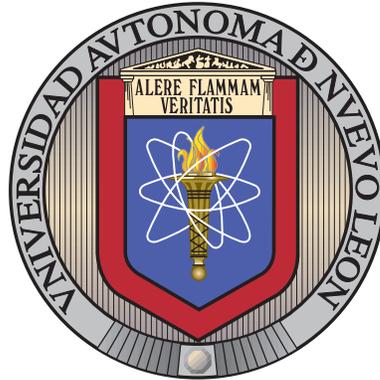


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ANÁLISIS NUMÉRICO DE LAS EMISIONES DE UN
QUEMADOR DE GAS METANO CON ADICIÓN DE
HIDRÓGENO PARA FINES INDUSTRIALES
MEDIANTE SIMULACIÓN CFD

POR

PATRICIA NOHEMÍ MARROQUÍN FONSECA

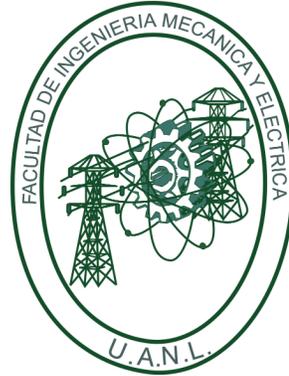
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

4 DE JULIO DE 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ANÁLISIS NUMÉRICO DE LAS EMISIONES DE UN
QUEMADOR DE GAS METANO CON ADICIÓN DE
HIDRÓGENO PARA FINES INDUSTRIALES
MEDIANTE SIMULACIÓN CFD

POR

PATRICIA NOHEMÍ MARROQUÍN FONSECA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

4 DE JULIO DE 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Análisis numérico de las emisiones de un quemador de gas metano con adición de hidrógeno para fines industriales mediante simulación CFD”, realizada por la estudiante Patricia Nohemí Marroquín Fonseca, con número de matrícula 1795952, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Daniel de la Rosa Urbalejo
Director

Dr. Simón Martínez Martínez
Co-Director

Dr. Arturo Morales Fuentes
Revisor

Dr. Max Salvador Hernández
Revisor

M.C. Fernando Ibarra Hernández
Revisor

Vo.Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 507507

Acta Núm. 4511

Ciudad Universitaria, a 26 de junio de 2025.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por su amor constante, por cada esfuerzo entregado y por ser el apoyo firme que me ha acompañado en cada etapa de este recorrido.

A mi asesor de tesis, por su orientación, paciencia y compromiso. Su acompañamiento, así como sus observaciones puntuales, fueron clave para el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros de maestría, Job, Luis, Marian, Ramón y Diego, con quienes compartí experiencias de aprendizaje, desafíos académicos, noches de trabajo y momentos que recordaré con gratitud.

A mis profesores, por su entrega al compartir sus conocimientos con profesionalismo y exigencia.

A mis familiares y amistades, por estar presentes con su apoyo emocional, su empatía y palabras de aliento cuando más lo necesité.

Extiendo mi agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado a través de la beca Nacional (Tradicional) 2023 - 1, a través del CVU: 1269550, sin la cual esta formación académica no habría sido posible.

Este trabajo se realizó en los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) del Grupo de Energías Térmica y Renovable (GETR) de la FIME-UANL.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	iv
1. Introducción	1
1.1. Justificación	4
1.2. Hipótesis	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
2. Estado actual del conocimiento	7
2.1. Marco teórico	7
2.1.1. Emisiones contaminantes	7
2.1.2. Relación aire/combustible y relación de equivalencia	9
2.1.3. Llama	10
2.1.4. Dinámica de Fluidos Computacional (<i>CFD</i>)	18
2.1.5. Modelos en ANSYS Fluent	19

2.1.6. Resistencia viscosa	28
2.1.7. Presión de salida y caída de presión	30
2.2. Antecedentes	30
3. Metodología de la tesis	34
3.1. Metodología general de la tesis	34
3.2. Plan de trabajo	34
3.3. Geometría del quemador	36
3.4. Métodos numéricos	37
3.4.1. Ecuación de la conservación de la masa	37
3.4.2. Ecuación de cantidad de movimiento	38
3.4.3. Ecuación de conservación de energía	38
3.4.4. Ecuación de transporte de especies	39
3.4.5. Modelo de radiación	40
3.4.6. Ecuaciones de turbulencia	42
3.5. Condiciones de frontera	42
3.6. Matriz experimental	44
3.7. Análisis de sensibilidad de malla	45
3.8. Metodología de la simulación CFD	48
3.8.1. Discretización del dominio	48
3.8.2. Definición del medio poroso	48

3.8.3. Modelos utilizados	49
3.8.4. Condiciones de frontera	49
3.8.5. Criterios de convergencia	50
4. Resultados	51
4.1. Temperaturas usando gas metano como combustible	51
4.1.1. Relaciones de equivalencia	53
4.2. Emisiones contaminantes usando gas metano como combustible . . .	55
4.2.1. Relación de equivalencia de 0.45	56
4.2.2. Relación de equivalencia de 0.5	58
4.2.3. Relación de equivalencia de 0.55	61
4.3. Temperaturas usando hidrógeno como aditivo al combustible de gas metano	63
4.3.1. Relación de equivalencia de 0.45	64
4.3.2. Relación de equivalencia de 0.5	65
4.3.3. Relación de equivalencia de 0.55	65
4.4. Emisiones contaminantes usando hidrógeno como aditivo al combus- tible de gas metano	67
4.4.1. Relación de equivalencia de 0.45	68
4.4.2. Relación de equivalencia de 0.5	70
4.4.3. Relación de equivalencia de 0.55	73
4.5. Puntos de concentración de emisiones a la salida del quemador	76

5. Conclusiones	81
5.1. Validación modelo CFD	81
5.2. Temperaturas	82
5.3. Emisiones contaminantes	83
5.3.1. Producción de Monóxido de Carbono	83
5.3.2. Formación de Dióxido de Carbono	86
5.3.3. Producción de Óxidos de Nitrógeno	88
6. Logros del trabajo	91

ÍNDICE DE FIGURAS

3.1. Diagrama de flujo de la metodología general de la tesis	35
3.2. Modelo geométrico del quemador divergente con medios porosos y ubicaciones de los termopares	36
3.3. Condiciones de frontera del modelo geométrico	43
3.4. Temperaturas obtenidas mediante la simulación CFD en cada pro- puesta de malla, en comparación con las temperaturas obtenidas ex- perimentalmente por Liu et al. [15]	46
3.5. Resultados del análisis de independencia de la malla.	47
4.1. Geometría simplificada del modelo geométrico.	52
4.2. Resultados de las temperaturas obtenidas experimentalmente por Liu et al. [15] contra los obtenidos de la Malla 2 de 77,507 elementos, usando una relación de equivalencia igual a 0.45.	54
4.3. Resultados de las temperaturas obtenidas experimentalmente por Liu et al. [15] contra los obtenidos de la Malla 2 de 77,507 elementos, usando una relación de equivalencia igual a 0.5.	54

4.4. Resultados de las temperaturas obtenidas experimentalmente por Liu et al. [15] contra los obtenidos de la Malla 2 de 77,507 elementos, usando una relación de equivalencia igual a 0.55.	55
4.5. Concentración de monóxido de carbono (CO) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.45.	56
4.6. Concentración de dióxido de carbono (CO_2) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.45.	57
4.7. Concentración de óxidos de nitrógeno (NO_x) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.45.	58
4.8. Concentración de monóxido de carbono (CO) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.5.	59
4.9. Concentración de dióxido de carbono (CO_2) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.5.	60
4.10. Concentración de óxidos de nitrógeno (NO_x) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.5.	60
4.11. Concentración de monóxido de carbono (CO) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.55.	61

4.12. Concentración de dióxido de carbono (CO_2) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.55.	62
4.13. Concentración de óxidos de nitrógeno (NO_x) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.55.	63
4.14. Comparación de los resultados de las temperaturas usando solamente gas metano como combustible (100% CH_4) contra las temperaturas añadiendo proporciones de hidrógeno.	64
4.15. Comparación de los resultados de las temperaturas usando solamente gas metano como combustible (100% CH_4) contra las temperaturas añadiendo proporciones de hidrógeno.	66
4.16. Comparación de los resultados de las temperaturas usando solamente gas metano como combustible (100% CH_4) contra las temperaturas añadiendo proporciones de hidrógeno.	67
4.17. Resultados de las emisiones de monóxido de carbono (CO) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.45.	68
4.18. Resultados de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.45.	69
4.19. Resultados de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.45.	70
4.20. Resultados de las emisiones de monóxido de carbono (CO) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.5.	71
4.21. Resultados de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.5.	72

4.22. Resultados de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.5.	73
4.23. Resultados de las emisiones de monóxido de carbono (CO) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.55.	74
4.24. Resultados de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.55.	75
4.25. Resultados de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.55.	76
4.26. Concentración de CO por cada relación de equivalencia y proporción de H_2 en la mezcla a la salida del quemador.	77
4.27. Concentración de CO_2 por cada relación de equivalencia y proporción de H_2 en la mezcla a la salida del quemador.	78
4.28. Concentración de NO_x por cada relación de equivalencia y proporción de H_2 en la mezcla a la salida del quemador.	79

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Distancias de los termopares desde la entrada del quemador	37
3.2. Matriz experimental	44
3.3. Análisis de independencia de malla	45
4.1. Desviación de las temperaturas obtenidas con la Malla 2.	53

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La combustión ha sido una herramienta esencial en los procesos industriales durante décadas, al permitir la generación de energía térmica indispensable para el funcionamiento de una amplia variedad de equipos. Este proceso se lleva a cabo a través de quemadores, dispositivos diseñados para transformar combustibles —como el gas natural, el propano o mezclas con hidrógeno— en energía térmica aprovechable. Los quemadores se utilizan en sistemas de calefacción, generación eléctrica, hornos industriales, calderas, turbinas y otros equipos que requieren altas temperaturas para llevar a cabo procesos físicos o químicos. Su principal objetivo es lograr una combustión completa y eficiente, maximizando así la conversión de la energía química contenida en el combustible en energía térmica útil, con el menor desperdicio posible y reduciendo al mínimo la formación de productos no deseados.

Más allá de su papel como fuente de calor, la combustión representa un campo en constante evolución, donde la innovación y la optimización de procesos juegan un rol fundamental. Los avances en tecnologías de combustión permiten mejorar la eficiencia energética, reducir costos operativos y, sobre todo, minimizar el impacto ambiental asociado al uso de combustibles fósiles. Estos desarrollos tecnológicos subrayan la necesidad de un enfoque técnico riguroso y multidisciplinario, que abarque desde el diseño de sistemas de combustión hasta el control preciso de las variables que influyen en el proceso.

Desde el punto de vista científico, la combustión se define como una reacción química exotérmica en la cual un combustible reacciona con un agente oxidante —generalmente el oxígeno presente en el aire— liberando energía en forma de calor y, en muchos casos, luz. La energía calorífica generada eleva la temperatura del sistema, haciéndola útil para diversas aplicaciones industriales, mientras que la emisión de luz, aunque frecuentemente considerada un subproducto, puede ser utilizada como indicador del estado y estabilidad de la llama. Esta reacción, que implica una oxidación rápida, está fuertemente influenciada por una serie de parámetros como el tipo de combustible, la relación entre combustible y oxidante, la presión, la temperatura inicial de la mezcla y la velocidad del flujo. El control adecuado de estas variables no solo asegura una combustión más eficiente, sino que también reduce la generación de contaminantes peligrosos, como el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los óxidos de azufre (SO_x) y partículas como el hollín, todos ellos con implicaciones significativas para la salud y el medio ambiente [29].

La formación de CO , en particular, es una señal clara de ineficiencia, ya que su presencia indica que la combustión no ha sido completa. Esta condición no solo implica una pérdida en la cantidad de calor generado, sino que también representa un riesgo ambiental y de seguridad. La oxidación posterior del CO a CO_2 , si bien puede recuperarse parcialmente en términos energéticos, requiere condiciones específicas para ser efectiva. Este proceso puede acelerarse en presencia de radicales que contienen hidrógeno, por lo que una gestión adecuada del entorno de combustión es fundamental para lograr una conversión completa del CO y optimizar el rendimiento térmico del sistema [19].

No obstante, uno de los principales desafíos en el contexto de la combustión industrial es el uso intensivo de combustibles fósiles, tales como el carbón, el diésel y el gas metano. Su combustión produce una gran cantidad de contaminantes que afectan tanto al medio ambiente como a la salud humana. Entre ellos se encuentran el monóxido de carbono (CO), que reduce la capacidad de la sangre para transportar oxígeno; el dióxido de carbono (CO_2), principal gas responsable del calentamien-

to global; los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los óxidos de azufre (SO_x), causantes de fenómenos como la lluvia ácida y problemas respiratorios. Además, durante el proceso también se generan compuestos intermedios como aldehídos, cetonas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, dioxinas y furanos, todos ellos con alto potencial tóxico. A esto se suman las partículas finas, como hollín y cenizas, que pueden penetrar profundamente en el sistema respiratorio y cardiovascular, afectando de manera especial a poblaciones vulnerables como niños, personas mayores y pacientes con enfermedades crónicas.

La acumulación de estos contaminantes en la atmósfera no solo deteriora la calidad del aire que respiramos, sino que también contribuye significativamente al cambio climático. El incremento en las concentraciones de CO_2 y otros gases de efecto invernadero intensifica el calentamiento global, generando alteraciones en los patrones climáticos e incrementando la frecuencia e intensidad de eventos extremos como huracanes, sequías e inundaciones. Estos cambios afectan gravemente la biodiversidad, la seguridad alimentaria, el acceso al agua y la estabilidad de comunidades humanas en todo el mundo.

En respuesta a los desafíos ambientales y energéticos que plantea el uso de combustibles fósiles, la comunidad científica y tecnológica ha intensificado sus esfuerzos en el desarrollo de alternativas sostenibles. Entre las soluciones más relevantes se encuentran las fuentes de energía renovable, como la solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica, las cuales han adquirido un papel protagónico en la matriz energética global. Paralelamente, han surgido combustibles alternativos como el hidrógeno y los gases sintéticos, que ofrecen una vía prometedora para reducir las emisiones contaminantes asociadas a los procesos de combustión.

Estos combustibles, al reaccionar con un oxidante como el oxígeno, generan productos significativamente menos nocivos —principalmente vapor de agua—, lo que permite una producción de energía térmica más limpia y eficiente, en consonancia con los objetivos de sostenibilidad ambiental. En este contexto, Hsu et al.

[10] investigaron el uso de gases de combustión ricos en hidrógeno como combustible alternativo en hornos industriales y concluyeron que su aplicación puede reducir de manera significativa tanto el consumo energético como la emisión de contaminantes. Por otro lado, Wang et al. [30] se enfocaron en estudiar los efectos de la adición de hidrógeno al gas natural en la eficiencia y emisiones de una caldera industrial a gas. Encontraron que esta adición mejoró la eficiencia de la combustión y redujo las emisiones de CO_2 , CO y NO_x .

1.1 JUSTIFICACIÓN

Los resultados de esta investigación pueden tener aplicaciones significativas en la industria energética, metalúrgica, química, de alimentos, entre otras, ya que, al ser resultados de simulaciones, evitan el manejo directo de quemadores industriales que pueden ser caros y difíciles de operar o controlar; pueden ayudar a comprender y predecir el comportamiento del proceso de combustión, estableciendo hasta qué punto es recomendable la adición de H_2 para que haya un ahorro de gas metano en la mezcla, además de una combustión más completa y con mayor temperatura de la llama sin que afecte la eficiencia del proceso y de saber cómo se comporta la generación de emisiones contaminantes en estos procesos dentro de quemadores industriales, ya sea utilizando sólo gas natural o una mezcla de éste con H_2 .

1.2 HIPÓTESIS

Al variar parámetros como la fracción molar de hidrógeno (H_2) en la mezcla de combustible y, por ende, la relación aire-combustible, se espera que el proceso de combustión sea más completo. Esto se debe a que el hidrógeno (H_2) genera una temperatura de llama elevada, lo que provoca un aumento en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) debido a las altas temperaturas y una disminución en

las emisiones de monóxido de carbono (CO), dado que el hidrógeno (H_2) favorece una oxidación más eficiente del monóxido de carbono (CO). Como resultado, se incrementa la formación de dióxido de carbono (CO_2), aumentando su concentración debido a una combustión más eficiente y completa en comparación con la combustión del gas metano (CH_4) como combustible.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el impacto que genera la adición de hidrógeno en la combustión de metano sobre la formación de emisiones CO , CO_2 y NO_x , mediante la simulación CFD del proceso de combustión en un quemador divergente con medios porosos para fines industriales, con el fin de establecer los resultados del uso de la adición de hidrógeno a gases utilizados como combustibles en la industria.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Seleccionar la geometría del quemador tomando como base los modelos empleados experimentalmente en la literatura para utilizar en el proceso de simulación CFD.
2. Diseñar la geometría del quemador industrial utilizando como referencia el modelo seleccionado de la literatura, a través de la modelación CAD.
3. Desarrollar distintos modelos de malla computacional para la simulación CFD del proceso de combustión en el quemador seleccionado.
4. Definir los parámetros para la simulación CFD con base en el manejo experimental reportado en la literatura para el quemador seleccionado.

5. Ejecutar las simulaciones CFD del proceso de combustión de la geometría seleccionada mediante el programa ANSYS Fluent para realizar un análisis de sensibilidad de malla.
6. Elegir la malla con mejores resultados para realizar las simulaciones CFD del proceso de combustión de la geometría seleccionada.
7. Ejecutar las simulaciones CFD del proceso de combustión de la geometría con la malla seleccionada, mediante el programa ANSYS Fluent para validar el modelo del quemador.
8. Ejecutar las simulaciones CFD del proceso de combustión de la mezcla de CH_4 e H_2 mediante el programa ANSYS Fluent para obtener resultados del comportamiento de las emisiones contaminantes.
9. Comparar los resultados obtenidos de las emisiones contaminantes de la mezcla de CH_4 e H_2 contra los resultados obtenidos de las emisiones contaminantes del CH_4 .
10. Analizar los resultados obtenidos del proceso de simulación CFD comparándolos con la literatura con el fin de determinar los parámetros que más influyen de forma positiva.
11. Generar conclusiones acerca de los parámetros o condiciones de operación que permitan demostrar si es viable la adición de H_2 al CH_4 en estos procesos de combustión.

CAPÍTULO 2

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 EMISIONES CONTAMINANTES

2.1.1.1 MONÓXIDO DE CARBONO (CO) Y DIÓXIDO DE CARBONO (CO_2)

El CO es un subproducto de la combustión incompleta y puede generarse debido a una mezcla insuficiente de combustible y aire o a una quema incompleta en la cámara de combustión. Se oxida a dióxido de carbono (CO_2) a través de la reacción con oxígeno en la atmósfera. En combustión bien regulada, los niveles de CO deberían limitarse a pocas partículas por millón (ppm), mientras que valores superiores indican problemas serios en el sistema. La oxidación de CO a CO_2 libera calor adicional (173 kJ/mol), y la presencia de vapor de agua cataliza este proceso, aumentando su velocidad. Este procedimiento se puede observar a través de la siguiente reacción química:



Esta reacción se documentó por Mullinger y Jenkins [19].

El CO_2 es el producto final esperado de una combustión completa de compuestos de carbono. Aunque ambientalmente se considera un gas de efecto invernadero clave, su presencia en los gases de escape es un indicador de eficiencia en la combustión [19].

2.1.1.2 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x)

La formación de NO_x suele depender de factores como la temperatura de la llama, el tiempo de residencia de los gases calientes y la disponibilidad de oxígeno en las zonas más calientes.

Estos gases se forman principalmente a altas temperaturas por tres mecanismos: térmico, de combustible y rápido (prompt). El NO_x térmico es dominante en combustibles gaseosos debido a las altas temperaturas alcanzadas, mientras que el NO_x de combustible depende del contenido de nitrógeno en el combustible [19].

NO_x térmico (*Thermal* NO_x). Este mecanismo ocurre a temperaturas elevadas (generalmente superiores a 1300 °C), donde el nitrógeno molecular (N_2) del aire reacciona con el oxígeno (O_2). El proceso es gobernado por la reacción de Zeldovich, que incluye dos etapas principales:

- Disociación de oxígeno: $O_2 \rightarrow O + O$
- Reacción con nitrógeno: $N_2 + O \rightarrow NO + N$, seguida de $N + O_2 \rightarrow NO + O$

A temperaturas más altas, la velocidad de formación de NO_x térmico aumenta exponencialmente debido a la mayor disponibilidad de átomos de oxígeno y nitrógeno excitados. Este mecanismo es importante en combustibles gaseosos o líquidos que no contienen nitrógeno en su composición [19].

NO_x de combustible (*Fuel NO_x*). Se produce cuando el combustible contiene compuestos de nitrógeno (por ejemplo, en carbón o biomasa). Durante la combustión, estos compuestos se descomponen y forman nitrógeno (N_2) y compuestos intermedios como cianuro de hidrógeno (HCN) y amoníaco (NH_3), que posteriormente reaccionan con el oxígeno para formar NO_x .

La cantidad de NO_x de combustible depende de la proporción de nitrógeno en el combustible, la temperatura y la mezcla aire-combustible. Este tipo de NO_x puede ser significativo en combustibles sólidos o líquidos con contenido de nitrógeno [19].

NO_x rápido (*Prompt NO_x*). Este mecanismo ocurre en zonas cercanas a la base de la llama, donde las reacciones entre hidrocarburos y nitrógeno molecular generan NO_x . Es menos dependiente de la temperatura que el NO_x térmico y se forma incluso en llamas relativamente frías. Los hidrocarburos reaccionan con N_2 para formar HCN , que luego se oxida a NO [19].

2.1.2 RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE Y RELACIÓN DE EQUIVALENCIA

Relación aire/combustible. La relación aire/combustible es la relación entre el flujo másico del aire y el flujo másico del combustible presentes en un proceso de combustión [9]. Esta relación se puede observar mediante la ecuación:

$$\frac{A}{C} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c} \quad (2.1)$$

Donde A/C representa la relación aire/combustible, \dot{m}_a es el flujo másico del aire y \dot{m}_c es el flujo másico del combustible.

Relación de equivalencia φ . La relación de equivalencia es un valor adimensional que permite expresar la proporción entre el combustible y el aire suministrados en

un proceso de combustión. Esta medida es especialmente útil porque la composición de los productos de combustión varía considerablemente entre mezclas ricas (con exceso de combustible) y mezclas pobres (con exceso de aire). Por ello, comparar la relación estequiométrica aire/combustible con la relación real ofrece una forma más precisa de caracterizar la mezcla. A este parámetro se le conoce como la relación de equivalencia combustible/aire, representada con el símbolo φ [9]. Se representa de la siguiente manera:

$$\varphi = \frac{A/C_{esteq}}{A/C_{real}} \quad (2.2)$$

Donde φ representa la relación de equivalencia, A/C_{esteq} es la relación aire/combustible estequiométrica y A/C_{real} es la relación aire/combustible real.

2.1.3 LLAMA

Las llamas pueden clasificarse en premezcladas y no premezcladas, dependiendo de cómo interactúan el combustible y el oxidante antes de la combustión:

Llamas premezcladas. El combustible y el oxidante (generalmente oxígeno o aire) están completamente mezclados antes de la ignición. Estas llamas tienen una estructura bien definida y suelen ser más eficientes porque la combustión ocurre en una zona estrecha con una relación de mezcla controlada. Ejemplos comunes incluyen los quemadores de Bunsen y las llamas en motores de combustión interna con inyección homogénea.

Llamas no premezcladas (de difusión). El combustible y el oxidante se encuentran y reaccionan en la zona de combustión, formando un gradiente de concentración. La combustión se da por difusión del oxidante hacia la región de reacción. Estas llamas son típicas en velas, antorchas y algunos tipos de quemadores industriales.

La diferencia clave radica en que las llamas premezcladas permiten un mejor control sobre la velocidad de reacción y la temperatura, mientras que en las llamas de

difusión, la mezcla ocurre de manera espontánea y es más dependiente de la difusión molecular y turbulenta [7].

2.1.3.1 EXTINCIÓN DE LAS LLAMAS

Blow-off. Se utiliza para describir un fenómeno en el cual una llama se extingue o se desplaza debido a una fuerza externa, como el viento o una corriente de aire intensa.

