumergida y realizar el cambio por amoniaco puro luego de haber calentado el quemador. Al realizar el mismo procedimiento suministrando el 20% de la potencia de operación con gas natural se logra anclar la combustión al quemador, sin embargo, la llama no se acerca a la superficie (Figura 44a). En cambio, cuando se alcanza una mezcla con 80% gas natural la llama se acerca completamente a la superficie del medio poroso, y, además, su color deja de ser naranja y pasa a ser violeta (Figura 44b). Luego, a medida que aumenta la temperatura del medio poroso la llama empieza a sumergirse dentro del mismo.

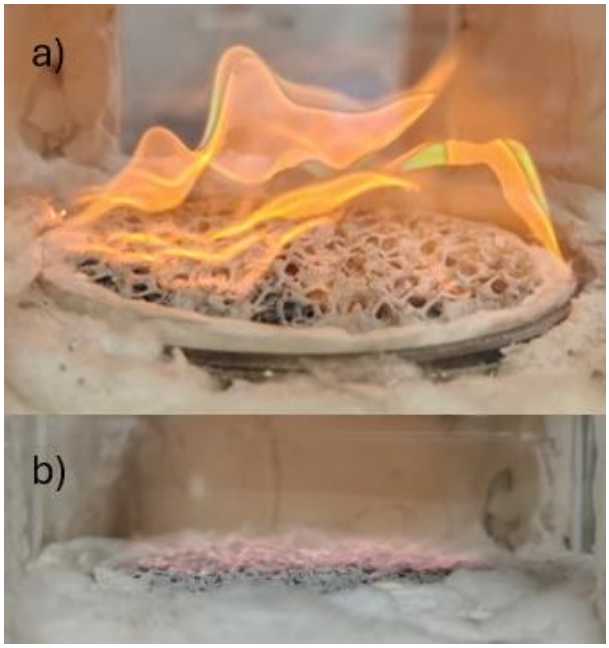

Figura 44. Encendido del quemador en frío con a) 20% gas natural y Ø=0,6. b) 80% gas natural y Ø=0,8

Luego de realizar el procedimiento para determinar puntos de combustión sumergida estables añadiendo hidrógeno, se encontró que si se reemplaza el 35% de la potencia de operación por este combustible y se usa una relación de equivalencia de 0.55, se obtiene una llama adherida completamente a la superficie del quemador, esto se debe a que el hidrógeno posee una velocidad de deflagración mucho mayor que el gas natural, por lo tanto, se requiere reemplazar un porcentaje menor de potencia con hidrógeno que con gas natural para que la velocidad de deflagración de la mezcla sea tal que la llama se establece completamente en la superficie del medio poroso. La Figura 45a muestra cómo varía el perfil de temperaturas con el tiempo luego de la ignición con el quemador a temperatura ambiente (~300 K) usando el punto de combustión estable con hidrógeno antes mencionado. En esta se puede observar que al inicio la temperatura más alta es registrada por el termopar más cercano a la superficie, la Figura 45b presenta una fotografía del quemador a los 5 minutos del encendido. Esta combustión superficial se sostiene durante 10 minutos aproximadamente, momento en el cual una parte de la llama se sumerge en el quemador mientras en la superficie se presenta una segunda zona de reacción, como se presenta en la Figura 45c luego de 30 minutos de la ignición, también, en la Figura 45a se observa que entre los 10 y 42 minutos las temperaturas en la zona de reacción aumentan lentamente a medida que la llama se sumerge gradualmente y por zonas en el área del medio poroso. Luego de haber transcurrido 42 minutos, la

llama se sumerge completamente en el medio poroso. En ese momento la temperatura máxima al interior del medio poroso es registrada por el termopar ubicado en la interfaz entre la zona de precalentamiento y combustión. Cuando esto sucede aumentan súbitamente las temperaturas tanto de la zona de combustión como las de la zona de precalentamiento. Sin embargo, se presenta un efecto indeseable, el aumento de la temperatura T3 por encima de T5 y T6 y su tendencia a superar la temperatura T4 evidencia el comportamiento de una retrollama, es decir, esto es un indicador de que la combustión se está desplazando aguas arriba de la zona de combustión. La Figura 45c presenta una fotografía del quemador 60 minutos después de la ignición. Cuando la temperatura T3 está a punto de superar T4 se reemplaza el hidrógeno por amoniaco para seguir operando el quemador con la misma potencia, pero con 100% amoniaco. Este cambio se puede observar aproximadamente en el minuto 64 y está señalado por la línea vertical negra punteada en la Figura 45a