Blow-out. Ocurre cuando la relación entre el combustible y el aire se desequilibra de manera significativa, lo que resulta en una falta de suministro adecuado de combustible o aire. En este caso, la llama se apaga repentinamente, lo que puede llevar a la liberación de gases combustibles no quemados.

Enfriamiento excesivo. Si la temperatura baja por debajo de un umbral crítico, las reacciones químicas se ralentizan y la llama se apaga.

Deficiencia de combustible u oxidante. Una mezcla pobre o rica en exceso puede hacer que la reacción no sea sostenible.

Pérdida de radicales activos. Los radicales OH , H , O son esenciales para la propagación de la combustión; su eliminación inhibe la reacción.

Aumento de la velocidad de flujo. Si el flujo es demasiado rápido, la llama no puede mantenerse en su posición y se extingue [7].

2.1.3.2 RETROCESO EN LA LLAMA (*Flashback*)

El flashback de la llama es un fenómeno en el que una llama premezclada se propaga en sentido contrario al flujo del combustible y el oxidante, avanzando hacia zonas no deseadas dentro del sistema de combustión. Esto representa un riesgo

significativo en aplicaciones como quemadores industriales, calderas y motores de combustión, ya que puede dañar componentes internos, incrementar el riesgo de explosiones y comprometer tanto la integridad del equipo como la seguridad del entorno [5].

Este fenómeno ocurre cuando la velocidad de propagación de la llama excede la velocidad del flujo del gas no quemado. Este comportamiento es especialmente crítico al utilizar combustibles con alto contenido de hidrógeno (H_2) cuya velocidad de llama es considerablemente mayor en comparación con hidrocarburos convencionales como el metano (CH_4), lo que incrementa la probabilidad de retroceso de la llama.

Mecanismos del retroceso en la llama en mezclas con hidrógeno

Dependiendo del contenido de hidrógeno en la mezcla de combustión, se han identificado diferentes tipos de flashback:

1. *Flashback* de núcleo (*core flow flashback*): Se observa en mezclas con contenido moderado de hidrógeno (alrededor del 55 %-75% H_2). En este caso, la llama retrocede de manera suave y simétrica a través del flujo principal, afectando progresivamente la zona de combustión.
2. *Flashback* en la capa límite (*boundary layer flashback*): En mezclas con altas concentraciones de hidrógeno (87.5 %-100%), la llama tiende a propagarse a lo largo de las paredes del quemador, iniciando la ignición en puntos calientes del sistema antes de extenderse rápidamente hacia la fuente de alimentación [5].

2.1.3.3 QUEMADORES INDUSTRIALES

Los quemadores industriales son dispositivos diseñados para mezclar de manera eficiente un combustible (gas, líquido o sólido) con un oxidante (generalmente oxígeno del aire), generando una llama estable que produce energía térmica. Su propósito

principal es convertir la energía química del combustible en calor útil, con la mayor eficiencia posible y minimizando la formación de contaminantes.

Aplicaciones

Los quemadores industriales se utilizan en una variedad de aplicaciones, cada una con requisitos específicos. Por ejemplo:

1. **Hornos Industriales.** Son utilizados en procesos metalúrgicos, cerámicos y de tratamiento térmico. Requieren quemadores de alta temperatura y combustión controlada.
2. **Calderas.** Su función es generar vapor para uso en centrales eléctricas, calefacción y procesos industriales. Operan con quemadores de gas, diésel o biomasa. Necesitan alta eficiencia energética y sistemas de control de emisiones.
3. **Secadores Industriales.** Utilizan quemadores para producir aire caliente en procesos de deshidratación de alimentos, secado de papel, textiles y productos químicos. Requieren un control preciso de la temperatura para evitar sobrecalentamiento y garantizar la calidad del producto final.
4. **Incineradores.** Diseñados para la eliminación de residuos sólidos y líquidos mediante combustión controlada. Requieren quemadores capaces de operar a altas temperaturas y con sistemas para controlar la formación de contaminantes como NO_x y partículas.
5. **Turbinas de Gas.** Usan quemadores para la combustión en cámaras presurizadas, impulsando la expansión de gases que generan potencia mecánica o eléctrica. Aplicaciones en plantas de generación de energía y motores de aviación. Requieren quemadores de combustión estable a alta presión y temperatura, con tecnologías de reducción de emisiones [12].

2.1.3.4 QUEMADORES RADIANTES

Estos quemadores son dispositivos utilizados en sistemas de combustión que permiten una transferencia eficiente de calor a través de la radiación infrarroja. A diferencia de los quemadores convencionales, que dependen principalmente de la convección, los quemadores radiantes emiten calor de forma más uniforme y directa hacia una superficie o espacio, lo cual optimiza su rendimiento.

Estos quemadores suelen estar compuestos por materiales cerámicos porosos, que facilitan la distribución homogénea de la llama y permiten que la combustión ocurra de manera más controlada. Esta característica no solo mejora la eficiencia térmica del sistema, sino que también contribuye a una combustión más limpia con menores emisiones contaminantes.

Además, los quemadores radiantes tienen la capacidad de operar a altas temperaturas sin perder sus propiedades estructurales, lo que los hace ideales para aplicaciones en procesos industriales, como calefacción, secado y tratamiento térmico. Gracias a su diseño, estos quemadores son capaces de aprovechar al máximo la energía liberada durante la combustión, reduciendo el consumo de combustible y aumentando la eficiencia energética.

Por último, los quemadores radiantes destacan por su capacidad de generar calor de forma rápida y precisa, lo que los convierte en una solución efectiva para aplicaciones donde se requiere control térmico exacto y uniformidad en la distribución del calor [8].

2.1.3.5 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA COMBUSTIÓN EN MEDIOS POROSOS

La combustión en medios porosos es un proceso en el cual el combustible y el aire se mezclan y reaccionan dentro de una estructura porosa, lo que permite

una combustión más eficiente y controlada. El medio poroso actúa como un soporte inerte, que facilita la distribución del flujo de gases y proporciona una superficie adicional para la transferencia de calor, optimizando el proceso.

El principio fundamental de esta combustión se basa en la capacidad del medio poroso para almacenar y redistribuir el calor generado durante la reacción. Una parte del calor liberado se transfiere a la estructura porosa, que a su vez lo radia hacia el flujo de gases reactantes. Esto genera un ciclo de retroalimentación térmica, en el que el calor pre-calienta los reactantes antes de que lleguen a la zona de reacción, mejorando así la estabilidad y eficiencia de la combustión.

Otra característica esencial es que la estructura porosa ayuda a lograr una distribución homogénea de temperatura, lo que reduce la formación de puntos calientes y permite una combustión más uniforme. Además, el uso de medios porosos permite alcanzar altas velocidades de combustión sin riesgo de inestabilidad, ya que el medio actúa como un amortiguador térmico y de flujo. Esta propiedad permite aplicaciones en procesos industriales donde se requiere alta eficiencia, control preciso del calor y bajas emisiones contaminantes [26].

Entendiendo esto, se pueden identificar tres secciones:

1. Zona de precalentamiento: En esta región, el calor generado por la combustión se transfiere hacia los gases reactantes entrantes a través de la estructura porosa. El medio poroso, debido a su capacidad para almacenar y redistribuir calor, precalienta el combustible y el oxidante antes de que alcancen la zona de reacción. Este precalentamiento no solo mejora la eficiencia térmica, sino que también aumenta la velocidad de combustión y permite una ignición más estable, reduciendo el tiempo necesario para que los reactantes comiencen a reaccionar.
2. Zona de reacción: Esta es la región donde ocurre la combustión propiamente dicha. En la zona de reacción, los gases precalentados se mezclan y reaccionan

en la estructura porosa, generando calor y productos de combustión. La presencia del medio poroso facilita una distribución homogénea de la llama y evita la formación de puntos calientes. La estructura porosa también actúa como un amortiguador térmico, estabilizando la llama y asegurando una combustión eficiente y uniforme.

3. Zona de gases quemados: Después de la zona de reacción, los productos de combustión se encuentran en esta etapa, donde aún contienen calor residual que se transfiere parcialmente al medio poroso. Esta zona es importante porque contribuye a la transferencia de calor radiante desde el medio poroso hacia el entorno o el proceso industrial al que se aplica. El calor restante en los gases quemados puede ser utilizado para aumentar la eficiencia del sistema o ser recuperado mediante intercambiadores térmicos.

2.1.3.6 MEDIOS POROSOS

Los medios porosos son estructuras que contienen una gran cantidad de espacios vacíos o poros distribuidos a lo largo de su volumen. Estos materiales permiten el flujo de gases o líquidos a través de sus poros, lo que los hace ideales para sistemas donde se requiere una interacción eficiente entre el fluido y el medio sólido [8].

2.1.3.7 QUEMADORES DIVERGENTES

Los quemadores divergentes se distinguen por su diseño que favorece una expansión gradual del flujo de salida a medida que se aleja del punto de ignición inicial.

Este tipo de quemadores despliega un diseño estratégico donde la salida se amplía progresivamente, lo que contribuye significativamente a la estabilidad y eficiencia del proceso de combustión en diversos sistemas industriales y domésticos.

En los sistemas de combustión, los quemadores divergentes juegan un papel

crucial al dirigir y expandir la llama de manera controlada. Esta función es esencial para prevenir el retroceso de la llama y para moderar la velocidad de combustión, lo que a su vez permite un control más preciso de la temperatura y la intensidad del proceso.

La expansión gradual en el diseño de estos quemadores facilita una mezcla más eficiente entre el combustible y el oxidante, promoviendo así una combustión completa y efectiva. Este aspecto es fundamental para mejorar la eficiencia global de la combustión, al reducir las zonas con exceso de oxígeno y al optimizar la distribución de calor dentro del sistema.

Además de su impacto en la estabilidad y eficiencia, los quemadores divergentes también desempeñan un papel importante en la reducción de emisiones contaminantes. Al mejorar el control sobre el proceso de combustión, estos quemadores ayudan a minimizar la liberación de compuestos nocivos al ambiente, cumpliendo con regulaciones ambientales más estrictas y contribuyendo así a la sostenibilidad y seguridad ambiental en diversos sectores industriales y comerciales.

En estos sistemas, la expansión del flujo de gases dentro de la cámara de combustión genera un efecto de disminución de la velocidad, lo que permite un mayor tiempo de residencia de los reactivos en la zona de combustión. Esto favorece una combustión más completa, reduciendo la presencia de contaminantes como el monóxido de carbono (CO) y los óxidos de nitrógeno (NO_x). Son utilizados en sistemas de combustión de bajo NO_x , donde la recirculación de gases de escape juega un papel importante en la reducción de emisiones.

Al diseñar un quemador con una geometría expandida, se logra una dilución controlada de los reactivos con productos de combustión previamente enfriados, lo que disminuye los picos de temperatura y reduce la formación de contaminantes térmicos [12].

Su aplicación en turbinas de gas, hornos industriales y calderas de alta eficiencia ha permitido reducir significativamente las emisiones contaminantes y cumplir con

normativas ambientales más estrictas. Además, el uso de herramientas de simulación computacional (CFD) ha optimizado su diseño, permitiendo analizar la distribución del flujo, la estabilidad de la llama y la generación de contaminantes antes de su fabricación, lo que mejora su rendimiento y sostenibilidad [13].

2.1.4 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (*CFD*)

La Dinámica de Fluidos Computacional (*CFD*, por sus siglas en inglés: *Computational Fluid Dynamics*) es una disciplina dentro de la mecánica de fluidos y la ingeniería que emplea métodos numéricos y algoritmos computacionales para analizar y resolver problemas relacionados con el movimiento de fluidos y la transferencia de calor. Se basa en la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales describen el comportamiento de los fluidos en términos de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía, así como en la interacción de los fluidos con estructuras sólidas.

El objetivo principal de *CFD* es proporcionar una comprensión profunda y cuantitativa del comportamiento de los fluidos en diversas condiciones y geometrías, permitiendo reemplazar costosos experimentos físicos por simulaciones digitales de alta precisión.

Gracias a la *CFD*, es posible simular virtualmente el flujo de fluidos en entornos complejos, optimizar el diseño de sistemas y componentes, predecir fenómenos como la turbulencia y evaluar el rendimiento de dispositivos antes de su construcción física. Su aplicación abarca múltiples industrias, desde la aeronáutica y automotriz hasta la ingeniería térmica, la biomedicina y la energía [2].

2.1.4.1 TIPOS DE ELEMENTOS DE MALLA COMPUTACIONAL PARA GEOMETRÍAS 2D

- Elementos cuadrangulares: son polígonos de cuatro lados (generalmente con ángulos internos de 90 grados) que se utilizan para discretizar geometrías en dos dimensiones. Estos elementos son relativamente simples de implementar y son útiles para modelar estructuras con simetría y regularidad en su forma.
- Elementos triangulares: son los más simples y comunes. Tienen tres lados y tres vértices. Se utilizan para mallas en geometrías irregulares y complejas, ya que cualquier superficie se puede dividir en triángulos.

2.1.5 MODELOS EN ANSYS FLUENT

2.1.5.1 ECUACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

La ecuación de cantidad de movimiento es una de las ecuaciones fundamentales en la mecánica de fluidos, derivada de la segunda ley de Newton ($F = ma$), y describe cómo un fluido responde a la acción de fuerzas externas. Esta ecuación es esencial para analizar el comportamiento de los fluidos en movimiento y se aplica tanto en flujos internos como en flujos externos [31].

Matemáticamente, la ecuación de cantidad de movimiento para un fluido incompresible puede expresarse como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + S_i \quad (2.3)$$

Donde p es la presión estática, $\bar{\bar{\tau}}$ es el tensor de esfuerzo, $\rho \vec{g}$ es la fuerza gravitacional del cuerpo y S_i es el término fuente para medios porosos. El tensor de esfuerzo $\bar{\bar{\tau}}$ está dado por:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I] \quad (2.4)$$

Como se establece en el manual de usuario de *ANSYS Fluent* [4]. Donde μ es la viscosidad molecular, I es el tensor unitario y el segundo término del lado derecho es el efecto de la dilatación volumétrica.

Para modelos con medios porosos se agrega un término fuente de movimiento a las ecuaciones de flujo estándar:

$$S_i = -\left(\sum_{j=1}^3 D_{ij}\mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij}\frac{1}{2}\rho v_{mag}v_j\right) \quad (2.5)$$

Donde S_i es el término fuente para la ecuación de momento i -ésima (x, y, z) , y D y C son matrices definidas en el modelo de medio poroso. Esta pérdida de impulso afecta al gradiente de presión en la celda porosa, generando una caída de presión proporcional a la velocidad del fluido [4].

2.1.5.2 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE ENERGÍA

La ecuación de conservación de energía es uno de los principios fundamentales en la termodinámica y se basa en la primera ley de la termodinámica, la cual establece que la energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma de una forma a otra [18].

Esta ecuación considera el transporte de energía debido a la conducción, la convección y las reacciones químicas, así como las contribuciones debidas a la radiación. Para modelos con medios porosos se expresa como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma\rho_f E_f + (1-\gamma)\rho_s E_s) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho_f E_f + p)) = \nabla \cdot [k_{eff}\nabla T - \left(\sum_i h_i J_i\right) + (\bar{\bar{\tau}} \cdot \vec{v})] + S_f^h \quad (2.6)$$

Como se establece en el manual de usuario de *ANSYS Fluent* [4]. Donde E_f es la energía total del fluido, E_s es la energía total del medio sólido, γ es la porosidad del medio, k_{eff} es la conductividad térmica efectiva del medio, S_f^h es el término de fuente de entalpía de fluido, J_i es el flujo difusivo de i especies y $\bar{\bar{\tau}}$ es el tensor de esfuerzo.

La conductividad térmica efectiva del medio se calcula de la siguiente manera:

$$k_{eff} = \gamma k_f + (1 - \gamma)k_s \quad (2.7)$$

Como se establece en el manual de usuario de *ANSYS Fluent* [4]. Donde γ es la porosidad del medio, k_f es la conductividad térmica de la fase fluida y k_s es la conductividad térmica del medio sólido. [4]

2.1.5.3 VISCOSIDAD

La viscosidad en ANSYS Fluent se modela mediante varios enfoques que permiten representar diferentes tipos de flujo y turbulencia:

- No viscoso (*Inviscid*). Este modelo supone que la viscosidad es cero, ideal para flujos donde las fuerzas viscosas son insignificantes en comparación con las fuerzas de inercia.
- Laminar. Modelo para flujos laminares en los que no existen turbulencias. Se usa para simular fluidos con baja velocidad y sin fluctuaciones caóticas en su movimiento.
- *Spalart-Allmaras (1 eqn)*. Modelo de una ecuación que se emplea para flujos de capa límite y es particularmente útil en simulaciones aerodinámicas de baja y mediana complejidad.
- *k-epsilon (2 eqn)* y *k-omega (2 eqn)*. Son dos de los modelos más utilizados para la turbulencia. Ambos son modelos de dos ecuaciones que permiten resolver la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación o frecuencia específica. El modelo k-epsilon es adecuado para flujos de alta turbulencia, mientras que el k-omega es útil en condiciones de baja turbulencia y en capas cercanas a la pared.

- *Transition k-kl-omega (3 eqn)*. Este modelo simula la transición de flujo laminar a turbulento. Es adecuado para capturar mejor los efectos de transición en los flujos de capa límite.
- *Transition SST (4 eqn)*. Similar al modelo k-omega, pero incluye correcciones para capturar la transición laminar-turbulento y es más preciso en simular las capas de borde.
- *Reynolds Stress (5 eqn)*. Un modelo avanzado que resuelve las ecuaciones de las tensiones de Reynolds individualmente. Es adecuado para flujos con alta anisotropía de la turbulencia.
- *Scale-Adaptive Simulation (SAS)*. Este modelo ajusta automáticamente la escala de turbulencia y es adecuado para simulaciones en las que el tamaño de la malla no es uniforme.
- *Detached Eddy Simulation (DES)*. Combina un modelo RANS y uno LES, ideal para capturar grandes estructuras de turbulencia y es útil en simulaciones donde existen grandes estructuras de remolinos [4].

2.1.5.4 MODELOS DE RADIACIÓN

La radiación es un mecanismo fundamental de transferencia de calor que no requiere un medio material para propagarse. A diferencia de la conducción y la convección, que dependen de la presencia de sólidos o fluidos, la radiación térmica se transmite a través del espacio vacío mediante ondas electromagnéticas generadas por la agitación térmica de las moléculas, átomos y electrones en un cuerpo [11].

- *Rosseland*. Modelo utilizado principalmente para flujos ópticamente densos, donde la transferencia de radiación se representa mediante un enfoque de conductividad térmica efectiva. Su ecuación está dada por:

$$q_r = -16\sigma\Gamma n^2 T^3 \nabla T \quad (2.8)$$

Donde q_r es el flujo de calor radiativo, σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.670373 \times 10^{-8} \text{ Watt/m}^2\text{K}^4$), Γ es un parámetro definido en términos de la absorción y dispersión, n es el índice de refracción del medio, T es la temperatura local y ∇T es el gradiente de temperatura.

El flujo de calor radiativo tiene la misma forma que la ley de conducción de Fourier, lo que permite escribir:

$$q = q_c + q_r = -(k + k_r) \nabla T \quad (2.9)$$

Aquí, q_c es el calor por conducción, k representa la conductividad térmica y k_r es la conductividad radiativa dada por la ecuación 2.10.

$$k_r = 16\sigma\Gamma n^2 T^3 \quad (2.10)$$

- *P1.* Este modelo resuelve una forma simplificada de la ecuación de transferencia de radiación, adecuado para problemas que no requieren alta precisión en la distribución de energía radiativa. Su ecuación principal está dada por:

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla G) - aG + 4a\sigma T^4 = S_G \quad (2.11)$$

Donde G es la radiación incidente, a es el coeficiente de absorción, T temperatura local, S_G es la fuente de radiación definida por el usuario y Γ es el parámetro de difusión definido por la ecuación 2.12.

$$\Gamma = \frac{1}{3(a + \sigma_s - C\sigma_s)} \quad (2.12)$$

Con σ_s como coeficiente de dispersión y C un coeficiente anisotrópico lineal.

La expresión de flujo radiativo se simplifica a:

$$q_r = -\Gamma \nabla G \quad (2.13)$$

Finalmente, la divergencia del flujo radiativo es:

$$-\nabla \cdot q_r = aG - 4a\sigma T^4 \quad (2.14)$$

Estas ecuaciones se resuelven para obtener la intensidad local de la radiación.

- Transferencia Discreta (*Discrete Transfer DTRM*). Calcula la transferencia de radiación en trayectorias discretas, es útil para geometrías complejas y permite una solución detallada de la radiación en medios absorbentes y emisivos. Su ecuación principal se describe de la siguiente forma:

La variación de la intensidad radiante I a lo largo de un camino ds puede expresarse como:

$$\frac{dI}{ds} + aI = \frac{a\sigma T^4}{\pi} \quad (2.15)$$

Donde I es la intensidad radiante y T temperatura local del gas.

Si el coeficiente de absorción a es constante a lo largo del rayo, la intensidad radiante $I(s)$ se puede calcular como:

$$I(s) = \frac{\sigma T^4}{\pi} (1 - e^{-as}) + I_0 e^{-as} \quad (2.16)$$

Donde I_0 es la intensidad radiante al inicio del camino incremental y s longitud del camino.

Este modelo traza una serie de rayos que parten de las superficies de frontera y calcula la energía radiante sumando los cambios en la intensidad a lo largo del camino del rayo dentro de cada volumen de control.

- Superficie a superficie *Surface to Surface S2S*. Este modelo asume que solo las superficies participan en el intercambio de radiación. No considera la participación del gas en la transferencia radiativa, y es adecuado para problemas donde las superficies son las principales emisoras y receptoras de radiación.

La ecuación utilizada en este modelo considera el flujo de energía incidente y emitida. La energía que abandona una superficie dada $q_{out,k}$ incluye tanto la energía emitida directamente como la energía reflejada. La energía reflejada depende del flujo de energía incidente desde las superficies circundantes.

La ecuación se expresa como:

$$q_{out,k} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k q_{in,k} \quad (2.17)$$

Donde $q_{\text{out},k}$ es el flujo de energía que abandona la superficie k , ε_k emisividad de la superficie k , T_k temperatura de la superficie k , ρ_k es la reflectividad de la superficie y $q_{\text{in},k}$ es el flujo de energía incidente desde las superficies circundantes.

El flujo de energía incidente $q_{\text{in},k}$ sobre la superficie k se calcula utilizando el factor de vista F_{jk} , que determina la fracción de energía que deja la superficie k y alcanza la superficie j . Este flujo es:

$$A_k q_{\text{in},k} = \sum_{j=1}^N A_j q_{\text{out},j} F_{jk} \quad (2.18)$$

Donde A_k es el área de la superficie k .

Al utilizar la relación de reciprocidad $A_j F_{jk} = A_k F_{kj}$, el flujo incidente puede expresarse como:

$$q_{\text{in},k} = \sum_{j=1}^N F_{kj} q_{\text{out},j} \quad (2.19)$$

Finalmente, la ecuación general para el flujo energético saliente es:

$$q_{\text{out},k} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k \sum_{j=1}^N F_{kj} q_{\text{out},j} \quad (2.20)$$

Estas ecuaciones describen el balance energético radiativo en un entorno donde la radiación viaja directamente de una superficie a otra, sin interacción con el medio.

- Ordenadas Discretas (*Discrete Ordenates DO*). Es un modelo más completo y generalizado que resuelve la ecuación de transferencia de radiación en direcciones discretas, adecuado para geometrías complejas y medios donde el gas participa en la transferencia de radiación. Su ecuación está dada por:

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Phi \quad (2.21)$$

Donde I es la intensidad radiante, \vec{r} es el vector de posición, \vec{s} es el vector de dirección, a es el coeficiente de absorción de gases, σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.670373 \times 10^{-8} \text{ Watt/m}^2 \text{K}^4$), s es la longitud de la trayectoria, n

es el índice de refracción, σ_s es el coeficiente de dispersión, T es la temperatura local del gas, \vec{s}' es el vector de dirección de dispersión, Φ es la función de fase y Ω' es el ángulo sólido [4].

2.1.5.5 MODELOS DE COMBUSTIÓN

- *Transporte de especies.* Este modelo permite simular la mezcla y reacción de especies químicas dentro del dominio de flujo, considerando el transporte y la interacción entre múltiples especies. Su ecuación general es:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (2.22)$$

Donde R_i es la tasa neta de producción de especies i por reacción química, Y_i es la fracción másica de especies i y S_i es la tasa de creación por adición de la fase dispersa.

- *Combustión no premezclada.* Se aplica a procesos en los que el combustible y el oxidante están separados antes de la combustión, como en combustores de inyección directa. Se basa en la aproximación del fracción de mezcla (f) para describir el proceso de mezcla y reacción entre el combustible y el oxidante. La ecuación principal para este modelo es la siguiente:

$$\frac{\partial(\rho f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} f) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla f \right) + S_f \quad (2.23)$$

Como se establece en el manual de usuario de *ANSYS Fluent* [4]. Donde ρ es la densidad del fluido, f la fracción de mezcla, que varía entre $f = 0$ (oxidante puro) y $f = 1$ (combustible puro), \mathbf{v} es la velocidad del fluido, μ_t es la viscosidad turbulenta, σ_f es el número de Prandtl turbulento para la fracción de mezcla y S_f es el término fuente para la fracción de mezcla.

- *Combustión premezclada.* Este modelo es adecuado para situaciones en las que el combustible y el oxidante están completamente mezclados antes de la reacción de combustión, común en quemadores y motores de combustión interna.

Utiliza una ecuación de transporte basada en la variable de progreso para describir la evolución de la mezcla reactiva. La ecuación de la energía también es utilizada para calcular los efectos térmicos, y en el caso no adiabático, incluye términos adicionales para considerar pérdidas o ganancias de calor. Las ecuaciones clave incluyen:

1. Ecuación de la energía (no adiabática):

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} h) = \nabla \cdot \left[\left(k + \frac{\mu_t}{c_p} \right) \nabla h \right] + S_{h,\text{chem}} + S_{h,\text{rad}} \quad (2.24)$$

Como se establece en el manual de usuario de *ANSYS Fluent* [4]. Donde $S_{h,\text{chem}} = \rho S_c H_{\text{comb}} Y_{\text{fuel}}$ representa el calor liberado por la reacción química y $S_{h,\text{rad}}$ representa las pérdidas de calor por radiación.

2. Ecuación para la densidad en condiciones ideales:

$$\rho T = \rho_u T_u \quad (2.25)$$

Donde ρ_u y T_u son la densidad y temperatura de la mezcla no quemada, respectivamente.

- *Combustión parcialmente premezclada.* Modelo que considera una mezcla parcial del combustible y el oxidante antes de la combustión, capturando la complejidad de la mezcla incompleta. Resuelve una ecuación de transporte para la variable de progreso de reacción promedio c , además del fracción de mezcla promedio f y su varianza f'^2 . La ecuación básica para las cantidades escalares densidad-promediadas, como la fracción de especie o temperatura (ϕ), se representa como:

$$\phi = \int_0^1 \int_0^1 \phi(f, c) p(f, c) df dc \quad (2.26)$$

Bajo la suposición de llamas delgadas, donde solo existen reactantes no quemados y productos quemados, los escalares medios (ϕ) se determinan mediante:

$$\phi = c \int_0^1 \phi_b(f) p(f) df + (1 - c) \int_0^1 \phi_u(f) p(f) df \quad (2.27)$$

Donde ϕ_b son los escalares de la mezcla quemada, funciones de la fracción de mezcla f , ϕ_u son los escalares de la mezcla no quemada, $p(f, c)$ es la función

de densidad de probabilidad (PDF) de f y c , c es la variable de progreso que indica la posición del frente de llama ($c = 0$: reactantes no quemados, $c = 1$: productos quemados).

El modelo combina elementos de combustión premezclada y no premezclada, resolviendo por separado las propiedades de las mezclas quemadas y no quemadas en función de la fracción de mezcla y utilizando una combinación lineal de estas propiedades en la región de la llama.

- *Composition PDF transport.* Este enfoque modela la distribución de probabilidades de las especies químicas y las temperaturas, proporcionando un enfoque estadístico para la turbulencia y la química en la simulación de combustión. La ecuación de transporte para la PDF se expresa como:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}f) = \nabla \cdot (D\nabla f) - \frac{\partial}{\partial \phi} (\dot{\phi}f) + S_f \quad (2.28)$$

Donde f es la función de densidad de probabilidad (PDF), t es el tiempo, \mathbf{v} es la velocidad del flujo, D es el coeficiente de difusión molecular, ϕ es la variable de composición (mezcla), $\dot{\phi}$ es la tasa de cambio de la composición debido a reacciones químicas y S_f es el término fuente, que incluye efectos como turbulencia o interacción con otras variables [4].

2.1.6 RESISTENCIA VISCOSA

La resistencia viscosa es un fenómeno fundamental en la mecánica de fluidos, que describe la oposición de un fluido al movimiento debido a sus propiedades internas de viscosidad. La viscosidad es una propiedad intrínseca de los fluidos que determina su capacidad de resistir deformaciones inducidas por esfuerzos cortantes. Esta resistencia se debe a las interacciones moleculares dentro del fluido y se manifiesta como una fuerza interna que actúa en dirección opuesta al movimiento relativo de sus capas [20].

Se origina a causa de la viscosidad del fluido y de la fricción que sucede cuando el fluido se desplaza en contacto con las superficies sólidas del medio poroso, como las esferas de los medios porosos del quemador poroso divergente. Cuando el fluido atraviesa los poros (áreas vacías entre las partículas sólidas), su desplazamiento se ve restringido y ocurre una caída de presión.

Esta resistencia que presenta el fluido está determinada por factores como:

- Viscosidad del fluido: un fluido con mayor viscosidad muestra una mayor resistencia en comparación con uno con menor viscosidad.
- Geometría del medio poroso: las estructuras, dimensiones y formas de las partículas sólidas influyen en el flujo, dado que estos atributos establecen el espacio abierto para que el fluido se desplaza.
- Porosidad: la porosidad es una propiedad estructural de los materiales que describe la fracción del volumen total que está ocupada por poros o espacios vacíos en comparación con el volumen total del material. Se expresa generalmente como un porcentaje o una fracción adimensional [25].

Matemáticamente, la porosidad ϵ se define como:

$$\epsilon = \frac{V_p}{V_t} \quad (2.29)$$

Donde V_p es el volumen de los poros y V_t es el volumen total del material, incluyendo la matriz sólida y los poros.

Una porosidad elevada favorece el flujo al disminuir la resistencia, mientras que una porosidad reducida la potencia.

- Dimensiones de los poros: a menor tamaño de los poros, se incrementa la resistencia, dado que el fluido cuenta con menos espacio para su flujo libre.

Se calcula como el inverso de la permeabilidad absoluta, la cual se determina utilizando la ecuación de Blake-Kozeny, válida para flujos laminares. En dicha ecuación

ción, α es la permeabilidad, D_p es el diámetro promedio de las partículas, y ϵ es la porosidad [4].

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon^2)} \quad (2.30)$$

2.1.7 PRESIÓN DE SALIDA Y CAÍDA DE PRESIÓN

Para las simulaciones numéricas es necesario contar con condiciones de frontera y una de ellas es la presión de retorno o presión de salida del sistema, la cual se calcula por medio de la Ecuación (2.31) donde ΔP es la caída de presión (esta se debe a la combinación de resistencia al flujo, fricción con las paredes, cambios en la velocidad del fluido y pérdidas menores asociadas con accesorios y cambios de dirección [23]), la cual se obtiene de la Ecuación (2.32), y donde L es la longitud del lecho poroso, μ es la viscosidad y v_∞ es la velocidad superficial del fluido.

$$P_{salida} = P_{entrada} - \Delta P \quad (2.31)$$

$$\frac{|\Delta P|}{L} = \frac{150\mu}{D_p^2} \frac{(1 - \epsilon^2)}{\epsilon^3} v_\infty \quad (2.32)$$

2.2 ANTECEDENTES

En los últimos años, se ha llevado a cabo una amplia gama de estudios que investigan el comportamiento de los quemadores porosos y el impacto del hidrógeno como aditivo en estos sistemas. Estas investigaciones abarcan tanto análisis experimentales como estudios numéricos, cuyo objetivo es profundizar en la comprensión

de los complejos procesos de combustión que ocurren en medios porosos inertes y en aquellos quemadores que integran hidrógeno en su mezcla de combustible.

A través de experimentos controlados y simulaciones numéricas, los investigadores han podido observar cómo el hidrógeno influye en la estabilidad de la llama, la temperatura de combustión y la formación de subproductos, lo que resulta crucial para desarrollar tecnologías de combustión más sostenibles. Como Nozari et al. [21] que evaluaron experimentalmente la estabilidad de la llama y la eficiencia de combustión en llamas premezcladas de amoníaco-hidrógeno-aire utilizando un quemador con medio poroso de carburo de silicio (SiC). Analizaron mezclas con altos contenidos de amoníaco (60-90 % en volumen) bajo condiciones estándar de temperatura y presión, determinando los límites superiores e inferiores de estabilidad. Encontraron que el uso del medio poroso permitió estabilizar la llama en un amplio rango de razones de equivalencia y mejorar la eficiencia de combustión. Además, observaron que las temperaturas medidas coincidían con las temperaturas adiabáticas predichas, lo que indica una combustión casi completa, con pequeñas diferencias atribuidas a pérdidas de calor.

Otros estudios consultados para esta investigación se clasifican en tres categorías principales según el enfoque metodológico: investigaciones realizadas en el ámbito industrial, en entornos residenciales y análisis numéricos. Cada una de estas categorías proporciona una perspectiva única y complementaria sobre el comportamiento de los quemadores porosos y el uso de hidrógeno, lo que permite una evaluación más completa de su viabilidad y eficiencia en diferentes contextos de aplicación.

Varios investigadores han centrado sus esfuerzos en el estudio de los quemadores en la industria. Mayrhofer et al. [17] evaluaron la viabilidad de utilizar mezclas de gas natural e hidrógeno como combustible alternativo en hornos de tratamiento térmico industrial. Sus hallazgos indican que dichas mezclas pueden emplearse en una amplia gama de condiciones operativas sin afectar significativamente la calidad del producto final. Sin embargo, también señalaron que la implementación de estas mezclas como combustible alternativo requiere una inversión inicial considerable en

infraestructura y equipos de suministro de gas. Por otro lado, Ripoll y Toledo [24] investigaron la producción de hidrógeno y gas de síntesis en la combustión rica en metano-acetileno dentro de un quemador con medio poroso inerte. Implementaron un quemador cilíndrico donde midieron temperaturas, velocidades y concentraciones de especies químicas en mezclas de metano-aire con adición de acetileno a diferentes relaciones de equivalencia. Encontraron que la adición de 2.5 % de acetileno en la mezcla incrementó la producción de H_2 en un 3.04 % para $\varphi = 1.2$ y en un 0.36 % para $\varphi = 2.4$, además de un aumento del 11 % en la producción de CO para $\varphi = 1.2$.

Otros investigadores han examinado el impacto social de los quemadores con medio porosos y la implementación del hidrógeno en el uso doméstico. Soltanian et al. [27] investigaron la eficiencia térmica, la exergía y las emisiones en un quemador de cocina con medio poroso de SiC operando con gas natural. Evaluaron su desempeño en un rango de 1 a 4 m^3/h , determinando que el punto óptimo de operación fue 1.338 m^3/h , donde la eficiencia térmica alcanzó 29.2 % y la exergética 7.9 %, mientras que las emisiones de NO_x y CO se redujeron en un 61 % y 50 %, respectivamente. Zhao et al. [32] evaluaron la combustión de un horno comercial residencial que utiliza gas natural mezclado con hidrógeno y hallaron que se puede añadir un 25 % (en volumen) de hidrógeno al gas natural sin efectos significativos. Sin embargo, por encima de esta cantidad, el retroceso de llama en el tubo del quemador se convierte en un factor limitante. Además, el hidrógeno tiene un impacto mínimo en las emisiones de NO_x y disminuye las de CO . Sorgulu et al. [28] investigaron los efectos de la adición de hidrógeno al gas natural en términos de consumo, tiempo de calentamiento y valor calorífico. Compararon la combustión de gas natural en una estufa con la de una mezcla de gas natural e hidrógeno, encontrando que se puede ahorrar un 8 % de gas natural cuando la fracción volumétrica de hidrógeno es del 20 %, mientras que el tiempo de calentamiento aumentó un 15.9 % a esta misma fracción.

En el ámbito del análisis numérico, hay información limitada, ya que la mayoría de las investigaciones se centran en el análisis experimental sin desarrollar modelos numéricos para estudios posteriores. Algunos investigadores que desarrollaron mo-

delos de dinámica de fluidos computacional son Celtek y Pınarbaşı [3], quienes investigaron experimentalmente la combustión de gas natural en un sistema industrial de quemador-caldera de baja turbulencia y utilizaron los resultados obtenidos del montaje experimental como condiciones de frontera para las simulaciones de CFD. Como resultado, encontraron que en las mezclas de gas natural e hidrógeno, el nivel de emisión de NO_x aumenta. Pashchenko [22] realizó un modelado CFD de la combustión de combustible sintético (rico en hidrógeno) en una llama turbulenta. Por su parte, Gonzales [6] llevó a cabo un análisis teórico y experimental de la combustión de mezclas de gas natural y gases de síntesis en una combustión sumergida en un medio poroso inerte y en una combustión estabilizada en la superficie de un medio poroso inerte, variando la relación de H_2 a CO . Sus resultados muestran que el modo de combustión sumergida permite la intercambiabilidad de las mezclas de combustibles, mientras que en el modo de combustión estabilizada no ocurre de la misma manera. Kislinger et al. [14] investigaron los efectos de la combustión de hidrógeno en el proceso de calentamiento de muestras de acero en un horno semi-industrial con un quemador de baja turbulencia, comparándolo con la combustión de metano mediante simulaciones CFD y ensayos experimentales. Implementaron un modelo numérico transitorio basado en RANS para analizar el flujo turbulento y reducir los tiempos de cálculo en un 90 %. Encontraron que, para alcanzar la misma temperatura de 1060 °C, la combustión de hidrógeno requirió un 25 % menos de energía en comparación con el metano (70 kW frente a 94 kW). Además, el hidrógeno generó un 13 % de aumento en la velocidad de calentamiento debido a una mayor transferencia de calor por convección. Por último, Al-ajmi et al. [1] investigaron la combustión de hidrógeno y mezclas hidrógeno-metano en quemadores industriales mediante simulaciones CFD en ANSYS Fluent, usando el modelo $k - \epsilon$ y el mecanismo GRI-Mech 3.0. Evaluaron temperaturas, emisiones de NO_x y estabilidad de la llama, encontrando que una mezcla con 75 % de hidrógeno optimizó la temperatura (1900 K) y redujo NO_x (5.39×10^{-6}) y CO_2 (0.137), aunque con impacto en la estabilidad. La combustión de hidrógeno puro alcanzó 2080 K, aumentando significativamente las emisiones de NO_x .

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA DE LA TESIS

3.1 METODOLOGÍA GENERAL DE LA TESIS

En la Figura 3.1 se muestra la metodología general de la tesis de una manera simplificada.

3.2 PLAN DE TRABAJO

- Se buscará información en la literatura existente acerca de los tipos de quemadores de gas como sus modelos y geometrías.
- Se hará el diseño del modelo CAD del quemador con base en alguno ya utilizado experimentalmente.
- Se diseñará el mallado de la simulación en el software ANSYS Fluent 2024 R2.
- Con base en la literatura se determinarán los parámetros de operación de la simulación de la combustión.
- A partir de la literatura se elegirán modelos matemáticos adecuados para la simulación del fenómeno de combustión.

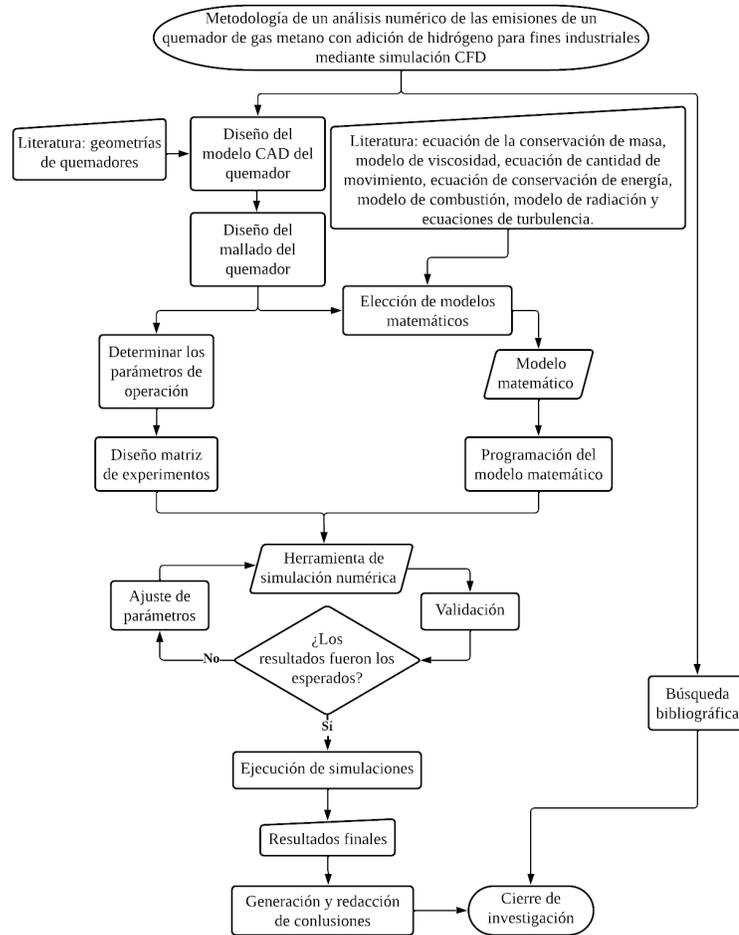


FIGURA 3.1: Diagrama de flujo de la metodología general de la tesis

- Se hará un análisis de sensibilidad de malla diseñada para seleccionar la malla más conveniente.
- Se ejecutarán las simulaciones con base en los parámetros y malla definidos anteriormente.
- Se analizarán los resultados obtenidos para la validación del modelo CFD.
- Se analizarán los resultados obtenidos de las mezclas de de CH_4 e H_2 contra los del CH_4 .
- Se generarán las conclusiones sobre los resultados obtenidos.

3.3 GEOMETRÍA DEL QUEMADOR

En la Figura 3.2 se observa el modelo geométrico de un quemador construido en acero inoxidable 304, conforme al estudio experimental llevado a cabo por Liu et al. [15] y en la Tabla 3.1 se muestran las ubicaciones de los termopares utilizados para medir las temperaturas al interior del quemador.

Este dispositivo cuenta con medios porosos compuestos por esferas de alúmina (Al_2O_3) de diversos diámetros. En la sección aguas arriba del quemador, se implementaron esferas de Al_2O_3 con un diámetro de 3 mm y una porosidad de 0.4, mientras que en la sección aguas abajo se utilizaron esferas de 6 mm de diámetro con una porosidad de 0.43.

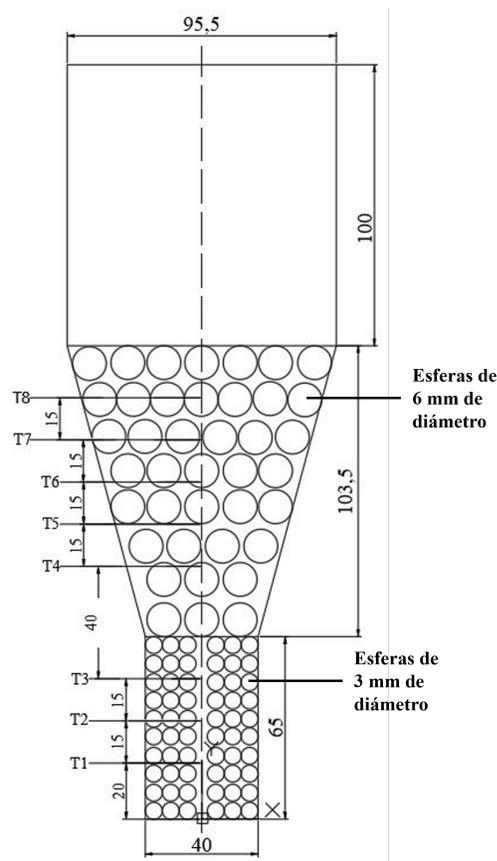


FIGURA 3.2: Modelo geométrico del quemador divergente con medios porosos y ubicaciones de los termopares

Número de termopar	Distancia desde la entrada del quemador (mm)
1	20
2	35
3	50
4	90
5	105
6	120
7	135
8	150

TABLA 3.1: Distancias de los termopares desde la entrada del quemador

3.4 MÉTODOS NUMÉRICOS

Las simulaciones del modelo CFD se realizaron mediante el software de simulación ANSYS Fluent 2024 R2 con una licencia de estudiante. Para llevar a cabo las simulaciones de este modelo se utilizaron las siguientes ecuaciones de gobierno:

3.4.1 ECUACIÓN DE LA CONSERVACIÓN DE LA MASA

Esta ecuación se basa en el principio de que la masa total de un fluido que entra en un sistema debe ser igual a la masa total que sale, asumiendo que no hay acumulación de masa dentro del sistema. Matemáticamente, esta ecuación de continuidad se expresa de la siguiente manera para un flujo incompresible (donde la densidad del fluido no varía significativamente):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \nu) = 0 \quad (3.1)$$

Donde ρ es la densidad, t es el tiempo y ν es la velocidad.

Para un dominio de 2 dimensiones (2D) y en estado estable, queda de la si-

guiente manera:

$$\frac{\partial(\rho\nu_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\nu_y)}{\partial y} = 0 \quad (3.2)$$

3.4.2 ECUACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

La ecuación de cantidad de movimiento desarrollada para un modelo bidimensional (2D) bajo condiciones estables se deriva a partir de la Ecuación (2.3). Partiendo de esta ecuación, y considerando las hipótesis simplificadoras para un flujo en estado estacionario (sin dependencia temporal), la ecuación se reduce a una forma donde se consideran las componentes en las direcciones (x, y) . Dichas componentes permiten representar el comportamiento del flujo en función de las variables espaciales y las propiedades físicas del fluido, quedando de la forma siguiente:

En la dirección x

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \rho g_x + S_x \quad (3.3)$$

En la dirección y

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \rho g_y + S_y \quad (3.4)$$

3.4.3 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE ENERGÍA

Esta ecuación describe cómo la energía total de un sistema se distribuye y transforma a lo largo del tiempo y del espacio. Esta ecuación se deriva aplicando el principio de conservación de la energía, que establece que la energía no puede crearse ni destruirse, solo puede cambiar de forma o transferirse entre sistemas. Esta ecuación para medios porosos y tomando en cuenta una geometría 2D en estado

estable, queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (v_x(\rho_f E_f + p)) + \frac{\partial}{\partial y} (v_y(\rho_f E_f + p)) = & \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_i h_i J_i \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\sum_i h_i J_i \right) + S_f^h \end{aligned} \quad (3.5)$$

Donde:

- k_{eff} : es la conductividad efectiva y se calcula mediante la ecuación 2.7.
- $\vec{v}(\rho_f E_f + p)$: es el **término convectivo** y describe el transporte de energía debido al movimiento del fluido en las direcciones x y y .
- $k_{\text{eff}} \nabla T$: es el **término difusivo** y representa la conducción de calor a través del medio poroso en función de la conductividad térmica efectiva.
- $\sum h_i J_i$: es el **término de difusión de especies** y considera el transporte de energía asociado al flujo difusivo de especies en el fluido.
- $\bar{\tau} \cdot \vec{v}$: es el **término de trabajo viscoso** y representa la disipación de energía debido a los esfuerzos viscosos en el fluido.
- S_f^h : es el **término fuente** e incluye cualquier aporte adicional de entalpía al sistema, como fuentes de calor volumétricas.