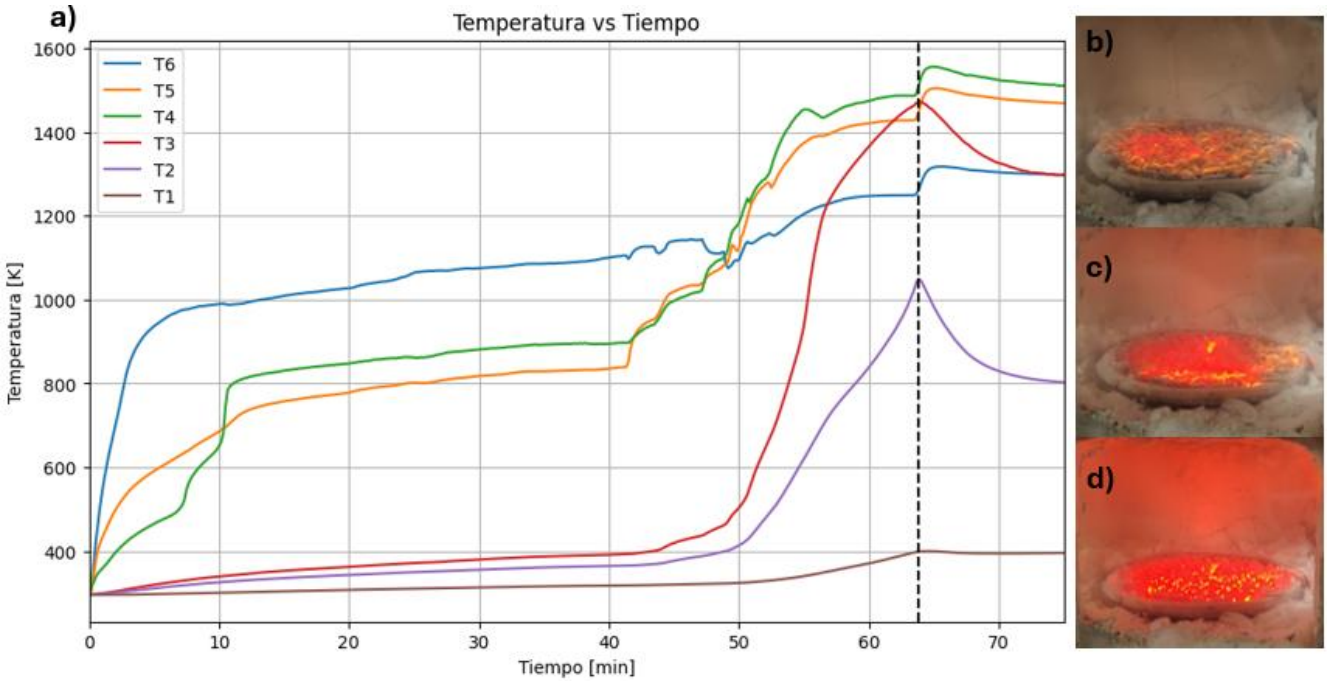

Figura 45. a) Curva de calentamiento al encender el quemador en frío con 35% de la potencia suministrada con H_2 y Ø= 0,55. b) quemador 5 min, c) 30 min y d) 60 min después de la ignición.

Finalmente, la Figura 46 presenta las temperaturas máximas que se registró en el interior del medio poroso. En todos los casos esta era registrada por el termopar T4 que se ubicó en la