3.4.4 ECUACIÓN DE TRANSPORTE DE ESPECIES

Como modelo de combustión se seleccionó la ecuación de transporte de especies. Esta ecuación describe cómo varía la concentración o densidad de una especie química en función del tiempo y la posición espacial, considerando fenómenos como la difusión, la convección y la generación o consumo de la especie. Al desarrollar la

Ecuación (2.22) a un modelo bidimensional y en estado estable queda una ecuación como la siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v Y_i) = \rho D_{i,m} \nabla^2 Y_i + D_{i,m} Y_i \nabla \cdot \left(\frac{\nabla p}{p} \right) \\ + \frac{D_{i,T}}{T} \nabla^2 T + R_i + S_i \end{aligned} \quad (3.6)$$

Donde:

- ρ : densidad del fluido.
- u, v : componentes de la velocidad en las direcciones x y y .
- Y_i : fracción másica de la especie i .
- $D_{i,m}$: coeficiente de difusión molecular de la especie i .
- $D_{i,T}$: coeficiente de difusión térmica.
- $\nabla^2 Y_i = \frac{\partial^2 Y_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y_i}{\partial y^2}$: Laplaciano de la fracción másica.
- $\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$: Laplaciano de la temperatura.
- $\nabla \cdot \left(\frac{\nabla p}{p} \right)$: efecto de gradientes de presión en la difusión.
- R_i : término de reacción química de la especie i .
- S_i : término fuente adicional.

3.4.5 MODELO DE RADIACIÓN

Para la elección del modelo de radiación de este modelo CFD, fue necesario calcular el grosor óptico (aL , donde a es el coeficiente de absorción y L es la longitud del dominio), ya que, el manual de usuario de ANSYS Fluent [4], menciona que a cada modelo de radiación le corresponde un valor de este parámetro, para el modelo de Radiación de Transferencia Discreta (DTRM) y para el modelo de Ordenadas

Discretas (DO) el grosor óptico debe ser $aL < 1$, para el modelo de radiación P-1 y el modelo de radiación de Rosseland debe ser $aL \gg 1$. De acuerdo con el resultado obtenido de nuestro modelo, que fue igual a 0.1611, significa que $aL < 1$, por lo que se seleccionó el modelo DO y no el DTRM, ya que, el modelo DO considera importante la dispersión, mientras que el DTRM la ignora.

3.4.5.1 MODELO DE RADIACIÓN DE ORDENADAS DISCRETAS *DO*

Tomando como base la Ecuación (2.21), se desarrolla para un modelo 2D y en estado estable. La ecuación resultante en coordenadas cartesianas (x, y) para la intensidad de radiación $I(x, y, \vec{s})$ queda:

$$s_x \frac{\partial I}{\partial x} + s_y \frac{\partial I}{\partial y} + (a + \sigma_s)I = \frac{an^2\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{2\pi} \int_0^{2\pi} I(x, y, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (3.7)$$

Donde:

- s_x y s_y : componentes direccionales del vector \vec{s} , que representan la dirección de propagación de la radiación.
- $\frac{\partial I}{\partial x}$ y $\frac{\partial I}{\partial y}$: derivadas espaciales de la intensidad I en las direcciones x y y , respectivamente.
- a : coeficiente de absorción del medio.
- σ_s : coeficiente de dispersión del medio.
- n : índice de refracción del medio.
- σ : constante de Stefan-Boltzmann.
- T : temperatura local en el punto (x, y) .
- $\Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}')$: función de fase que describe cómo se dispersa la radiación.
- $\int_0^{2\pi} d\Omega'$: integral sobre todas las direcciones posibles del ángulo sólido en un plano 2D.

3.4.6 ECUACIONES DE TURBULENCIA

No se consideró ninguna ecuación de turbulencia ya que, calculando los números de Reynolds (con la Ecuación (3.8)) para los dos tipos lechos porosos de tipo “packed-bed” (el primero con las esferas de alúmina con diámetros de 3 mm y porosidad de 0.4, y el segundo con esferas de 6 mm y porosidad de 0.43), se encontró que estos números fueron menores a 1 (donde $Re > 100$ representa un flujo turbulento, $Re = 1$ a 100 representa una mezcla de flujo laminar y turbulento y $Re < 1$ representa un flujo laminar), siendo Re para el primer lecho igual a 1.24×10^{-3} y para el segundo igual a 2.48×10^{-3} , por lo que se determina que el tipo de flujo es laminar.

$$Re = \frac{\rho u d_p}{\eta} \quad (3.8)$$

Donde ρ es la densidad del gas en g/cm^3 , u es la velocidad lineal del gas en cm/s , d_p es el diámetro de las partículas del lecho poroso en cm y η es la viscosidad del gas en *poise*.

3.5 CONDICIONES DE FRONTERA

Las condiciones de frontera del modelo CFD se especifican en detalle en la Figura 3.3. En esta figura, se observa que en la entrada del sistema, tanto la velocidad del flujo como la temperatura se mantienen constantes y en la salida del sistema, se definen condiciones de frontera donde la presión como la temperatura de retorno permanecen constantes, conforme a los datos experimentales obtenidos por Liu et al. [15].

Además, se considera una condición de simetría a lo largo del eje y . En esta región, se asume que no hay variaciones en la velocidad del flujo, la temperatura, ni en la concentración de las especies químicas, lo que simplifica el modelo y reduce la complejidad computacional al aprovechar las propiedades inherentes de simetría del sistema. Esto implica que las derivadas de estas variables respecto al eje x son cero.

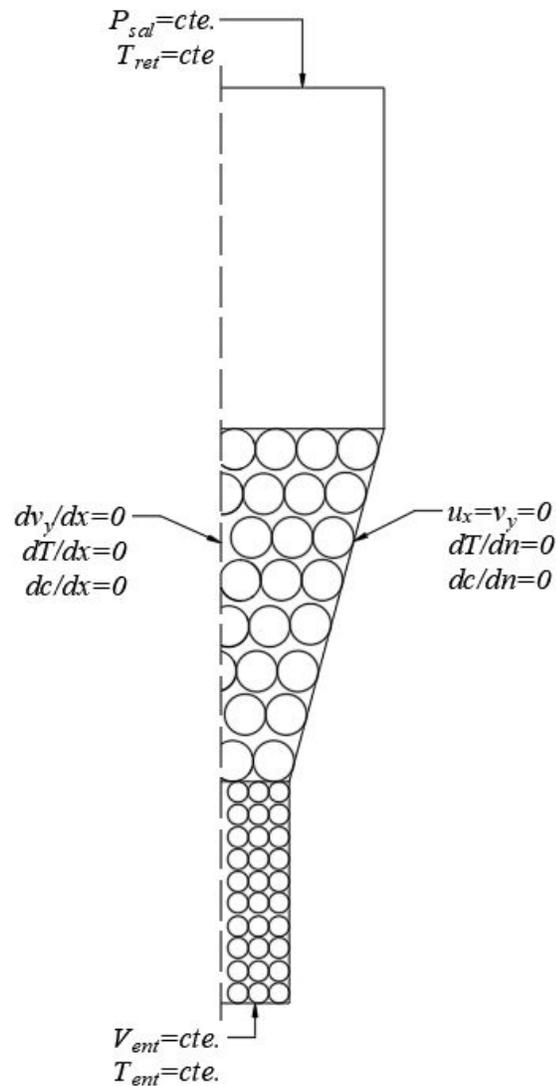


FIGURA 3.3: Condiciones de frontera del modelo geométrico

En cuanto a la superficie de la pared del sistema, se aplica la condición de no desplazamiento, lo cual significa que la velocidad del flujo en contacto con la pared es nula. Esta condición en la dinámica de fluidos refleja la interacción física real entre el fluido y la superficie sólida, donde el fluido tiende a adherirse a la pared. La condición de no desplazamiento también implica que las moléculas de fluido en contacto directo con la pared adoptan la velocidad de la pared misma, que en este caso es cero.

3.6 MATRIZ EXPERIMENTAL

Se optó por añadir el hidrógeno (H_2) en proporciones de 10 % hasta el 30 % en la mezcla, debido a que, con incrementos menores como del 5 %, no se encuentran diferencias significativas, y al superar el 30 % de H_2 , algunos autores han encontrado que se empiezan a presentar problemas en la velocidad y estabilidad de la llama. Zhao et al. [32] mencionan que, al exceder el 25 % de H_2 , empieza a ocurrir el fenómeno de retroceso en la llama.

La Tabla 3.2 muestra las tres relaciones de equivalencia seleccionadas, basadas en los valores utilizados por Liu et al. [15], junto con las correspondientes proporciones de gas metano (CH_4) e hidrógeno (H_2) consideradas en cada caso. Para cada relación de equivalencia (φ), se evaluaron mezclas con contenido de hidrógeno del 0 %, 10 %, 20 % y 30 %.

TABLA 3.2: Matriz experimental

Relación de equivalencia	Proporción de H_2 en la mezcla
0.45	100 % CH_4
	90 % CH_4 - 10 % H_2
	80 % CH_4 - 20 % H_2
	70 % CH_4 - 30 % H_2
0.5	100 % CH_4
	90 % CH_4 - 10 % H_2
	80 % CH_4 - 20 % H_2
	70 % CH_4 - 30 % H_2
0.55	100 % CH_4
	90 % CH_4 - 10 % H_2
	80 % CH_4 - 20 % H_2
	70 % CH_4 - 30 % H_2

3.7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE MALLA

Previo a la realización del análisis de las temperaturas, se estableció una propuesta que incluye tres tipos distintos de mallas, cada una con una cantidad específica de elementos, como se puede observar en la Tabla 3.3 . La primera configuración, denominada Malla 1, está compuesta por un total de 13,265 nodos y 12,908 elementos. La segunda, nombrada como Malla 2, presenta una mayor resolución con 78,853 nodos y 77,507 elementos. Finalmente, la tercera configuración, referida como Malla 3, incluye un aún mayor número de nodos, alcanzando los 562,492 nodos y 560,262 elementos. Estas tres mallas fueron diseñadas para evaluar cómo la densidad de nodos influye en la precisión y detalle del análisis térmico, permitiendo una comparación de los resultados obtenidos con cada una de las configuraciones propuestas.

TABLA 3.3: Análisis de independencia de malla

Malla	Número de elementos	Relación de aspecto	Ortogonalidad	Skewness	Tiempo de computo (minutos)	% desviación
Malla 1	12,908	1.2335	0.99424	5.1388e-4	54	10.49
Malla 2	77,507	1.2722	0.99538	4.2158e-2	81	8.50
Malla 3	560,262	1.1667	0.99761	3.0702e-4	235	8.25

Cabe señalar que, como se mencionó previamente, la simulación se realizó utilizando una licencia de estudiante de ANSYS Fluent 2024 R2, la cual permite un máximo de 1,000,000 de nodos o celdas en simulaciones de fluidos (CFD). Además, se observó que el uso de mallas con una mayor cantidad de nodos que la Malla 3 no produjo mejoras significativas en los resultados, lo que confirmó que dicha configuración representaba un equilibrio óptimo entre precisión numérica y eficiencia computacional.

Tras analizar los resultados de temperatura obtenidos con las tres configuraciones de malla, se optó por utilizar la Malla 2, ya que mostró una mejor correlación con

los datos experimentales, como se aprecia en la Figura 3.4. En dicha figura, aparentemente sólo se distinguen la curva correspondiente a los resultados experimentales de Liu et al. [15] y la de la Malla 2; sin embargo, esto se debe a que las tres propuestas de malla presentaron diferencias mínimas en sus porcentajes de desviación, por lo que las curvas resultantes se superponen visualmente al ubicarse en valores muy similares.

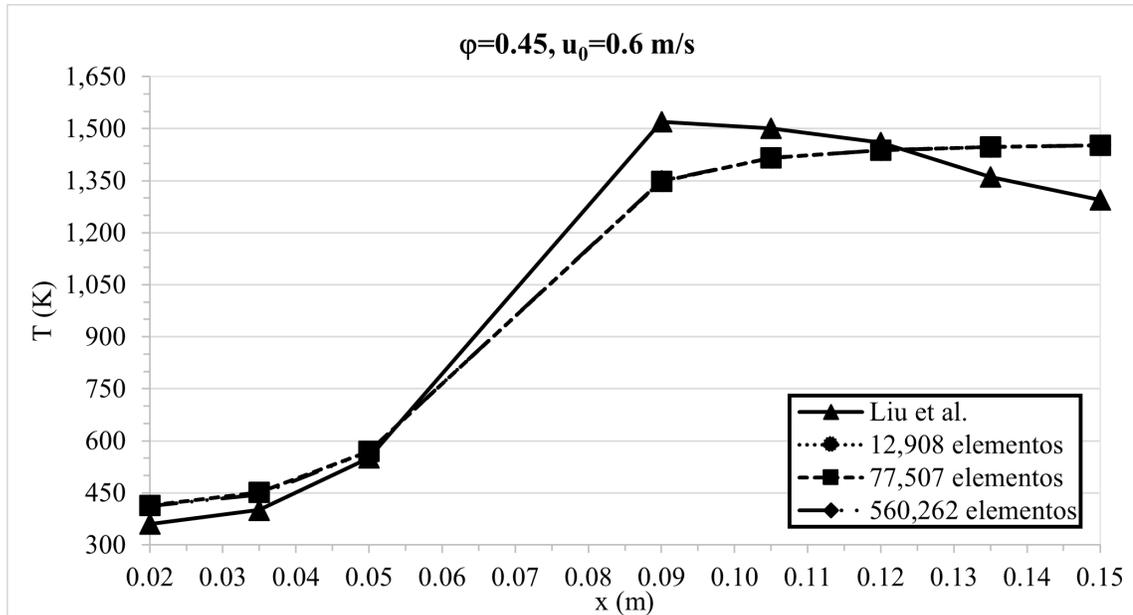


FIGURA 3.4: Temperaturas obtenidas mediante la simulación CFD en cada propuesta de malla, en comparación con las temperaturas obtenidas experimentalmente por Liu et al. [15]

Además, esta malla presentó una ventaja significativa en términos de eficiencia computacional, ya que requirió un menor tiempo de procesamiento en comparación con la Malla 3. Esto se muestra en la Figura 3.5, donde se comparan el número de elementos de cada malla, el tiempo de cómputo requerido y la diferencia porcentual en los resultados de temperatura. Esta diferencia porcentual se calculó mediante la Ecuación (3.9), donde % representa el porcentaje de diferencia entre las temperaturas obtenidas experimentalmente por Liu et al. [15] y las temperaturas obtenidas en la simulación numérica; T_{exp} corresponde a la temperatura obtenida experimentalmente y T_{sim} la temperatura obtenida en la simulación.

$$\% = \frac{T_{sim} - T_{exp}}{T_{exp}} \times 100 \quad (3.9)$$

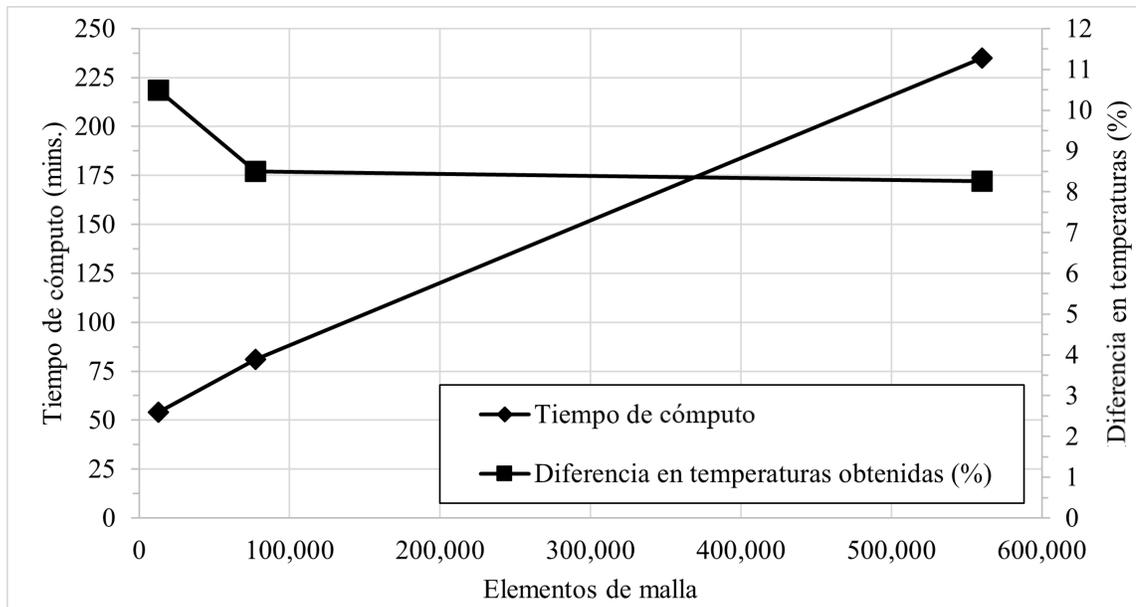


FIGURA 3.5: Resultados del análisis de independencia de la malla.

Para proceder con la validación de los resultados arrojados por la simulación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) frente a los datos experimentales, se estableció una relación de equivalencia igual a 0.45 y una velocidad de entrada del flujo de 0.6 m/s. Estos parámetros se seleccionaron para permitir una comparación de las temperaturas obtenidas experimentalmente y las obtenidas por medio de la simulación CFD. La elección de estos parámetros se basó en las condiciones experimentales que emplearon Liu et al. [15] para aplicarse en la simulación CFD, facilitando así la validación.

3.8 METODOLOGÍA DE LA SIMULACIÓN CFD

Tal como se mencionó previamente en la Sección 3.4, la simulación numérica se realizó utilizando el software ANSYS Fluent 2024 R2. A continuación, se detallan los procedimientos seguidos para la configuración del modelo, desde la generación de la malla hasta la selección de los modelos físicos y la definición de las condiciones de frontera.

3.8.1 DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO

La geometría del quemador, diseñada experimentalmente por Liu et al. [15], con una altura total de 168.5 mm y entrada por la parte inferior, fue importada al módulo de mallado de ANSYS. Se evaluaron tres tamaños distintos de malla y, conforme al análisis de sensibilidad descrito en la Sección 3.7, se seleccionó la opción que ofrecía un equilibrio entre precisión numérica y tiempo de cómputo. La malla final utilizada en la simulación cuenta con 78,853 nodos y 77,507 elementos.

3.8.2 DEFINICIÓN DEL MEDIO POROSO

El quemador incluye dos zonas con material poroso de alúmina sólida:

- Primera sección: esferas de 3 mm de diámetro, porosidad 0.4, longitud 65 mm.
- Segunda sección: esferas de 6 mm, porosidad 0.43, longitud 103.5 mm.

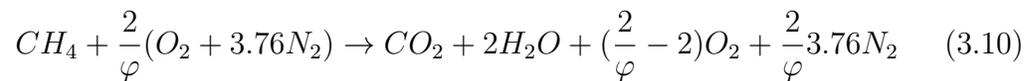
Estas zonas fueron modeladas mediante el enfoque de medios porosos isotrópicos (tienen la misma resistencia al paso del fluido en cualquier dirección (x, y, z)), incorporando las propiedades físicas del sólido, tales como densidad, coeficiente de

absorción e índice de refracción constantes, capacidad calorífica variable y conductividad térmica dependiente de la temperatura, además de configurar los valores de permeabilidad para cada medio, calculados mediante la Ecuación (2.30).

3.8.3 MODELOS UTILIZADOS

Tal cómo se definió en la Sección 3.4, se activaron los siguientes modelos:

- Energía: para calcular la transferencia de calor.
- Flujo laminar: debido a las características del régimen de flujo estimado.
- Transporte de especies: se habilitó el modelo de reacciones volumétricas utilizando el mecanismo cinético methane-air two-step, considerando a la entrada las especies CH_4 , O_2 , N_2 . La selección de estas especies se basó en la ecuación de reacción metano/aire reportada por Liu et al. [15].



- Radiación: se activó el modelo de Ordenadas Discretas (DO) por su capacidad de resolver la transferencia radiativa en medios complejos como los porosos.
- Análisis de NO_x : se consideraron tanto la formación térmica como la prompt (rápida), dada la relevancia de estos contaminantes en procesos de combustión.

3.8.4 CONDICIONES DE FRONTERA

Las condiciones de frontera se definieron tomando como referencia las especificadas para el quemador experimental de Liu et al. [15], de la siguiente manera:

- Entrada: flujo másico constante con temperatura de 298 K y presión de 500,000 *Pa*. Las mezclas se configuraron con las relaciones de equivalencia $\varphi = 0.45, 0.5$ y 0.55.
- Salida: se aplicó una condición de presión (pressure outlet), es decir, se especificó la presión de salida del dominio como referencia para el flujo. Esta presión de salida se calculó mediante la Ecuación (2.30) y dio como resultado 398,662 *Pa*.
- Paredes: se establecieron como adiabáticas con condición de no deslizamiento, lo que implica que no hay pérdida o ganancia de calor hacia el exterior y la velocidad del fluido es cero en contacto con las superficies.

3.8.5 CRITERIOS DE CONVERGENCIA

Durante la simulación, se monitorearon los residuos numéricos de cada ecuación resuelta (masa, momento, energía, especies, etc.). Se consideró que una solución era convergente cuando los residuos descendían por debajo de 1×10^{-5} para la mayoría de las variables, y los perfiles de temperatura en puntos de interés mostraban estabilidad. Este criterio garantiza que la solución no varía significativamente con iteraciones adicionales y es físicamente aceptable.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) validado aplicado al estudio del quemador divergente con medios porosos que utiliza gas metano como combustible. La validación se realizó comparando los resultados de las temperaturas obtenidas por el modelo CFD con los datos experimentales previamente reportados por Liu et al. [15]. Además, se presentan los efectos de la adición de hidrógeno al gas metano sobre las temperaturas de combustión y las emisiones contaminantes, en particular las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2), en función de la relación estequiométrica. El análisis se enfoca en cómo estas emisiones varían con la introducción de diferentes porcentajes de hidrógeno en la mezcla de combustibles.

4.1 TEMPERATURAS USANDO GAS METANO COMO COMBUSTIBLE

Los resultados de las temperaturas obtenidos mediante la simulación CFD de combustión usando sólo gas metano (CH_4) como combustible en este quemador poroso divergente mostraron una alta afinidad con los datos experimentales reportados

por Liu et al. [15]. Se analizaron diferentes relaciones de equivalencia: 0.45, 0.5 y 0.6, en todos los casos, se utilizó una velocidad de entrada de 0.6 m/s, ya que fue la velocidad común empleada en los experimentos de referencia para estas relaciones de equivalencia. Finalmente, se seleccionó la relación de 0.45 por presentar la menor desviación axial promedio en los resultados de temperatura (8.5 %) en comparación con las desviaciones observadas para 0.5 (11.65 %) y 0.55 (13.76 %), como se ilustra en las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4.

De acuerdo con lo que se observa en la Figura 4.2 y en la Tabla 4.1, la mayor desviación en la simulación con relación de equivalencia de 0.45 se presenta en la ubicación del primer (0.05 m), segundo (0.035 m) y octavo termopar (0.15 m). Esto podría deberse al valor de la resistencia viscosa de las esferas de alúmina (AL_2O_3) que conforman los dos medios porosos, así como a la presión de salida. Dado que no se contaba con los valores experimentales obtenidos por Liu et al. [15], la resistencia viscosa fue calculada utilizando la ecuación de Blake-Kozeny (Ecuación (2.30)) para flujos laminares; mientras que los cálculos usando la (Ecuación (2.31)) para la presión de salida dieron como resultado 398,662 Pa, lo que nos indica que la caída de presión fue de 101,338 Pa y puede considerarse una caída razonable que no afectó la estabilidad de la llama.

Además, la ausencia de un valor experimental para la temperatura de entrada y de un resultado experimental para la temperatura de salida motivó la simplificación del modelo geométrico hasta el final del segundo medio poroso, como se observa en la (Figura 4.1). Esto se debe a la falta de resultados experimentales en el área libre del quemador. Esto provocó que las temperaturas obtenidas en algunas posiciones a lo largo del eje de simetría del modelo CFD del quemador poroso divergente presentaran las desviaciones que se muestran en este trabajo.



FIGURA 4.1: Geometría simplificada del modelo geométrico.

TABLA 4.1: Desviación de las temperaturas obtenidas con la Malla 2.

Termopares	Ubicación (mm)	Liu et al. [15] T (K)	Malla 2 T (K)	% desviación
T1	20	360	412.66	14.63
T2	35	400	450.99	12.75
T3	50	550	570.09	3.65
T4	90	1520	1348.48	11.28
T5	105	1500	1416.01	5.60
T6	120	1460	1437.72	1.53
T7	135	1360	1447.52	6.44
T8	150	1295	1451.95	12.12
% desviación promedio				8.50

4.1.1 RELACIONES DE EQUIVALENCIA

En la Figura 4.2 se detallan los resultados experimentales y simulados para una relación de equivalencia de 0.45, donde se aprecia una coincidencia notable entre ambos, con desviaciones mínimas.

La Figura 4.3 muestra los resultados obtenidos para la relación de equivalencia de 0.5, que evidencian mayores desviaciones en los puntos medidos por termopares, especialmente en el termopar 3 (ubicado a 50 *mm*, con 32.63%).

Finalmente, la Figura 4.4 presenta los resultados para la relación de equivalencia de 0.55, donde se detectó la mayor desviación en el termopar 3 (ubicado a 0.05 m), con un valor del 52.59%.

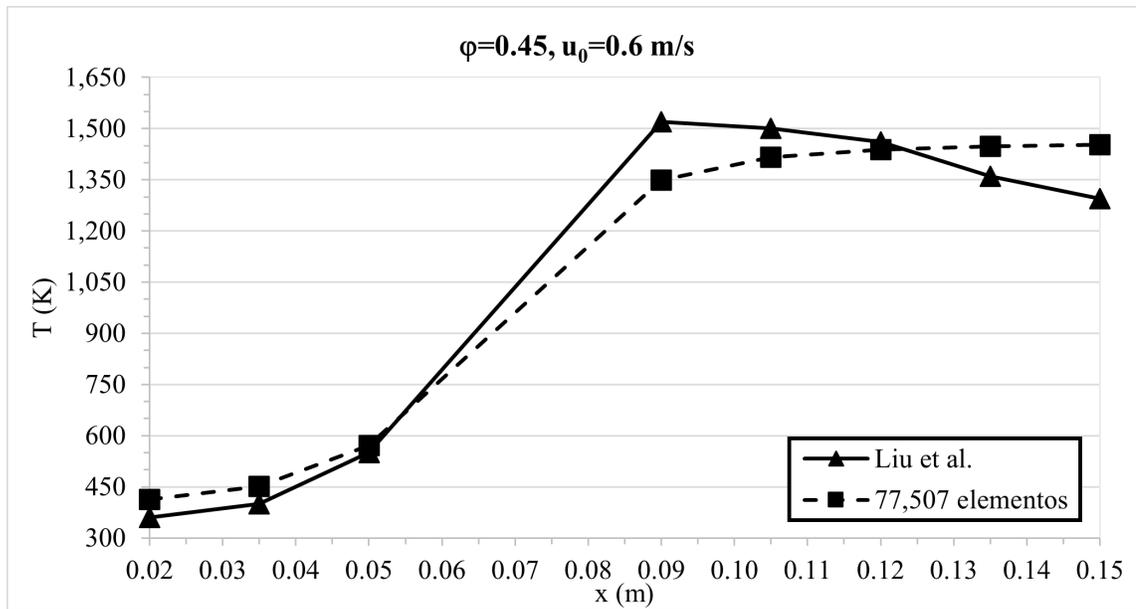


FIGURA 4.2: Resultados de las temperaturas obtenidas experimentalmente por Liu et al. [15] contra los obtenidos de la Malla 2 de 77,507 elementos, usando una relación de equivalencia igual a 0.45.

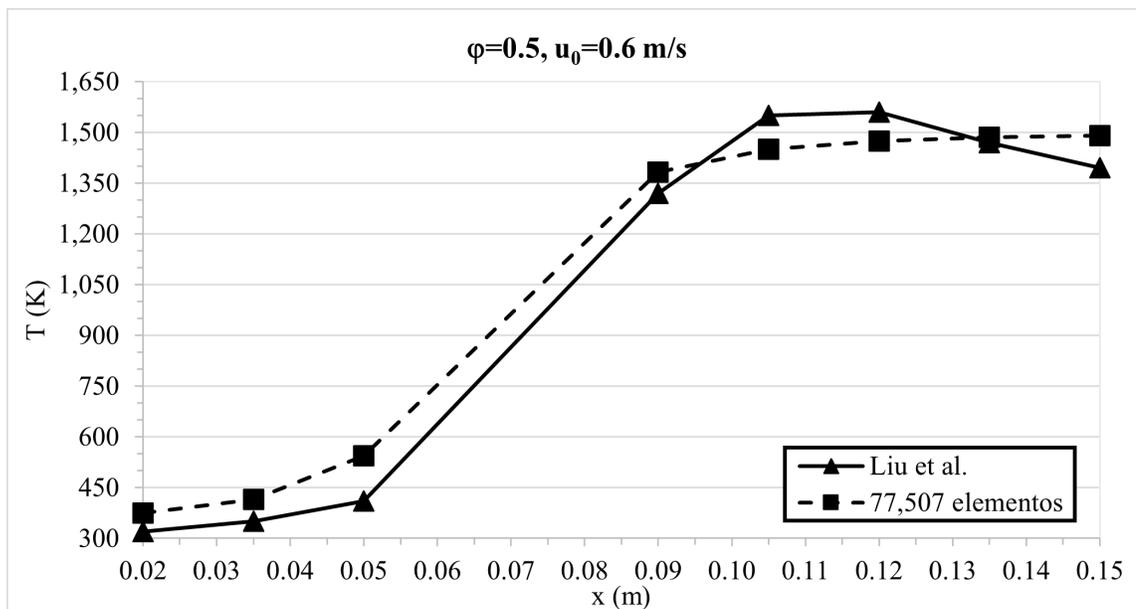


FIGURA 4.3: Resultados de las temperaturas obtenidas experimentalmente por Liu et al. [15] contra los obtenidos de la Malla 2 de 77,507 elementos, usando una relación de equivalencia igual a 0.5.

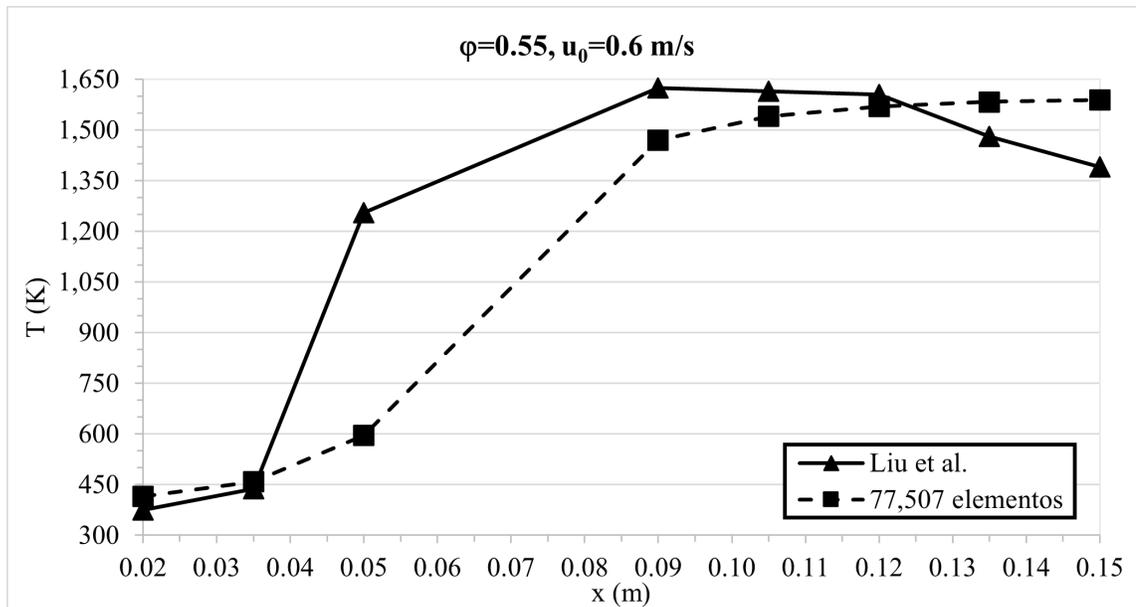


FIGURA 4.4: Resultados de las temperaturas obtenidas experimentalmente por Liu et al. [15] contra los obtenidos de la Malla 2 de 77,507 elementos, usando una relación de equivalencia igual a 0.55.

4.2 EMISIONES CONTAMINANTES USANDO GAS METANO COMO COMBUSTIBLE

Como resultado de las simulaciones realizadas para la validación mencionada, se obtuvieron las fracciones másicas de las emisiones contaminantes, específicamente de óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2). Estos datos, al ser convertidos a partículas por millón (ppm), permiten evaluar y cuantificar las emisiones generadas, proporcionando información esencial para analizar la variación de estas emisiones al usar diferentes cantidades de hidrógeno como aditivo en el proceso de combustión.

4.2.1 RELACIÓN DE EQUIVALENCIA DE 0.45

En las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7 se muestran los cambios en la concentración de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), respectivamente, a lo largo del quemador, expresados en partículas por millón (ppm), para una relación de equivalencia de 0.45.

En la Figura 4.5 se observa que la concentración de CO aumenta gradualmente desde valores cercanos a 0 ppm , alcanzando su punto máximo entre los 0.07 m y 0.09 m, en la zona donde ocurre el cambio de medios porosos y el quemador comienza a ser divergente. Posteriormente, la concentración desciende rápidamente, estabilizándose en valores bajos y constantes después de los 0.11 m. Este comportamiento refleja la oxidación del CO en CO_2 , conforme avanza la combustión y las reacciones químicas alcanzan el equilibrio.

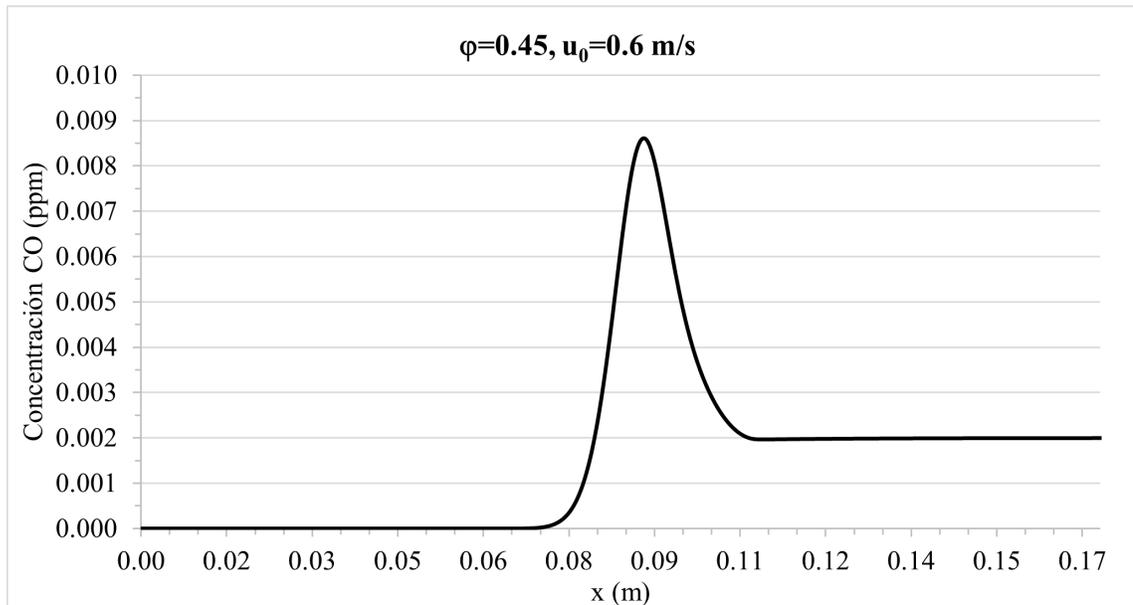


FIGURA 4.5: Concentración de monóxido de carbono (CO) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.45.

La Figura 4.6 muestra el perfil de concentración de CO_2 a lo largo del eje de simetría del quemador. Este presenta un aumento progresivo desde cero, con un

cambio más significativo a partir de los 0.07 m. El dióxido de carbono alcanza su valor máximo alrededor de los 0.11 m, manteniéndose constante a lo largo del resto del quemador. Este comportamiento indica que la formación de CO_2 está estrechamente relacionada con la oxidación completa del CO en la zona reactiva, sugiriendo que las reacciones químicas responsables de su generación se completan en esta región, alcanzando finalmente el equilibrio químico.

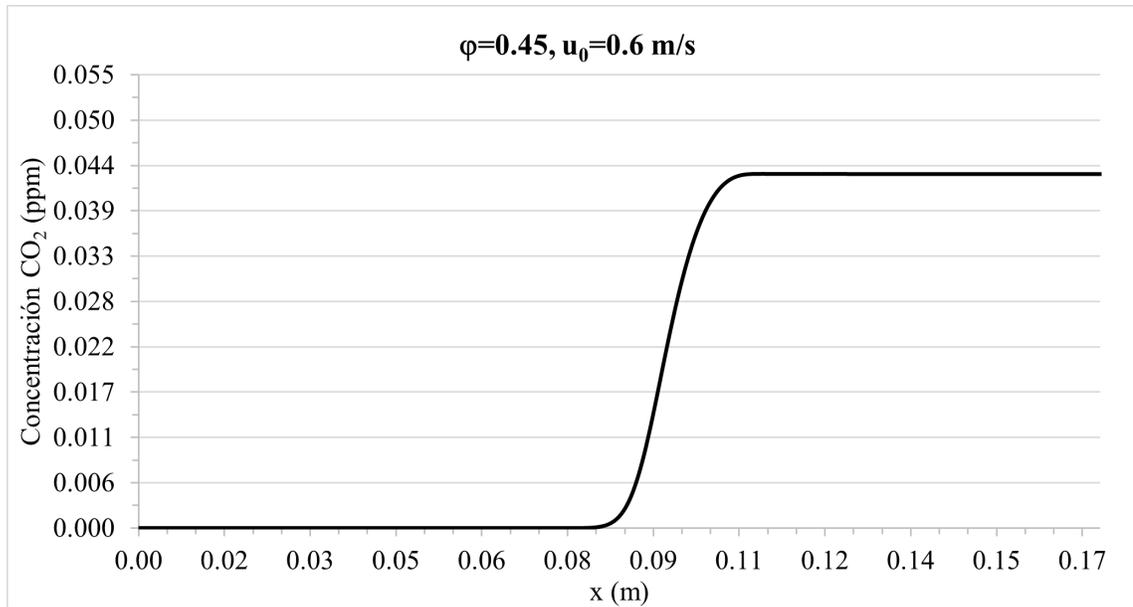


FIGURA 4.6: Concentración de dióxido de carbono (CO_2) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.45.

En la Figura 4.7 se observa que la concentración de óxidos de nitrógeno (NO_x) comienza con valores prácticamente nulos, pero experimenta un incremento a partir de los 0.07 m. A medida que avanza, la concentración de NO_x crece de manera progresiva, estabilizándose gradualmente más allá de los 0.12 m. Este comportamiento está relacionado con las altas temperaturas presentes en la región de combustión activa, que favorecen la formación de óxidos de nitrógeno mediante mecanismos como el NO_x térmico. La estabilización posterior refleja que, una vez completadas las reacciones de combustión y con el descenso de temperatura, la producción de NO_x se reduce significativamente.

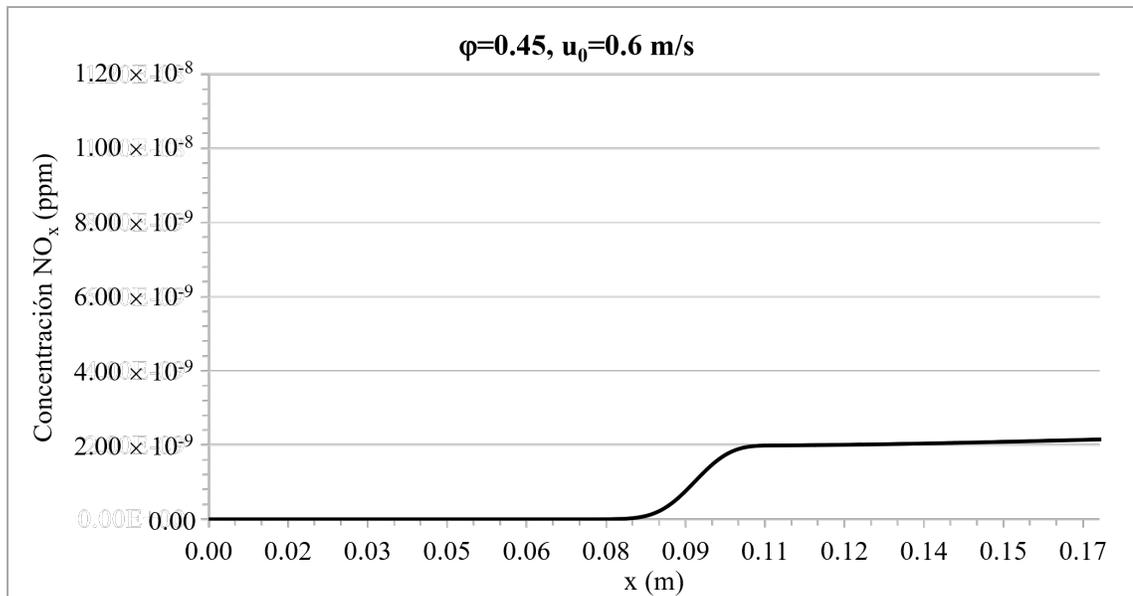


FIGURA 4.7: Concentración de óxidos de nitrógeno (NO_x) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.45.

4.2.2 RELACIÓN DE EQUIVALENCIA DE 0.5

En las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se ilustran las variaciones en la concentración de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), respectivamente, a lo largo del quemador. Estas concentraciones, medidas en partículas por millón (ppm), corresponden a una relación de equivalencia de 0.5.

En la Figura 4.8, se puede observar que, a partir de los 0.07 m, la concentración de CO aumenta bruscamente, alcanzando un pico máximo alrededor de los 0.09 m. Este comportamiento refleja la oxidación parcial del metano (CH_4) en la zona de combustión activa, donde las temperaturas y la disponibilidad de oxígeno son suficientes para la formación de CO . Después del pico, la concentración de CO disminuye rápidamente y se estabiliza en un valor constante a lo largo del resto del quemador. Esto sugiere que el CO se está oxidando progresivamente a dióxido de carbono (CO_2) a medida que avanza la combustión y las reacciones alcanzan el equilibrio químico.

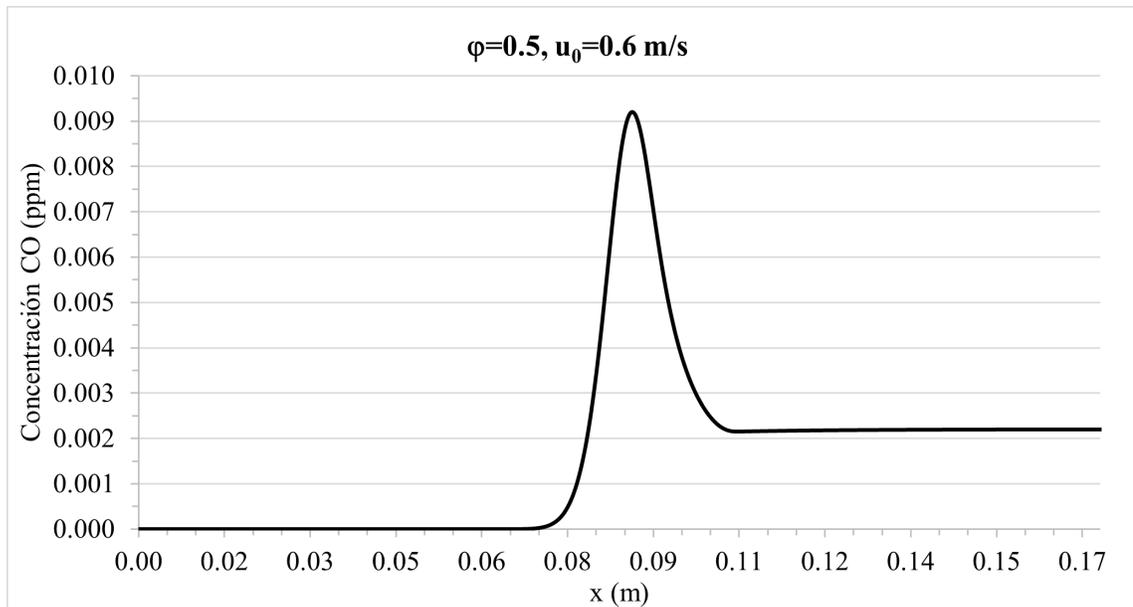


FIGURA 4.8: Concentración de monóxido de carbono (CO) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.5.

En la Figura 4.9, se observa que, a partir de aproximadamente los 0.09 m, la concentración de dióxido de carbono (CO_2) comienza a incrementarse de forma notable, alcanzando un valor máximo alrededor de los 0.11 m. Este comportamiento indica que en esta región del quemador se produce una oxidación completa del metano (CH_4), lo que genera CO_2 como uno de los principales productos de combustión. Posteriormente, la concentración de CO_2 se estabiliza, lo que sugiere que las reacciones químicas han alcanzado el equilibrio y que no ocurre una formación significativa de otros productos a lo largo del resto del quemador.

En la Figura 4.10, se aprecia que la concentración de óxidos de nitrógeno (NO_x) comienza a incrementarse gradualmente a partir de los 0.08 m, con un aumento más notable alrededor de los 0.11 m. Este comportamiento está relacionado con el inicio de la formación de NO_x , que ocurre principalmente debido a las altas temperaturas alcanzadas en la región de combustión activa, donde se favorece el mecanismo térmico de formación de estos compuestos. Después de este punto, la concentración de NO_x sigue aumentando lentamente, lo que sugiere una producción continua debido a las

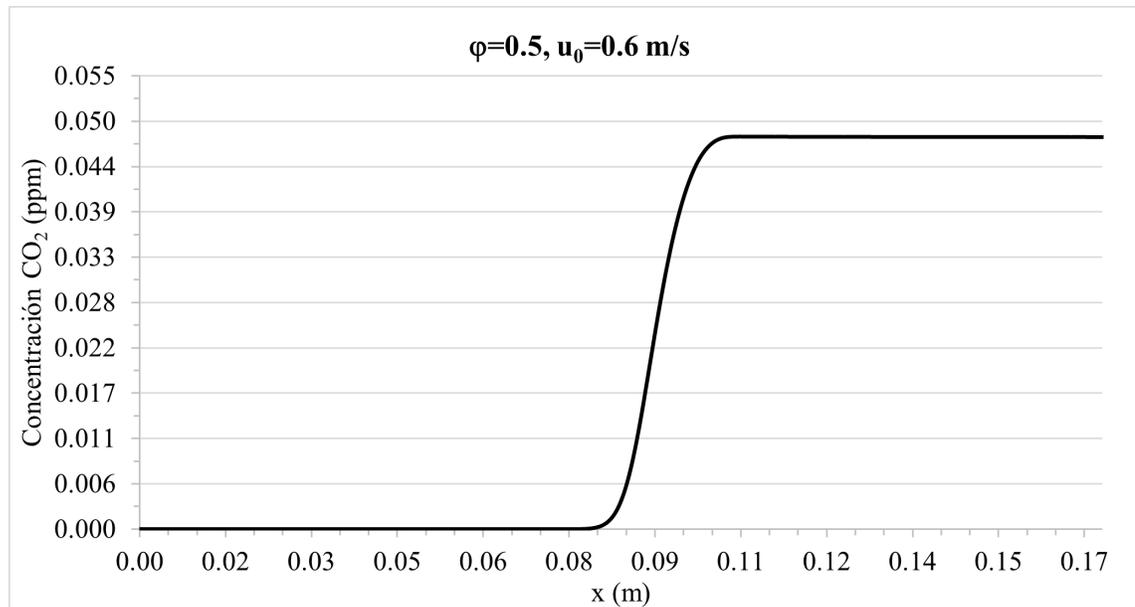


FIGURA 4.9: Concentración de dióxido de carbono (CO_2) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.5.

condiciones termodinámicas favorables en la zona posterior del quemador.