interfaz. Esto es señal de una combustión estabilizada justo en la superficie de la zona de precalentamiento. Cuando la relación de equivalencia alcanza valores menores a 0.45 o mayores que 0.55 las temperaturas disminuyen rápidamente, la llama escapa del medio poroso y eventualmente se desprende. generando así un rango de estabilidad entre estos valores de dosado relativo. Como puede observarse, la inestabilidad de una llama de premezcla con NH3 está asociada al fenómeno de desprendimiento. Cuando la relación de equivalencia es mayor que 0.55 se observa una menor temperatura máxima, que puede asociarse a una menor tasa de liberación de calor, que a su vez puede estar ligada a una menor velocidad de deflagración. Si bien en este punto la velocidad de ingreso de la mezcla combustible/comburente es menor, la disminución de la velocidad de deflagración incentiva el desprendimiento de la llama. Por otra parte, cuando la relación de equivalencia es menor a 0.45 la temperatura máxima aumenta, y por ende se presume que también la velocidad de deflagración. Sin embargo, se presenta desprendimiento de llama debido a que este incremento de la velocidad de deflagración no logra vencer la velocidad de ingreso de la mezcla de gases en el medio poroso.

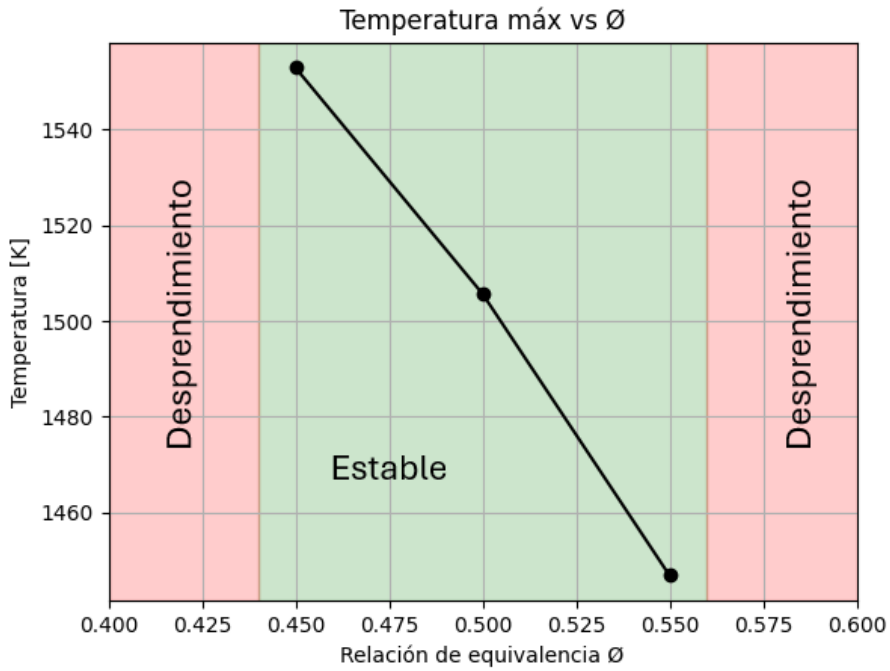

Figura 46. Rango de relaciones de equivalencia que producen combustión sumergida estable y la temperatura máxima registrada (T4) cuando se opera a 150 kW/m^2.

5.2.2.2. Perfiles de temperatura.

En los puntos con combustión sumergida mencionados anteriormente se registraron los perfiles de temperatura para cada relación de equivalencia. La Figura 47 muestra que, en la zona de combustión, a medida que se disminuye la relación de equivalencia aumenta la temperatura, es decir, añadir más aire aumenta la temperatura. También se puede notar que la combustión se fija en la interfaz, presentándose en este punto la temperatura máxima para cada relación de equivalencia.

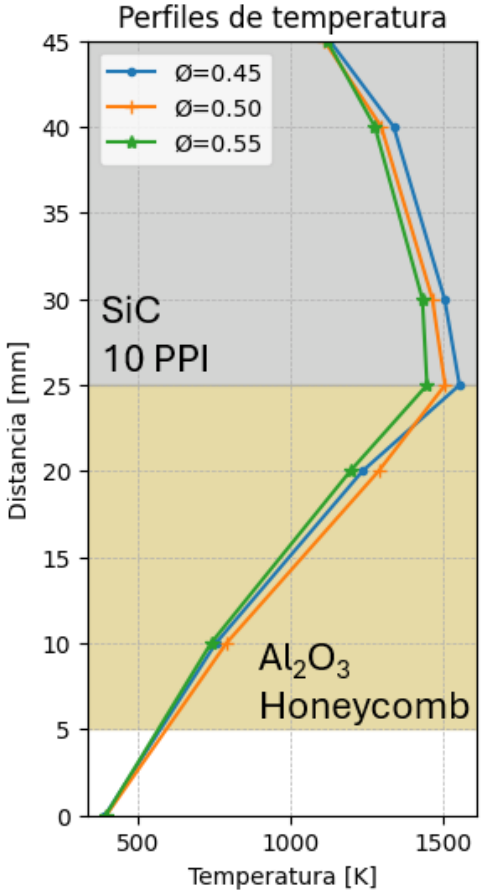

Figura 47. Perfiles de temperatura reportados.