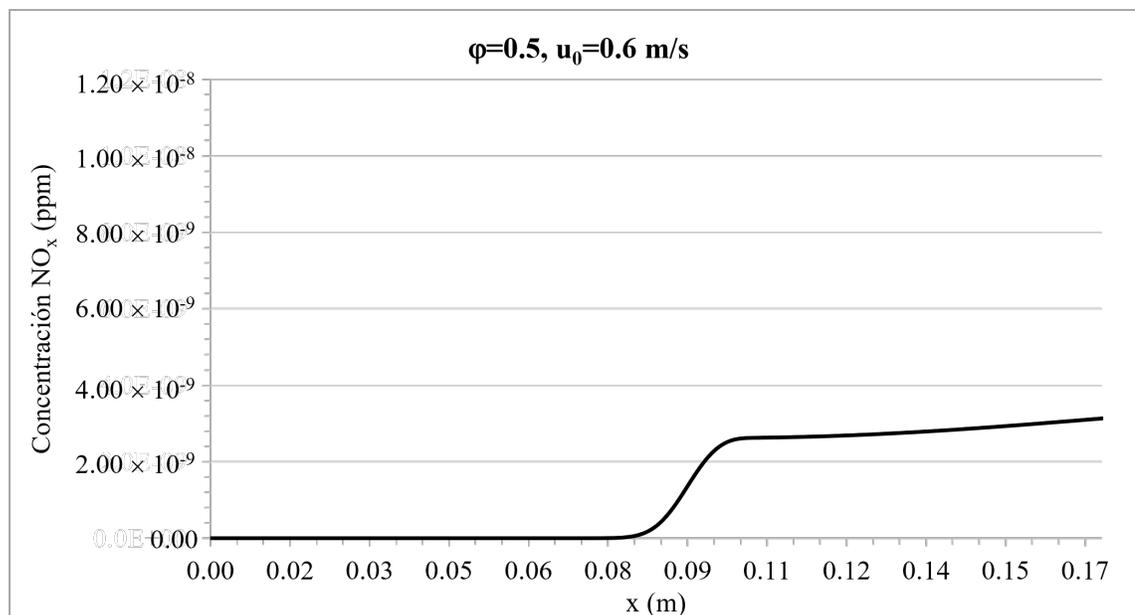


FIGURA 4.10: Concentración de óxidos de nitrógeno (NO_x) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.5.

4.2.3 RELACIÓN DE EQUIVALENCIA DE 0.55

En las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se presentan las variaciones en las concentraciones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), respectivamente, a lo largo del quemador. Estas concentraciones, expresadas en partículas por millón (ppm), corresponden a una relación de equivalencia de 0.55.

En la Figura 4.11, se puede observar que, a partir de los 0.07 m, la concentración de monóxido de carbono (CO) aumenta de manera rápida, alcanzando un pico máximo alrededor de los 0.08 m. Este comportamiento está relacionado con la oxidación parcial del metano (CH_4) en la región de combustión activa, donde las temperaturas y la disponibilidad de oxígeno favorecen la formación de CO . Después de alcanzar el pico, la concentración de CO disminuye considerablemente y se estabiliza a partir de los 0.11 m. Esto indica que el CO se está oxidando progresivamente a dióxido de carbono (CO_2) a medida que las reacciones avanzan y se aproxima el equilibrio químico.

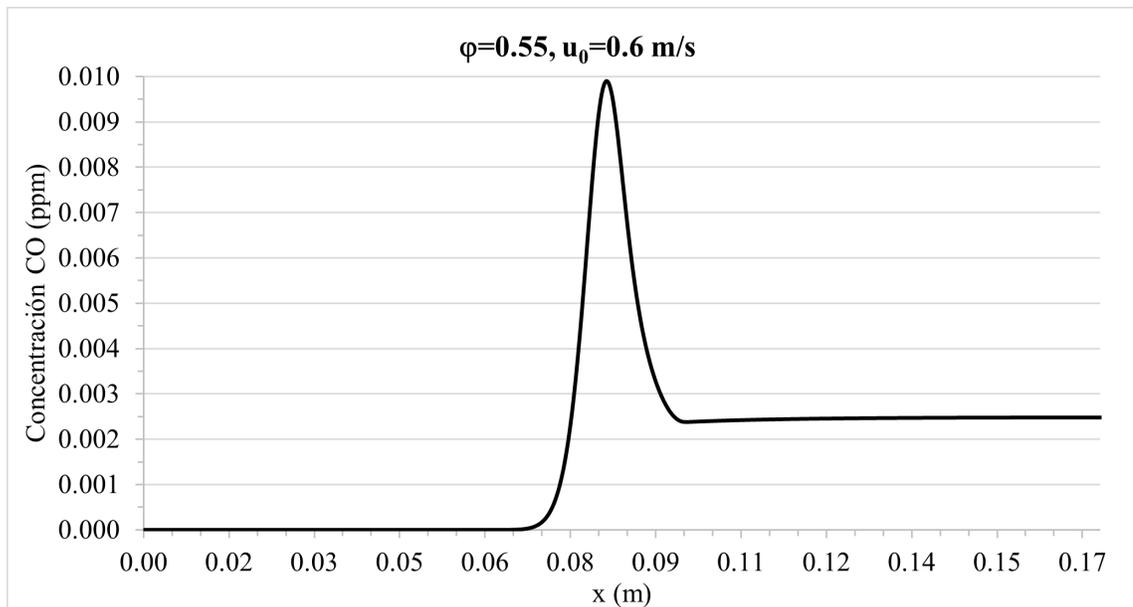


FIGURA 4.11: Concentración de monóxido de carbono (CO) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.55.

En la Figura 4.12, se observa que la concentración de dióxido de carbono (CO_2) permanece prácticamente nula en la sección inicial del quemador. A partir de aproximadamente los 0.08 m, la concentración comienza a incrementarse de manera abrupta, alcanzando su valor máximo alrededor de los 0.10 m. Este comportamiento refleja la oxidación completa del metano (CH_4), generando CO_2 como producto principal de la combustión. Posteriormente, la concentración de CO_2 se estabiliza, indicando que las reacciones químicas han alcanzado el equilibrio en las etapas finales del quemador.

En la Figura 4.13, se observa que la concentración de óxidos de nitrógeno (NO_x) permanece prácticamente nula en la región inicial del quemador. A partir de aproximadamente los 0.08 m, comienza a incrementarse de forma gradual, con un aumento más pronunciado alrededor de los 0.11 m. Este comportamiento está relacionado con el aumento de las temperaturas en la zona de combustión activa, que favorecen la formación de NO_x a través del mecanismo térmico. Después, la concentración de NO_x continúa creciendo de manera sostenida a lo largo del quemador.

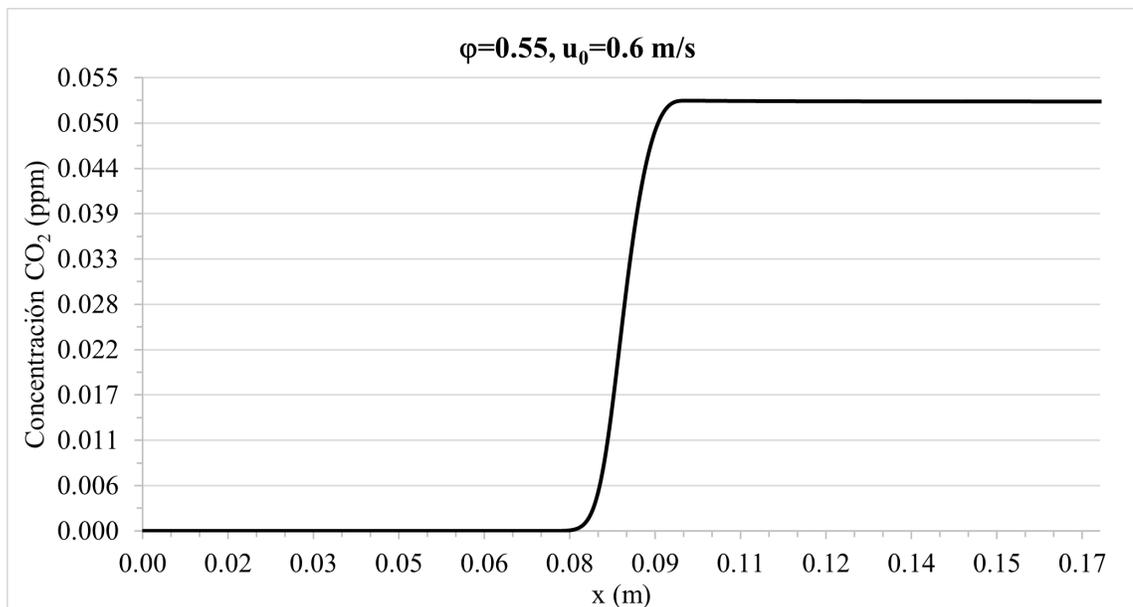


FIGURA 4.12: Concentración de dióxido de carbono (CO_2) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.55.

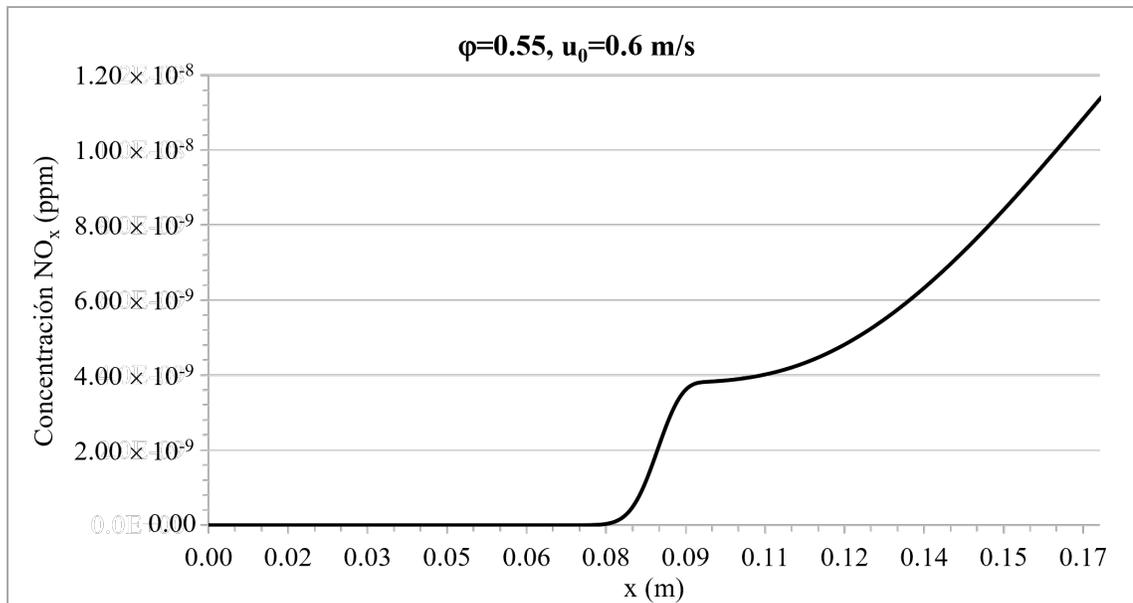


FIGURA 4.13: Concentración de óxidos de nitrógeno (NO_x) a lo largo del quemador en partículas por millón (ppm) para una relación de equivalencia de 0.55.

4.3 TEMPERATURAS USANDO HIDRÓGENO COMO ADITIVO AL COMBUSTIBLE DE GAS METANO

Para realizar un análisis comparativo de las temperaturas en el proceso de combustión, se evaluaron los efectos de la adición de hidrógeno al gas metano sobre las temperaturas a lo largo del quemador. Como se detalla en la matriz experimental (Tabla 3.2), se llevaron a cabo simulaciones incrementales en las que se añadió hidrógeno (H_2) al metano (CH_4) en proporciones que se incrementaron en un 10% hasta alcanzar el 30% de hidrógeno en la mezcla y con tres diferentes relaciones de equivalencia (0.45, 0.5 y 0.55). Este enfoque permite observar cómo la incorporación de hidrógeno modifica los perfiles de temperatura.

4.3.1 RELACIÓN DE EQUIVALENCIA DE 0.45

En la Figura 4.14 se muestra que, en el caso de la mezcla con un 10 % de H_2 (90 % CH_4 - 10 % H_2), la curva de temperatura presenta un incremento rápido en la región inicial del quemador, alcanzando un máximo cercano a los 1,500 K alrededor de los 0.09 m y después la temperatura disminuye ligeramente.

Cuando se analiza la mezcla con un 20 % de H_2 (80 % CH_4 - 20 % H_2), el incremento de temperatura ocurre de manera gradual y alcanza un máximo superior, también cercano a los 1,500 K, en una posición alrededor de los 0.105 m.

Finalmente, en el caso de la mezcla con un 30 % de H_2 (70 % CH_4 - 30 % H_2), se registra el mayor valor de temperatura máxima en el dominio, alcanzando aproximadamente los 2,200 K en una posición cercana a los 0.15 m. La curva muestra una pendiente más pronunciada en comparación con las mezclas con menor contenido de hidrógeno, indicando una mayor liberación de energía a la salida del quemador.

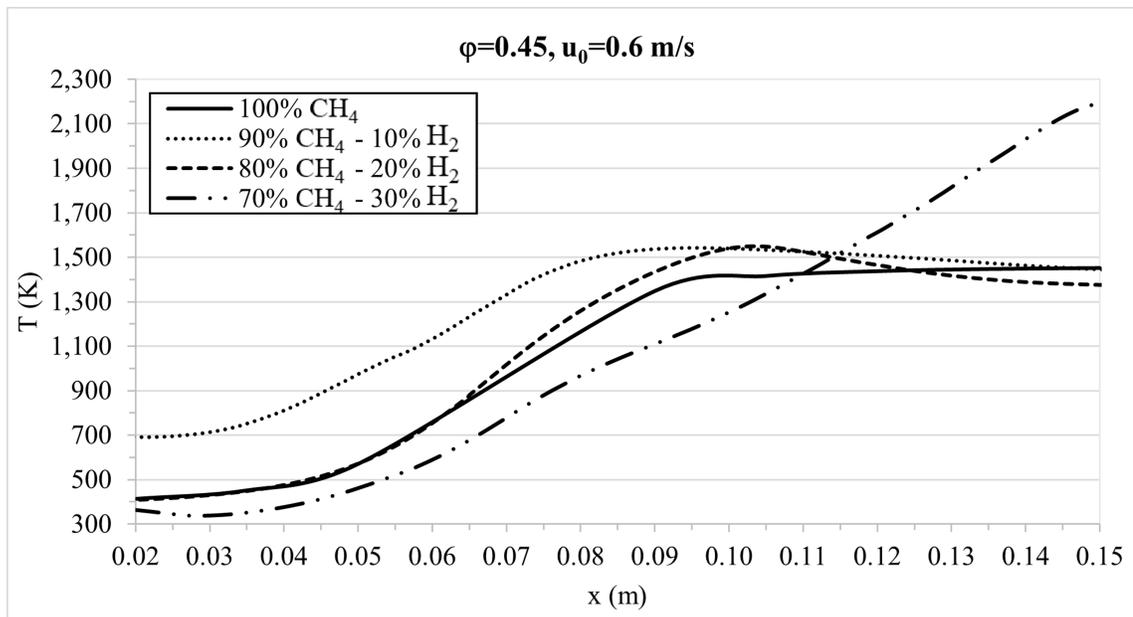


FIGURA 4.14: Comparación de los resultados de las temperaturas usando solamente gas metano como combustible (100 % CH_4) contra las temperaturas añadiendo proporciones de hidrógeno.

4.3.2 RELACIÓN DE EQUIVALENCIA DE 0.5

Como se muestra en la Figura 4.15 todas las mezclas muestran un incremento gradual de temperatura desde el valor inicial, cercano a 300 K. Para la mezcla con un 10 % de H_2 (90 % CH_4 - 10 % H_2), se observa un incremento de la temperatura, alcanzando un pico máximo de aproximadamente 1,950 K en la región cercana a los 0.085 m. Sin embargo, después del pico, la temperatura desciende abruptamente, mostrando un comportamiento inestable.

Cuando la mezcla contiene un 20 % de H_2 (80 % CH_4 - 20 % H_2), la temperatura también presenta un incremento pronunciado, pero el pico térmico no es tan alto, alcanzando alrededor de 1,800 K en una posición cercana a los 0.105 m. Posteriormente, la curva muestra una disminución en la temperatura, aunque menos marcada que en la mezcla con un 10 % de H_2 . Esto indica una mayor estabilidad térmica en esta proporción de hidrógeno.

En contraste, para la mezcla con un 30 % de H_2 (70 % CH_4 - 30 % H_2), se registra un comportamiento diferente. La temperatura máxima alcanzada es cercana a 1,600 K, el incremento es más gradual, y la curva muestra una estabilidad mayor en la región posterior del quemador, manteniéndose cerca de su valor máximo sin una caída pronunciada. Este comportamiento refleja la capacidad del hidrógeno de estabilizar la combustión y mantener un perfil térmico constante.

4.3.3 RELACIÓN DE EQUIVALENCIA DE 0.55

En la Figura 4.16, se puede observar que, para la mezcla con un 10 % de H_2 (90 % CH_4 - 10 % H_2), la curva de temperatura es muy similar a la mezcla de 100 % CH_4 pero presenta un incremento notable en la región inicial del quemador. En esta configuración, la combustión genera una temperatura máxima que supera los 1,500 K, alcanzada alrededor de los 0.014 m. Este comportamiento sugiere que

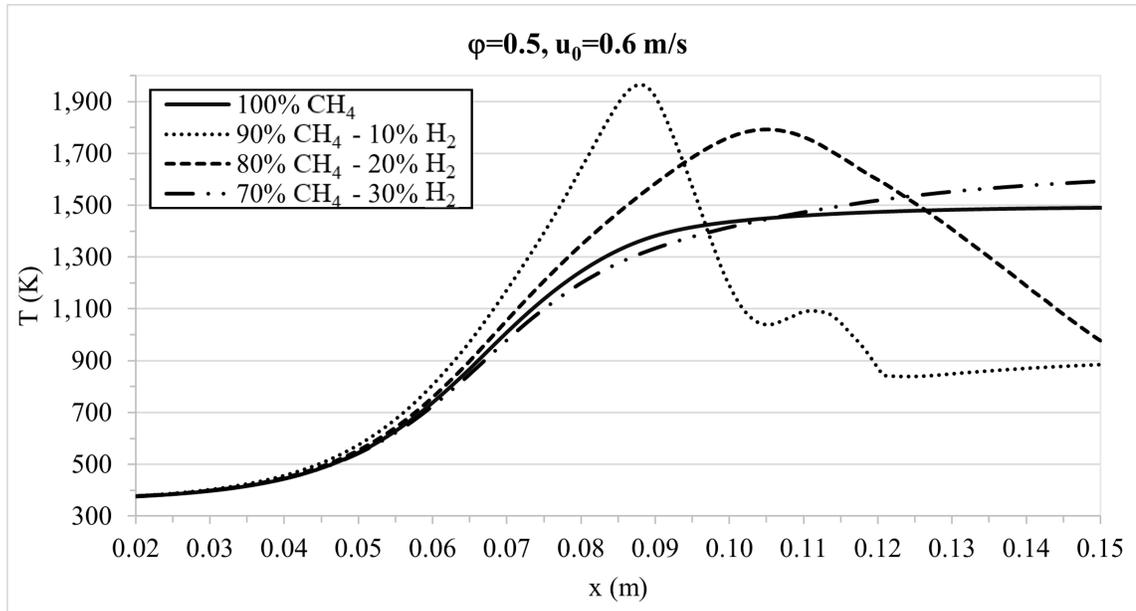


FIGURA 4.15: Comparación de los resultados de las temperaturas usando solamente gas metano como combustible (100 % CH_4) contra las temperaturas añadiendo proporciones de hidrógeno.

incluso una pequeña cantidad de hidrógeno en la mezcla favorece una combustión más eficiente en comparación con el metano puro, acelerando las reacciones químicas y aumentando las temperaturas en las etapas tempranas del quemador.

Cuando se analiza la mezcla con un 20% de H_2 (80% CH_4 - 20% H_2), la tendencia empieza similar; sin embargo, el pico de temperatura se produce después, aproximadamente en los 0.16 m, y alcanza un valor cercano a los 1,600 K.

Finalmente, en el caso de la mezcla con un 30% de H_2 (70% CH_4 - 30% H_2), se observa la mayor temperatura máxima dentro del dominio estudiado, superando los 1,900 K en una posición cercana a los 0.14 m. Este resultado destaca la alta reactividad del hidrógeno, cuya presencia dominante en la mezcla no solo acelera el proceso de combustión, sino que también maximiza la liberación de energía térmica.

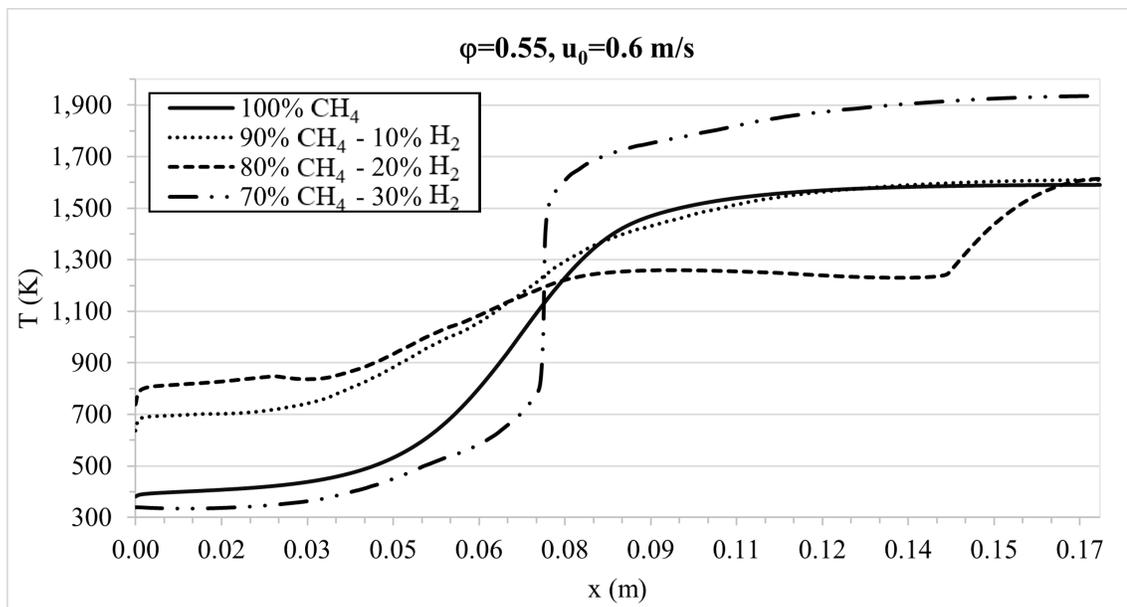


FIGURA 4.16: Comparación de los resultados de las temperaturas usando solamente gas metano como combustible (100% CH_4) contra las temperaturas añadiendo proporciones de hidrógeno.

4.4 EMISIONES CONTAMINANTES USANDO HIDRÓGENO COMO ADITIVO AL COMBUSTIBLE DE GAS METANO

Como se explicó en la Sección 4.2, para evaluar el impacto de la adición de hidrógeno al metano en términos de emisiones contaminantes durante el proceso de combustión, se analizaron los efectos sobre la generación de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x) a lo largo del quemador. Según lo registrado en la matriz experimental (Tabla 3.2), se realizaron simulaciones incrementales en las que el hidrógeno (H_2) fue añadido al metano (CH_4) en proporciones crecientes del 10% hasta alcanzar el 30% y con tres diferentes relaciones de equivalencia (0.45, 0.5 y 0.55). Este análisis permite observar cómo el aumento de hidrógeno en la mezcla influye en los niveles de emisiones, entendiendo mejor el proceso de combustión y la reducción en la generación de contaminantes.

4.4.1 RELACIÓN DE EQUIVALENCIA DE 0.45

En las Figuras 4.17, 4.18 y 4.19 se muestran las variaciones en las concentraciones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), respectivamente, a lo largo del quemador, expresadas en unidades de partículas por millón (ppm). Estas gráficas permiten observar cómo las emisiones contaminantes se modifican debido a la adición de hidrógeno, utilizando una relación de equivalencia de 0.45.