5.2.2.3. Intensidad de radiación emitida y eficiencia de radiación.

Tomando los datos reportados por la unidad de lectura conectada a la señal del radiómetro y aplicando la metodología presentada en la sección anterior se obtienen los datos reportados en la Figura 48. Se evidencia que a medida que aumenta la relación de equivalencia, disminuye la intensidad de radiación emitida por los gases de combustión, presentando la misma tendencia que la temperatura máxima, por lo tanto, se evidencia una relación directa entre la intensidad de

radiación emitida por los gases de combustión y la temperatura al interior del medio poroso, debido a que estos salen con mayor temperatura cuando se disminuye la relación de equivalencia. En cambio, para la eficiencia (teniendo en cuenta una emisividad de 0,9 para carburo de silicio a 1100 K [53]) no parece haber una relación directa entre esta y la relación de equivalencia como lo muestra la Figura 49. Esto se debe a que la eficiencia de radiación responde principalmente al comportamiento de la temperatura superficial del medio poroso.

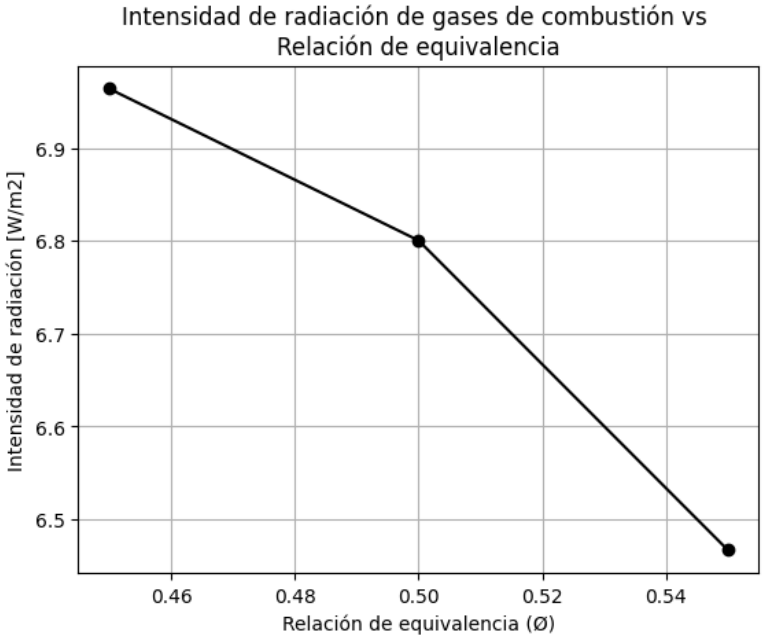

Figura 48. Intensidad de radiación emitida por los gases de combustión.

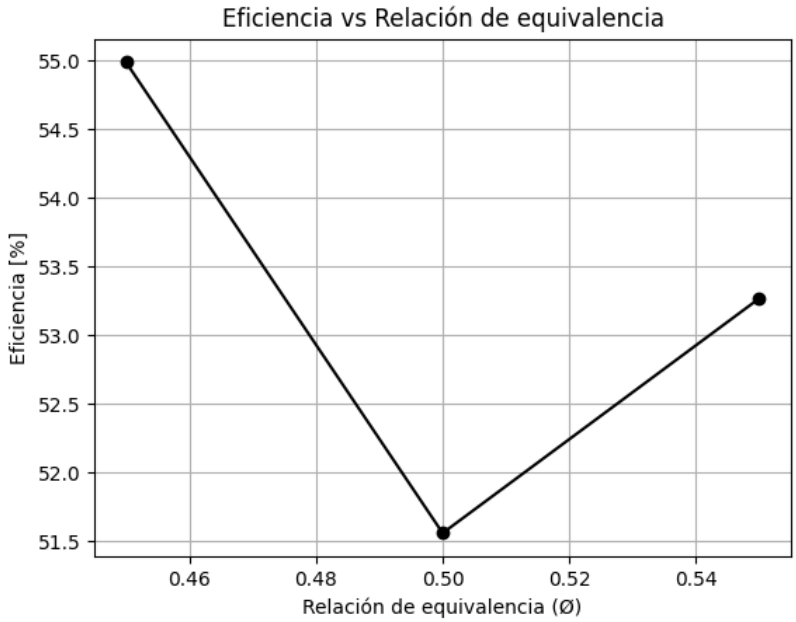

Figura 49. Eficiencia de radiación vs relación de equivalencia.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La elaboración de este trabajo permitió realizar un acercamiento al amoniaco como combustible, mediante el estudio de su combustión sumergida en un medio poroso inerte. Los experimentos realizados en este estudio fueron ejecutados en Medellín, a 0,85 bar de presión atmosférica y 300 K de temperatura ambiente. El quemador es operado con una potencia especifica de 150 kW/m2, dosados relativos entre 0,45 y 0,55. El medio poroso usado consta de una zona de precalentamiento compuesta por un Honeycomb de alúmina con poros de 1 mm y porosidad de 400 PPI. Mientras que en la zona de combustión se usó una espuma de carburo de silicio con 10 PPI. Tanto la zona de precalentamiento como de combustión poseen un diámetro de 70 mm y altura de 20 mm, A partir de los resultados y la experiencia proporcionados durante la elaboración del presente estudio se logró concluir:

Cuando se comparan las propiedades de combustión del amoniaco con hidrógeno, metano o propano, se puede destacar que a pesar de poseer límites de inflamabilidad cercanos a los que presenta el metano, su alta energía de ignición dificulta su ignición. Además, su bajo índice de Wobbe indica que, si no se varían las dimensiones del equipo, al realizar intercambio de otro

combustible por amoniaco resulta en una disminución de la energía entregada. Sin embargo, así como el hidrógeno, no posee carbonos, pero a diferencia de él, se puede condensar a temperatura mucho mayor, lo cual facilita su almacenamiento y transporte.

El amoniaco es una sustancia altamente tóxica y corrosiva que debe ser manipulada siguiendo las recomendaciones de seguridad de forma estricta. El uso de máscaras con filtros para amoniaco y gafas con sello hermético debe ser obligatorio. Los experimentos se deben llevar a cabo en un ambiente controlado, con extracción de gases independiente a la del ambiente. Se recomienda ubicar una válvula de cierre electrónica que se pueda controlar a distancia para cortar el suministro en caso de emergencia.

Se debe tener especial cuidado en la selección de equipos que puedan ser compatibles para el uso con este gas, pues tanto las partes expuestas al fluido como las que no lo están deben estar fabricadas con materiales capaces de resistir el contacto con él, en especial los sellos y juntas. No tener esto en cuenta puede ocasionar daños en los equipos o propiciar fugas.

Este combustible también es usado como refrigerante. Al expandirse se genera un efecto de enfriamiento que puede llegar a congelar la válvula reguladora de presión. Para extraer más flujo de gas del cilindro es necesario contar con un evaporador que pueda añadir suficiente calor como para evitar que ocurra un cambio de fase en la línea, lo cual genera fluctuaciones en la presión y el caudal que pueden afectar el correcto funcionamiento de los equipos.

Debido a su alta energía de ignición las llamas libres premezcladas y no premezcladas tienden a enfriarse y extinguirse rápidamente. Para sostener la combustión inicialmente es necesario añadir una fuente de calor adicional, puede ser por medio de una llama piloto o una superficie a alta temperatura.

El uso de medios porosos es beneficioso para mantener una combustión de amoniaco estable. El transporte de calor desde la zona de reacción hacia la premezcla sin quemar permite facilitar su combustión, pues aumenta su velocidad de deflagración, lo que a su vez aumenta la tasa de liberación de energía térmica y adicionalmente, aumenta la densidad de energía, lo que permite quemadores más compactos.

Si bien no se puede encender el quemador en frio usando 100% amoniaco con una potencia específica de 150 kW/m^2, se puede usar una mezcla que emplee 80% de gas natural o 35% de hidrógeno en potencia, operando con la misma potencia específica y una relación de equivalencia de 0,8 para la mezcla con gas natural y de 0,55 cuando se usa la mezcla con hidrógeno.