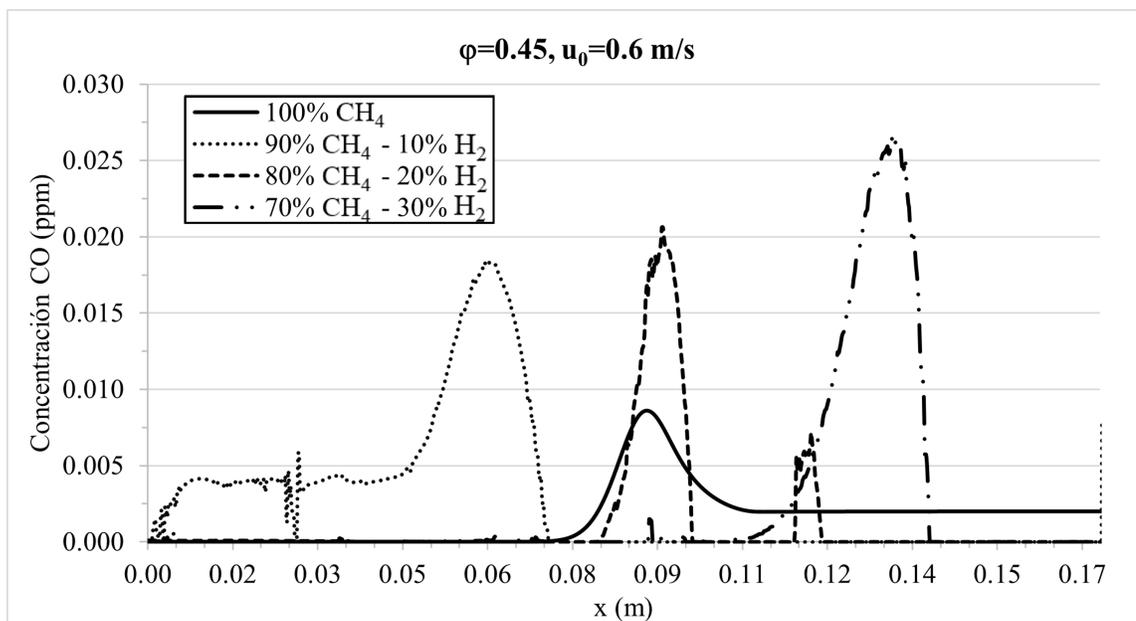


FIGURA 4.17: Resultados de las emisiones de monóxido de carbono (CO) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.45.

En la Figura 4.17 se pudo observar que la concentración de CO muestra un comportamiento muy parecido formando parábolas en todas las mezclas. La adición de un 10% de H_2 genera un comportamiento similar al del 100% CH_4 , pero el pico de concentración de CO se desplaza ligeramente hacia el inicio del quemador y alcanza una magnitud mayor. En la mezcla de 80% CH_4 - 20% H_2 , la formación de CO aumenta, con un pico más estrecho en comparación con las mezclas con menor contenido de hidrógeno. Con un 30% de H_2 , la formación de CO es prácticamente

inexistente al inicio del quemador, alcanzando un pico más tardío (aproximadamente 0.13 m) y con mayor valor que las otras mezclas (cerca a 0.025 ppm) pero al final estabilizándose en valores iguales a 0.

Para el dióxido de carbono (CO_2), en la Figura 4.18, se aprecia que, a diferencia de la mezcla de 100% CH_4 , con la adición de un 10% de hidrógeno, la concentración de CO_2 aumenta rápidamente, alcanzando un máximo de aproximadamente 0.14 ppm cerca de los 0.115 m. Posteriormente, la concentración se estabiliza hasta el final del quemador, donde disminuye abruptamente. En la mezcla de 80% CH_4 - 20% H_2 , el comportamiento es similar, pero el máximo de CO_2 (alrededor de 0.12 ppm) se alcanza más temprano, cerca de los 0.11 m. Después de este punto, la concentración desciende rápidamente. Finalmente, para la mezcla con un 30% de H_2 la concentración de CO_2 muestra un incremento tardío, alcanzando un máximo cerca de los 0.15 m y luego disminuyendo de forma abrupta.

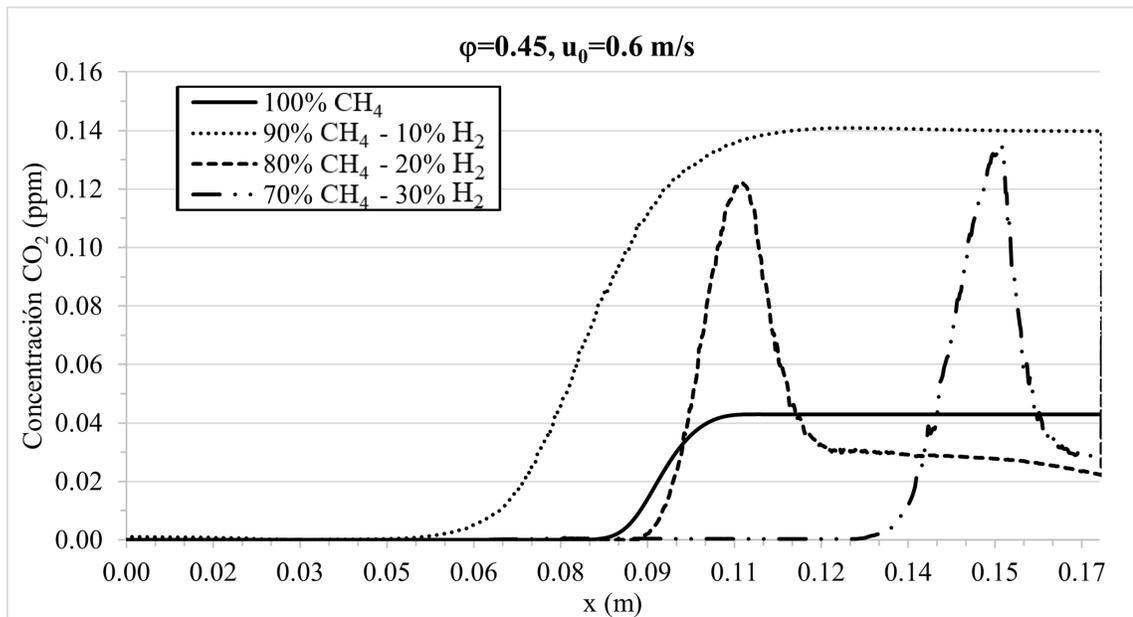


FIGURA 4.18: Resultados de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.45.

Por último, en la Figura 4.19, en la adición de 10% de H_2 al CH_4 se observa un notable incremento en la concentración de NO_x , alcanzando un valor máximo

cercano a 0.059 ppm en los primeros 0.03 m del quemador. Posteriormente, la concentración disminuye de manera progresiva a medida que se avanza en la posición axial. Para la mezcla con 20% de H_2 la concentración de NO_x es menor que la observada con 10% de H_2 , con valores muy cercanos a 0 . Con un 30% de H_2 , la concentración de NO_x muestra un patrón diferente. Se observa un incremento cercano a los 0.12 m y alcanzando su valor máximo aproximado de 0.009 ppm a la salida del quemador. Este comportamiento podría deberse a un cambio en las dinámicas de mezcla y reactividad química.

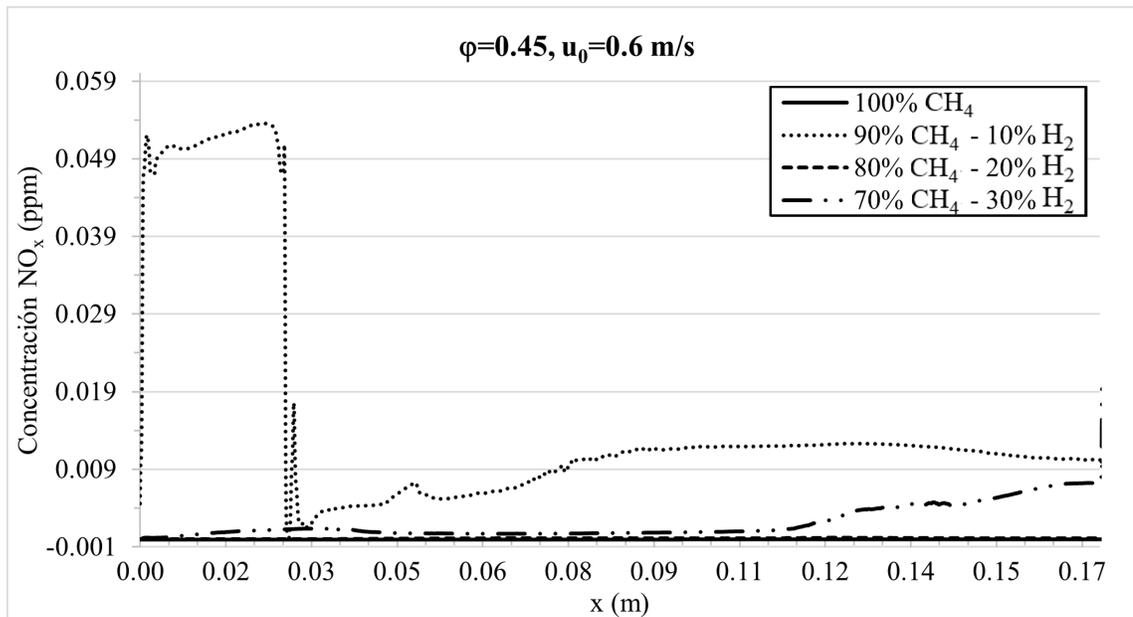


FIGURA 4.19: Resultados de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.45 .

4.4.2 RELACIÓN DE EQUIVALENCIA DE 0.5

En las Figuras 4.20, 4.21 y 4.22 se ilustran los cambios en las concentraciones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), respectivamente, a lo largo del quemador. Estas concentraciones, expresadas en partículas por millón (ppm), reflejan cómo la adición de hidrógeno influye en las

emisiones contaminantes al trabajar con una relación de equivalencia de 0.5.

La Figura 4.20 muestra el comportamiento de la concentración de monóxido de carbono (CO) en las diferentes mezclas evaluadas. En la mezcla que contiene un 10% de H_2 , se identifica un pico pronunciado de CO alrededor de los 0.07 m. Cuando la proporción de H_2 aumenta al 20%, el pico de CO se desplaza ligeramente hacia los 0.08 m, aunque con una magnitud menor, lo que sugiere que el mayor contenido de hidrógeno favorece una combustión más eficiente y una menor acumulación de CO . En el caso de la mezcla con un 70% de CH_4 y un 30% de H_2 , se observa un comportamiento diferente: la formación de CO se retrasa significativamente, ocurriendo en una región más alejada del quemador. En esta mezcla, el CO alcanza un pico amplio que se extiende entre los 0.10 m y los 0.17 m, lo que podría atribuirse a una mayor influencia del metano en las reacciones químicas en esa zona.

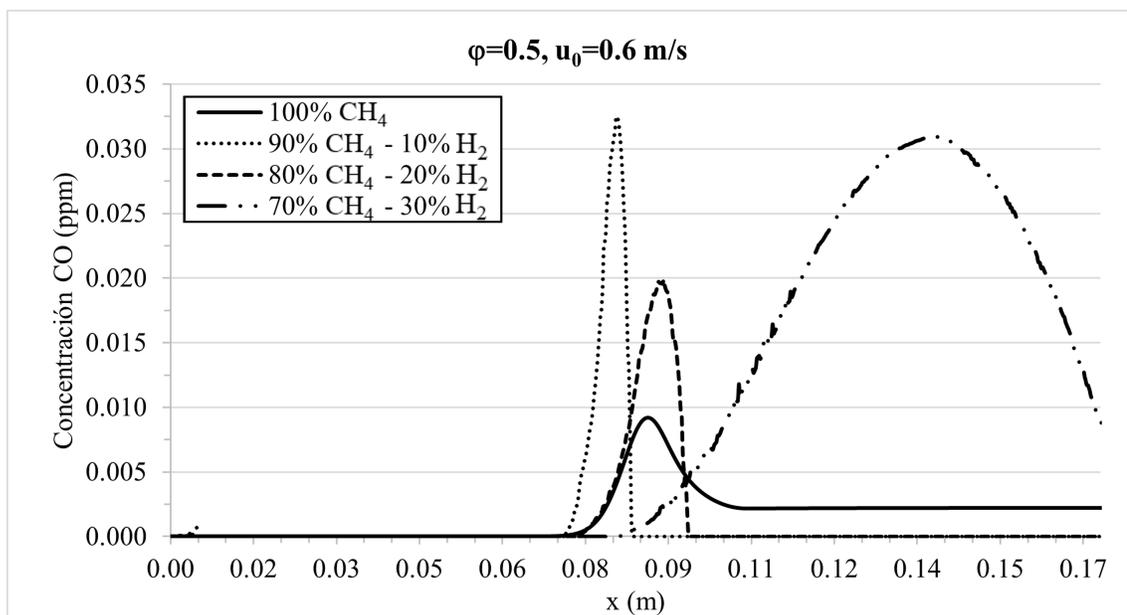


FIGURA 4.20: Resultados de las emisiones de monóxido de carbono (CO) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.5.

Por su parte, la Figura 4.21 detalla la evolución de la concentración de dióxido de carbono (CO_2) para las mismas mezclas. Cuando se añade un 10% de H_2 , la formación de CO_2 ocurre de una manera más rápida, alcanzando un pico elevado

alrededor de los 0.085 m. De forma similar, con un 20 % de H_2 , el pico se desplaza levemente hacia los 0.11 m, manteniendo características similares de intensidad. Sin embargo, en ambas mezclas, la concentración de CO_2 disminuye drásticamente después del pico, lo que indica que las reacciones de oxidación del carbono se completan en estas áreas del quemador. En contraste, la mezcla con un 30 % de H_2 presenta un patrón distinto: la formación de CO_2 se retrasa notablemente, comenzando a incrementarse a partir de los 0.14 m. Este retraso podría estar relacionado con la predominancia de las reacciones relacionadas con el hidrógeno, que alteran el equilibrio químico en las primeras etapas del quemador.

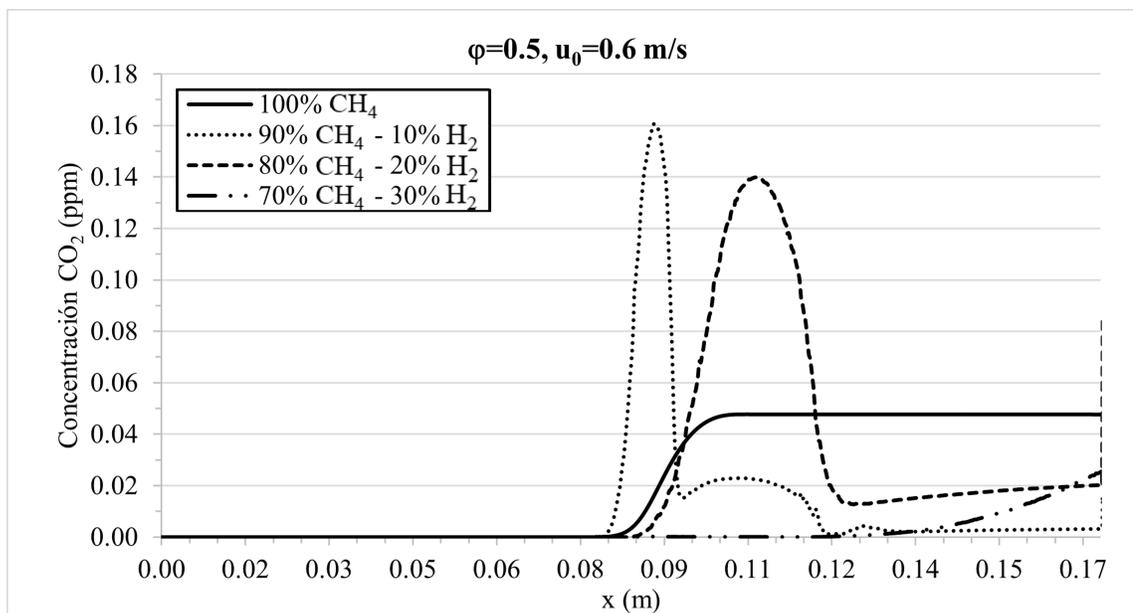


FIGURA 4.21: Resultados de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.5.

Finalmente, la Figura 4.22 proporciona información sobre la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x) en las distintas mezclas evaluadas. En la mezcla con un 30 % de H_2 , se registran las concentraciones más altas de NO_x , con un incremento sostenido a lo largo del dominio. Esta mezcla alcanza un valor máximo aproximado de 5×10^{-4} ppm cerca del final del quemador, lo que sugiere que el alto contenido de hidrógeno contribuye a mayores temperaturas en el proceso de combustión, favoreciendo la formación de NO_x . Por otro lado, las mezclas con un 10 % y un 20 % de

H_2 presentan concentraciones muy bajas de NO_x , prácticamente nulas a lo largo del quemador.

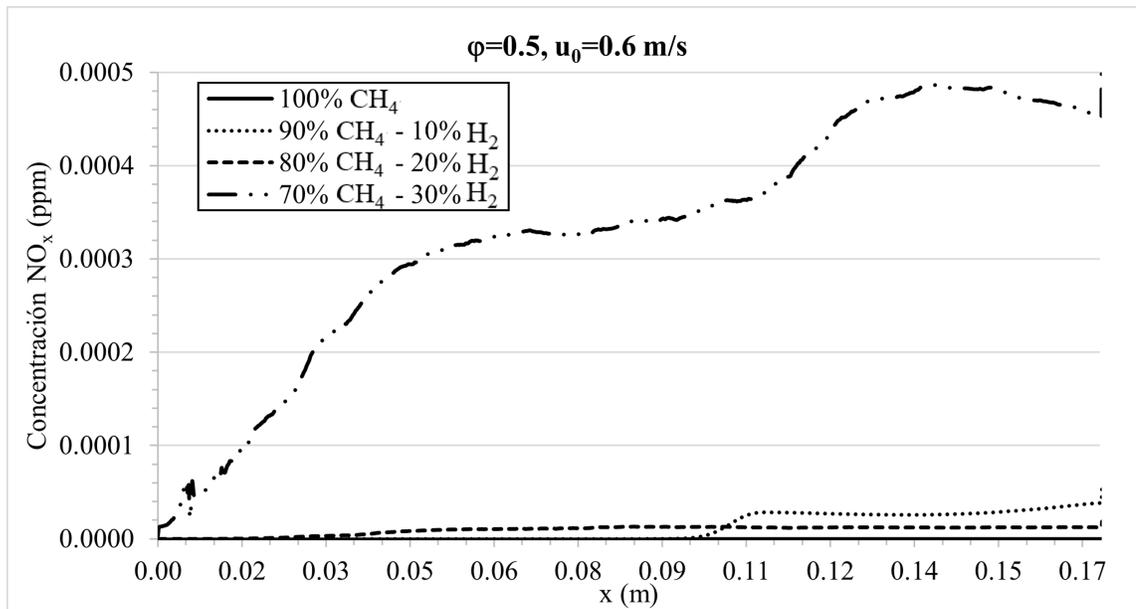


FIGURA 4.22: Resultados de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.5.

4.4.3 RELACIÓN DE EQUIVALENCIA DE 0.55

Las Figuras 4.23, 4.24 y 4.25 muestran las variaciones en las concentraciones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x) a lo largo del quemador. Estas concentraciones, medidas en partículas por millón (ppm), evidencian los efectos de la adición de hidrógeno en las emisiones contaminantes al emplear una relación de equivalencia de 0.55.

En el análisis de concentración de monóxido de carbono (CO), se puede ver en la Figura 4.23 que, al introducir un 10% de H_2 (90% CH_4 - 10% H_2) y un 20% de H_2 (80% CH_4 - 20% H_2), se observa un incremento inicial más marcado en la concentración de CO , desde el inicio del quemador. Sin embargo, después de este punto, la concentración disminuye rápidamente, para después aumentar y que-

darse de manera estable alrededor de 0.025 ppm . Para la mezcla con un 30% de H_2 (70% CH_4 - 30% H_2), la concentración de CO muestra un comportamiento aún más dinámico. Se observa un primer incremento alrededor de los 0.07 m, seguido de una caída abrupta a los 0.12 m y un segundo pico de mayor magnitud que alcanza aproximadamente 0.15 ppm en la región cercana a los 0.14 m. Este perfil refleja un efecto más pronunciado del hidrógeno, donde la alta reactividad genera acumulaciones de CO en etapas específicas antes de ser completamente oxidado.

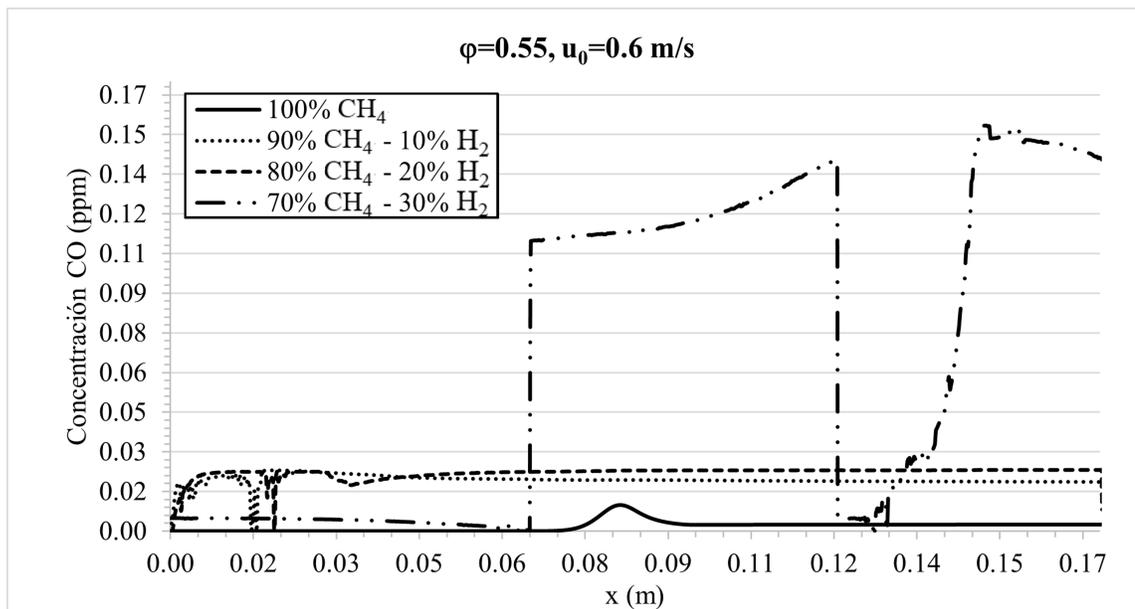


FIGURA 4.23: Resultados de las emisiones de monóxido de carbono (CO) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.55.

En la Figura 4.24 se muestra la distribución de la concentración de CO_2 , además se observa que, en la mezcla con un 10% de H_2 (90% CH_4 - 10% H_2), los valores de concentración de CO_2 son muy cercanos a 0 ppm , similar a los obtenidos con un 20% de H_2 (80% CH_4 - 20% H_2). Para la mezcla con un 30% de H_2 (70% CH_4 - 30% H_2), la concentración de CO_2 muestra un comportamiento diferenciado. El incremento ocurre cerca de los 0.07 m y se estabiliza en una concentración similar a la del metano puro. Esto refleja el impacto del hidrógeno en acelerar las reacciones de combustión, favoreciendo la oxidación más rápida del carbono.