Tanto las mezclas con gas natural como con hidrógeno, a diferencia de cuando se emplea sólo amoniaco, son susceptibles a retrollamas. Cuando se opera el quemador con las mezclas presentadas tanto con gas natural como con hidrógeno presentan retrollama, pero el desplazamiento de la llama aguas arriba de presenta muy lentamente, lo que permite hacer el cambio a 100% amoniaco de forma segura.

La construcción de medios porosos empleada en este estudio demostró tener la capacidad de promover la combustión sumergida estable de amoniaco. Sin embargo, el uso de una zona de combustión con tamaños de poro mayores permitiría ampliar el rango de potencias específicas y relaciones de equivalencia donde se presenta la combustión sumergida estable.

Cuando se opera el quemador con 100% amoniaco, la llama permanece en la interfaz entre la zona de precalentamiento y combustión, sin embargo, debido a su baja velocidad de deflagración cuando se varía la relación de equivalencia por fuera del rango estable, la inestabilidad ocurre debido al fenómeno de desprendimiento y nunca por retrollama como sucede cuando se mezcla con otros combustibles.

Si bien la radiación emitida por los gases de combustión es muy baja respecto a la potencia especifica a la que opera el quemador (hasta casi el 5%), la radiación emitida por la superficie caliente del medio poroso puede ser hasta el 50% de la potencia especifica. Esto demuestra un potencial como una alternativa de combustión de alta eficiencia.

Al disminuir la relación de equivalencia aumenta la radiación emitida por los gases de escape, además como se observa en los perfiles de temperatura, aumenta la temperatura máxima. Esto puede ser un indicador de que este exceso de aire permite oxidar un poco más del combustible. Sin embargo, si se sigue aumentando la proporción de aire se enfría la llama y se extingue.

Cuando se observan los perfiles de temperatura, se distingue un comportamiento con pocas variaciones cuando se cambia la relación de equivalencia. Con temperatura máxima en la interfaz y menor gradiente de temperatura en la zona de combustión que en la zona de precalentamiento.

REFERENCIAS

[1] COP28, "Global Renewables and Energy Efficiency Pledge."

[2] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, "Colombia en la COP28," https://www.minambiente.gov.co/cop28/.

[3] Gobierno de Colombia, "Hoja Ruta Hidrogeno Colombia_2810".

[4] El Tiempo, "Producción de amoniaco verde, la apuesta para el agro del país," *https://www.eltiempo.com/mas-contenido/produccion-de-amoniaco-verde-la-apuesta-para-el-agro-del-pais-667625*.

[5] H. Kobayashi, A. Hayakawa, K. D. K. A. Somarathne, and E. C. Okafor, "Science and technology of ammonia combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, no. 1, pp. 109–133, 2019, doi: 10.1016/j.proci.2018.09.029.

[6] A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, W. I. F. David, and P. J. Bowen, "Ammonia for power," Nov. 01, 2018, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.pecs.2018.07.001.

[7] P. García, "Amoníaco, el olvidado y potencial combustible 'cero emisiones,'" *https://soymotor.com/coches/articulos/amoniaco-el-olvidado-y-potencial-combustible-cero-emisiones*.

[8] H. K. Newhall and E. S. Starkman, "Theoretical Performance of Ammonia as a Gas Turbine Fuel," 1966. Accessed: Jul. 26, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.4271/660768.

[9] W. E. Lear, "Ammonia-Fueled Combustion Turbines," in *NH3 Fuel Conference 2007*, Gainesville: University of Florida, Oct. 2007.

[10] H. Nozari, O. Tuncer, and A. Karabeyoglu, "Combustion of ammonia-rich NH3-H2-air mixtures: Improvement of flame stability," in *53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2017*, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA, 2017. doi: 10.2514/6.2017-4682.

[11] C. Echeverri, "Análisis teórico y experimental de la combustión estabilizada en la superficie de un medio poroso confinado.," Universidad de Antioquia, Medellín, 2016.

[12] C. E. Arrieta, A. M. García, and A. A. Amell, "Experimental study of the combustion of natural gas and high-hydrogen content syngases in a radiant porous media burner," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 17, pp. 12669–12680, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.078.

[13] L. Iral and A. Amell, “Performance study of an induced air porous radiant burner for household applications at high altitude,” *Appl Therm Eng*, vol. 83, pp. 31–39, May 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.02.044.

[14] D. H. Porter, *The Life and Times of Sir Goldsworthy Gurney*. 1998.

[15] A. Amell, *ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS*. Medellín: Centro de Extensión Académica CESET, 2002.

[16] John Zink Hamworthy Combustion, *Combustion Handbook*, 2nd ed., vol. Vol 1. Taylor & Francis Group.

[17] A. Hayakawa, T. Goto, R. Mimoto, Y. Arakawa, T. Kudo, and H. Kobayashi, “Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/air premixed flames at various pressures,” *Fuel*, vol. 159, pp. 98–106, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2015.06.070.

[18] K. Takizawa, N. Igarashi, S. Takagi, K. Tokuhashi, and S. Kondo, “Quenching distance measurement of highly to mildly flammable compounds,” *Fire Saf J*, vol. 71, pp. 58–68, 2015, doi: 10.1016/j.firesaf.2014.11.013.

[19] “Standard Test Method for Minimum Ignition Energy and Quenching Distance in Gaseous Mixtures,” 2020. doi: 10.1520/E0582-21.

[20] F. J. Verkamp, M. C. Hardin, and J. R. Williams, “Ammonia combustion properties and performance in gas-turbine burners,” 1967. Accessed: Jul. 26, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/S0082-0784(67)80225-X

[21] Z. Hu, M. Li, W. Yu, Z. Wang, and L. Li, “Spark ignition and stable flame of premixed methanol-ammonia gaseous jet at atmospheric surrounding.” [Online]. Available: https://doi.org/./j.ijhydene...

[22] J. Li *et al.*, “A Review on Combustion Characteristics of Ammonia as a Carbon-Free Fuel,” Oct. 06, 2021, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/fenrg.2021.760356.

[23] B. Bazooyar, G. Coomson, V. Manovic, and S. A. Nabavi, “Comparative analysis of ammonia combustion for domestic applications,” *Journal of the Energy Institute*, vol. 106, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.joei.2022.10.008.

[24] The enginerieering toolbox, “Fuel gases Wobbe index,” https://www.engineeringtoolbox.com/wobbe-index-d_421.html.

[25] A. Amell, “Fenómenos de combustión en llamas de premezcla,” Medellín, Dec. 2016.

[26] M. Alnajideen *et al.*, "Ammonia combustion and emissions in practical applications: a review," Dec. 01, 2024, *Springer*. doi: 10.1007/s43979-024-00088-6.

[27] C. Lhuillier, P. Brequigny, F. Contino, and C. Mounaïm-Rousselle, "Experimental study on ammonia/hydrogen/air combustion in spark ignition engine conditions," *Fuel*, vol. 269, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117448.

[28] "Properties of ammonia," in *Ammonia Data Book*, iiar, 2008, ch. 2.

[29] D. Wang, M. Lee, and Y. Suzuki, "Nitriding Effects of Ammonia Flames on Iron-based Metal Walls," *Journal of Ammonia Energy*, vol. 1, no. 1, Jul. 2023, doi: 10.18573/jae.8.

[30] "Right to Know Hazardous Substance Fact Sheet," 2007. [Online]. Available: http://nj.gov/health/workplacehealthandsafety/right-to-

[31] O. Herbinet, P. Bartocci, and A. Grinberg Dana, "On the use of ammonia as a fuel – A perspective," *Fuel Communications*, vol. 11, p. 100064, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jfueco.2022.100064.

[32] A. Lanser, "Stoichiometry Controlled Oxidation (S.C.O.) technology for industrial Ammonia combustion," in *Ammonia Energy Conference 2019*, Duiker combustion engineers, Nov. 2019.

[33] S. Mashruk, H. Xiao, and A. Valera-Medina, "Rich-Quench-Lean model comparison for the clean use of humidified ammonia/hydrogen combustion systems," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 5, pp. 4472–4484, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.204.

[34] R. Murai *et al.*, "The radiative characteristics of NH3/N2/O2 non-premixed flame on a 10 kW test furnace," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 325–332. doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.232.

[35] G. Nagatani, H. Ishii, T. Ito, E. OHNOhno, and Y. Okuma, "Development of Co-Firing Method of Pulverized Coal and Ammonia to Reduce Greenhouse Gas Emissions," *IHI engineering review*, vol. 53, 2020.

[36] T. Niu, X. Liu, D. Hu, T. Wang, Y. Xie, and H. Wang, "Industrial scale experimental investigation of ammonia-coal cofiring in coal-fired boiler," *Clean coal technology*, 2022.

[37] M. Koike, H. Miyagawa, T. Suzuoki, and K. Ogasawara, "Ammonia as a hydrogen energy carrier and its application to internal combustion engines," in *Institution of Mechanical Engineers - Sustainable Vehicle Technologies: Driving the Green Agenda*, Woodhead Publishing Limited, 2012, pp. 61–70. doi: 10.1533/9780857094575.2.61.

[38] T. Brown, “The AmVeh – an ammonia fueled car from South Korea,” https://nh3fuelassociation.org/2013/06/20/the-amveh-an-ammonia-fueled-car-from-south-korea/.

[39] S. S. Gill, G. S. Chatha, A. Tsolakis, S. E. Golunski, and A. P. E. York, “Assessing the effects of partially decarbonising a diesel engine by co-fuelling with dissociated ammonia,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 7, pp. 6074–6083, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.12.137.

[40] “Two-stroke engine operating on ammonia.” Accessed: Oct. 20, 2024. [Online]. Available: https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/man-b-w-two-stroke-engine-operating-on-ammonia.pdf

[41] N. Kailos, “UTILIZATION OF AMMONIA AS AN ALTERNATE FUEL IN ARMY AIRCRAFT ENGINES,” Fort Eustis, Virgina, Sep. 1966.

[42] K. D. K. A. Somarathne, S. Hatakeyama, A. Hayakawa, and H. Kobayashi, “Numerical study of a low emission gas turbine like combustor for turbulent ammonia/air premixed swirl flames with a secondary air injection at high pressure,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 44, pp. 27388–27399, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.09.089.

[43] R. Kenanoğlu and E. Baltacioğlu, “An experimental investigation on hydroxy (HHO) enriched ammonia as alternative fuel in gas turbine,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 57, pp. 29638–29648, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.189.

[44] O. Kurata *et al.*, “Performances and emission characteristics of NH3-air and NH3-CH4-air combustion gas-turbine power generations,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 36, no. 3, pp. 3351–3359, 2017, doi: 10.1016/j.proci.2016.07.088.

[45] Michael. Scheffler and Paolo. Colombo, *Cellular ceramics : structure, manufacturing, properties and applications*. Wiley-VCH ; John Wiley [distributor], 2005.

[46] J. Rojas, “SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MEDIOS POROSOS INERTES CON VARIACIÓN RADIAL DE LA POROSIDAD,” Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaiso, 2021.

[47] R. Mital, J. P. Gore, and R. Viskanta, “A RADIATION EFFICIENCY MEASUREMENT PROCEDURE FOR GAS-FIRED RADIANT BURNERS,” *Experimental Heat Transfer*, pp. 3–21, 1998. doi: https://doi.org/10.1080/08916159808946551.

[48] H. Nozari, G. Karaca, O. Tuncer, and A. Karabeyoglu, “Porous medium based burner for efficient and clean combustion of ammonia–hydrogen–air systems,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 21, pp. 14775–14785, May 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.234.

[49] “Type W-NK wet gas meter instruction manual,” *Shinagawa Corporation*.

[50] J. Obando, Y. Cadavid, and A. Amell, “Theoretical, experimental and numerical study of infrared radiation heat transfer in a drying furnace,” *Appl Therm Eng*, vol. 90, pp. 395–402, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.06.087.

[51] A. Luisa Fernanda Maya Murcia, “ESTUDIO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE LA COMBUSTIÓN DE MEZCLAS H2+GAS NATURAL EN UN QUEMADOR DE PREMEZCLA A ALTA PRESIÓN.”

[52] “USER MANUAL SBG SERIES Hukseflux Thermal Sensors.” [Online]. Available: www.hukseflux.com

[53] D. R. Lide *et al.*, “CRC Handbook of Chemistry and Physics Editor-in-Chief.”