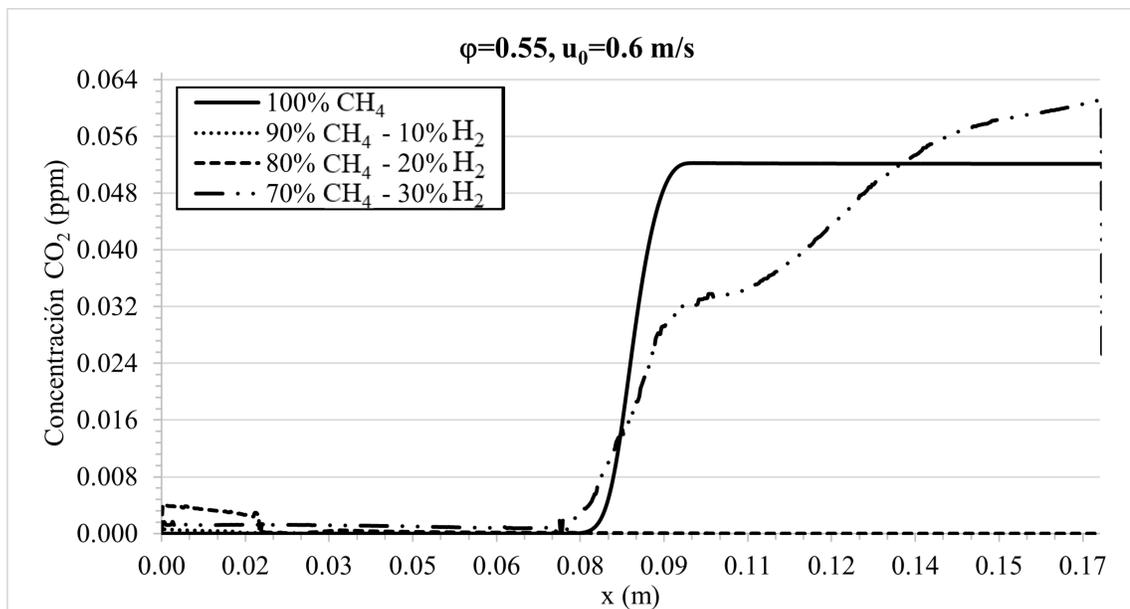


FIGURA 4.24: Resultados de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.55.

En las concentraciones de NO_x (Figura 4.25), la mezcla con un 20 % de H_2 (80 % CH_4 - 20 % H_2) presenta concentraciones muy bajas, al inicio cuenta con valores cercanos a 0.2 ppm para después tener una caída que resulta en valores cercanos a cero en el resto del quemador. Esto indica que, en esta proporción, el hidrógeno no incrementa significativamente las temperaturas en el dominio, manteniendo bajos los niveles de formación de NO_x . Por otro lado, para la mezcla con un 10 % de H_2 (90 % CH_4 - 10 % H_2), se observa un comportamiento diferente. Los valores iniciales tienen picos que alcanzan aproximadamente 0.19 ppm , y, después, hay 2 picos más a partir de los 0.05 m y en torno a los 0.08 m, con una concentración máxima cercana a 0.14 ppm . Este refleja el efecto del hidrógeno en aumentar la reactividad y las temperaturas locales, lo que promueve la formación de NO_x en ciertas regiones. Finalmente, la mezcla con un 30 % de H_2 (70 % CH_4 - 30 % H_2) presenta el pico más alto de NO_x en el dominio, alcanzando una concentración máxima superior a 0.23 ppm alrededor de los 0.085 m. Este comportamiento es característico de mezclas con alto contenido de hidrógeno, donde las elevadas temperaturas asociadas a su alta reactividad favorecen la formación de NO_x por mecanismos térmicos. Después del

pico, los valores disminuyen gradualmente, lo que sugiere una disipación térmica en las etapas posteriores del quemador.

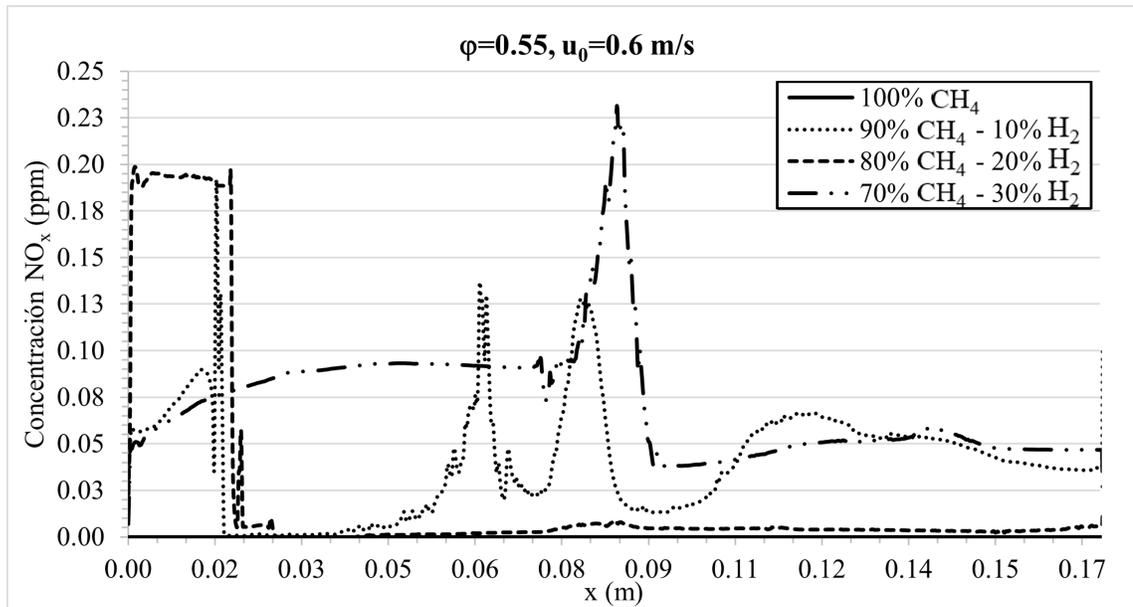


FIGURA 4.25: Resultados de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) usando distintas mezclas para una relación de equivalencia de 0.55.

4.5 PUNTOS DE CONCENTRACIÓN DE EMISIONES A LA SALIDA DEL QUEMADOR

Las Figuras 4.26, 4.27 y 4.28 muestran las concentraciones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x) obtenidas mediante simulación numérica en el extremo de la segunda sección del medio poroso, correspondiente a una distancia de 168.5 mm. Este punto se considera representativo, ya que en él se reflejan las concentraciones finales de las emisiones contaminantes.

La Figura 4.26 muestra los valores de la concentración de CO obtenidos, donde:

- 100 % CH_4 : la concentración de CO permanece cercana a cero para todas las relaciones de equivalencia estudiadas, lo que sugiere una combustión eficien-

te en condiciones pobres ($\phi \leq 0.55$). Esto se debe a la estabilidad del metano como combustible, que favorece la oxidación completa en condiciones bien controladas.

- 90 % CH_4 - 10 % H_2 : la concentración de CO se mantiene baja, con un ligero aumento en $\phi = 0.55$, aunque sigue siendo marginal. Esto indica que la adición de pequeñas cantidades de hidrógeno no afecta significativamente las emisiones de CO , debido a la oxidación del carbono en estas condiciones.
- 80 % CH_4 - 20 % H_2 : la concentración de CO experimenta un leve incremento en $\phi = 0.55$, alcanzando valores cercanos a 0.02 ppm. Este comportamiento puede atribuirse a una mayor reactividad del hidrógeno, que acelera la combustión pero también genera una oxidación incompleta del metano en ciertas zonas del quemador.

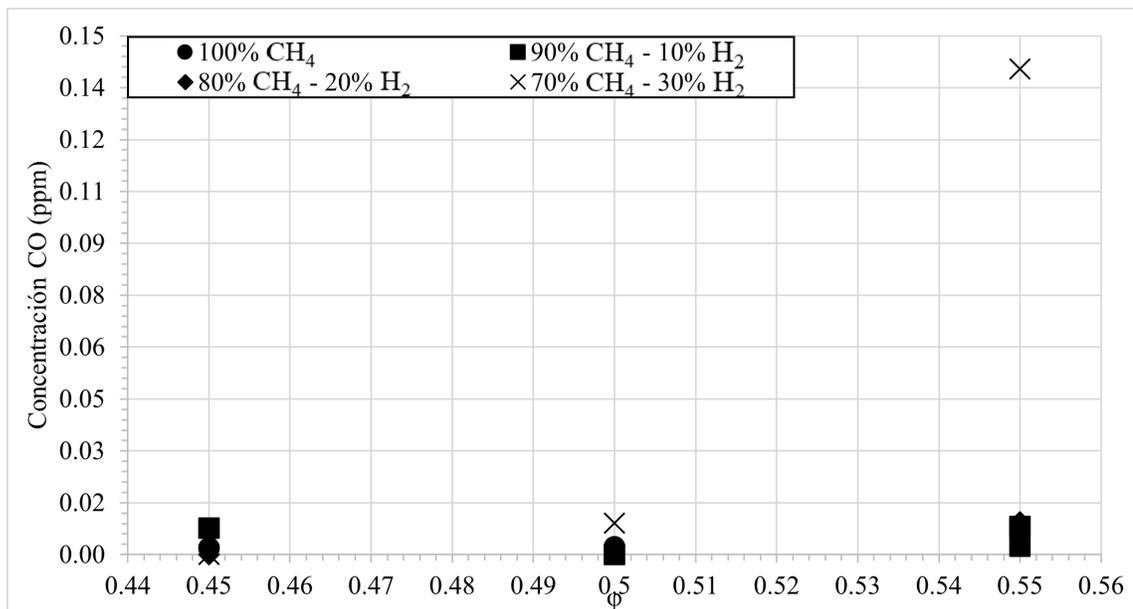


FIGURA 4.26: Concentración de CO por cada relación de equivalencia y proporción de H_2 en la mezcla a la salida del quemador.

- 70 % CH_4 - 30 % H_2 : la concentración de CO es notablemente más alta en $\phi = 0.55$, alcanzando aproximadamente 0.14 ppm. Este resultado evidencia que una mayor cantidad de hidrógeno puede alterar el equilibrio de la combustión,

aumentando las emisiones de CO debido a la alta reactividad del hidrógeno, que puede promover zonas de reacción localizadas con oxidación incompleta.

Para los valores de la concentración de CO , se presenta la Figura 4.27, donde:

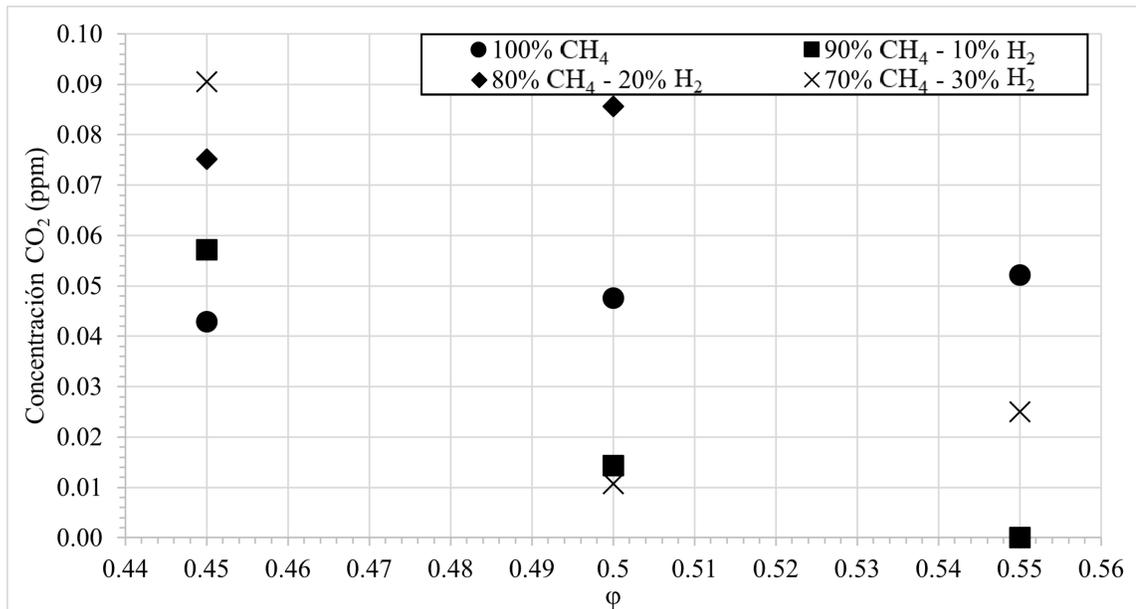


FIGURA 4.27: Concentración de CO_2 por cada relación de equivalencia y proporción de H_2 en la mezcla a la salida del quemador.

- 100 % CH_4 : la concentración de CO_2 muestra un incremento moderado con el aumento de la relación de equivalencia. En $\phi = 0.45$, se observa una concentración cercana a 0.04 ppm, que aumenta gradualmente hasta alcanzar aproximadamente 0.06 ppm en $\phi = 0.55$. Esto indica una combustión completa y eficiente del metano en estas condiciones.
- 90 % CH_4 - 10 % H_2 : la concentración de CO_2 es mayor en $\phi = 0.45$, alcanzando un valor de aproximadamente 0.06 ppm. Sin embargo, a medida que ϕ aumenta, la concentración de CO_2 disminuye notablemente, llegando a valores cercanos a cero en $\phi = 0.55$. Esto refleja que la adición de hidrógeno reduce la cantidad de carbono disponible para oxidarse, especialmente en condiciones más cercanas a la estequiometría.

- 80 % CH_4 - 20 % H_2 : la concentración de CO_2 en $\phi = 0.45$ es de aproximadamente 0.075 ppm, siendo superior a la de mezclas con menos hidrógeno. Este comportamiento sugiere una mayor reactividad en esta mezcla, lo que favorece la oxidación completa del carbono. Sin embargo, al igual que con el 10 % de hidrógeno, la concentración de CO_2 disminuye rápidamente con el aumento de ϕ , llegando a valores casi nulos en $\phi = 0.55$.
- 70 % CH_4 - 30 % H_2 : la concentración de CO_2 es la más alta en $\phi = 0.45$, alcanzando un valor cercano a 0.09 ppm. No obstante, al incrementar ϕ , la concentración de CO_2 disminuye, reflejando el impacto del hidrógeno en limitar la formación de dióxido de carbono debido a la reducción del contenido de carbono en la mezcla.

En la Figura 4.28, se observan los valores de la concentración de NO_x , donde:

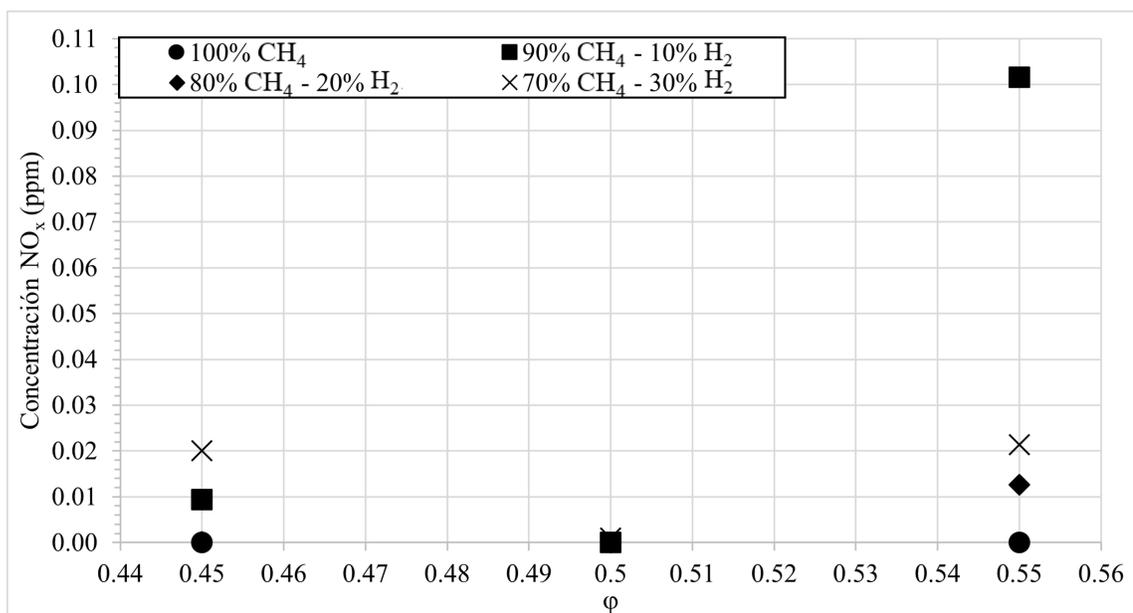


FIGURA 4.28: Concentración de NO_x por cada relación de equivalencia y proporción de H_2 en la mezcla a la salida del quemador.

- 100 % CH_4 : las concentraciones de NO_x permanecen muy bajas a lo largo del rango de ϕ estudiado. Los valores se mantienen cercanos a cero, lo que

indica que las temperaturas alcanzadas y las condiciones de combustión en estas mezclas son insuficientes para generar cantidades significativas de NO_x .

- 90 % CH_4 - 10 % H_2 : la formación de NO_x aumenta, especialmente en $\phi = 0.55$, donde la concentración alcanza aproximadamente 0.1 ppm. Este comportamiento puede atribuirse al incremento en la temperatura de la combustión generado por la presencia de hidrógeno, lo que favorece la formación de NO_x térmicos en condiciones cercanas a la estequiometría.
- 80 % CH_4 - 20 % H_2 : las concentraciones de NO_x vuelven a disminuir, teniendo el valor más alto en $\phi = 0.55$, donde la concentración alcanza alrededor de 0.015 ppm, siendo menor a la de la mezcla con 10 % de H_2 , lo que podría indicar una mayor homogeneidad en la mezcla y una distribución más uniforme de las temperaturas en el quemador.
- 70 % CH_4 - 30 % H_2 : se observa un ligero incremento de NO_x en $\phi = 0.45$, alcanzando alrededor de 0.02 ppm. Sin embargo, en $\phi = 0.5$, los valores disminuyen en comparación con las otras mezclas que contienen hidrógeno. Esto puede deberse a que, aunque el hidrógeno incrementa la temperatura, la proporción de oxígeno disponible se reduce, limitando la formación de NO_x .

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En este capítulo se analizan los resultados de la validación del modelo computacional del quemador divergente con medios porosos, además del impacto de la adición de hidrógeno (H_2) como componente de la mezcla de combustible en un quemador operado con gas metano (CH_4), a distintas relaciones de equivalencia y proporciones de hidrógeno (Tabla 3.2).

5.1 VALIDACIÓN MODELO CFD

Los resultados obtenidos de la simulación CFD para las temperaturas usando una relación de equivalencia de 0.45 y una velocidad de entrada de 0.6 m/s mostraron una desviación promedio axial de 8.50 % en comparación con los obtenidos experimentalmente por Liu et al. [15].

La mayor desviación se encontró en la ubicación los termopares 1, 2, 4 y 8 los que contaron con mayor desviación ($> 10\%$), esto puede ser debido al valor de la resistencia viscosa que conformaban los dos medios porosos, el cambio de medios porosos entre áreas y la presión de salida. A esto se le suma la ausencia de un valor experimental de la temperatura de entrada y un resultado experimental de la temperatura de salida.

5.2 TEMPERATURAS

La adición de hidrógeno (H_2) a la mezcla de gas metano (CH_4) aumenta las temperaturas máximas alcanzadas en el quemador. Esto se debe a la mayor reactividad del hidrógeno, que acelera las reacciones de combustión, permitiendo una liberación de energía más eficiente.

Relación de equivalencia de 0.45. Para la mezcla con adición de un 10 % de hidrógeno (90 % CH_4 - 10 % H_2), se obtuvo un aumento del 5.99 % en la temperatura máxima alcanzada a los 0.0952 m, en comparación con la de la combustión que usa solamente gas metano (100 % CH_4). Para la mezcla con adición de un 20 % de hidrógeno (80 % CH_4 - 20 % H_2), se obtuvo un aumento aún mayor, siendo este de 6.64 % ubicado a 0.1036 m. Para la mezcla con adición de 30 % de hidrógeno (70 % CH_4 - 30 % H_2), se obtuvo la temperatura máxima alcanzada de todas las mezclas, con un aumento del 50.97 % a los 0.1511 m.

Esto se debe a que el hidrógeno (H_2) actúa como potenciador de la combustión, aumentando las temperaturas máximas alcanzadas y mejorando la eficiencia del proceso. Conforme aumenta la proporción del hidrógeno, mayor es la reactividad y la liberación de energía térmica, lo que resulta en temperaturas más altas.

Relación de equivalencia de 0.5. Para la mezcla con adición de un 10 % de hidrógeno (90 % CH_4 - 10 % H_2), se obtuvo un aumento del 31.58 % en la temperatura máxima alcanzada a los 0.088 m, en comparación con la de la combustión que usa solamente gas metano (100 % CH_4). Este resultado sugiere que, incluso pequeñas cantidades de hidrógeno, pueden mejorar considerablemente la reactividad de la mezcla, generando temperaturas más altas en etapas iniciales del proceso.

En el caso de la mezcla con un 20 % de hidrógeno (80 % CH_4 - 20 % H_2), el incremento fue de 20.04 %, alcanzado a los 0.105 %, mientras que con 30 % de hidrógeno (70 % CH_4 - 30 % H_2) la temperatura máxima presentó un aumento me-

nor, del 7.28 % a los 0.163 m. Estos resultados indican que, aunque el hidrógeno incrementa la temperatura en etapas tempranas de la combustión, una mayor proporción no necesariamente implica una mayor temperatura máxima. En cambio, se observa un desplazamiento de la zona de máxima liberación de energía térmica a regiones más alejadas, lo cual sugiere un efecto de saturación en la reactividad química conforme se incrementa el contenido de hidrógeno.

Relación de equivalencia de 0.55. Para la mezcla con adición de un 10 % de hidrógeno (90 % CH_4 - 10 % H_2), se obtuvo un aumento del 1.17 % en la temperatura máxima alcanzada a los 0.1682 m, en comparación con la de la combustión que usa solamente gas metano (100 % CH_4). Para la mezcla con adición de un 20 % de hidrógeno (80 % CH_4 - 20 % H_2), se obtuvo un aumento un poco mayor, siendo este de 1.36 % ubicado a 0.1684 m. Para la mezcla con adición de 30 % de hidrógeno (70 % CH_4 - 30 % H_2), se obtuvo la temperatura máxima de todas las mezclas, con un aumento del 21.58 % a los 0.1682 m.

La adición de hidrógeno en las mezclas de metano incrementa notablemente la temperatura máxima alcanzada durante la combustión, con un efecto proporcional a la cantidad de hidrógeno incorporado. Estos resultados destacan el impacto del hidrógeno en mejorar la reactividad y eficiencia térmica del proceso de combustión, particularmente en proporciones más altas.

5.3 EMISIONES CONTAMINANTES

5.3.1 PRODUCCIÓN DE MONÓXIDO DE CARBONO

Relación de equivalencia de 0.45. El análisis de las concentraciones de monóxido de carbono (CO) en función de la proporción de hidrógeno (H_2) en las mezclas revela que el contenido de H_2 tiene un impacto significativo en la formación

y distribución de este contaminante a lo largo del quemador.

La adición de un 10 % de H_2 genera un comportamiento similar al del metano puro (100 % CH_4), pero con un pico de concentración de CO desplazado hacia posiciones más tempranas en el quemador y con un aumento considerable en su magnitud. Esto se traduce en un incremento de 308.27 veces en la concentración de CO , evidenciando que el hidrógeno intensifica la formación de este contaminante en las etapas iniciales de combustión.

En la mezcla con 20 % H_2 , la formación de CO presenta un pico más estrecho en comparación con la mezcla con 10 % H_2 , pero la concentración global disminuye significativamente, reduciéndose en un factor de 1.06×10^{16} veces respecto al gas metano sin adición de hidrógeno. Esto sugiere que un mayor contenido de hidrógeno mejora la oxidación del carbono, limitando la acumulación de CO en el quemador.

Finalmente, con un 30 % de H_2 , la formación de CO prácticamente desaparece al inicio del quemador, alcanzando un pico tardío (aproximadamente a 0.13 m) y con una magnitud más alta que en las otras mezclas (cerca de 0.025 ppm). Sin embargo, al final del quemador, la concentración de CO se estabiliza en valores cercanos a cero, disminuyendo en un factor de 6.05×10^{15} veces respecto al gas metano sin adición de hidrógeno. Esto refleja que, aunque inicialmente el hidrógeno puede favorecer picos localizados de CO , en etapas posteriores promueve una combustión más completa y eficiente.

Relación de equivalencia de 0.5. En mezclas con un 10 % y un 20 % de H_2 , se evidencia una mejora significativa en la eficiencia de la combustión, reflejada en la reducción o eliminación del CO a la salida del quemador. Específicamente, con un 10 % de H_2 , la concentración de CO se reduce a cero al final del quemador, mientras que con un 20 % de H_2 se experimenta una reducción masiva de 2.77×10^{15} veces.

En contraste, en la mezcla con un 30 % de H_2 , el aumento en la proporción de hidrógeno modifica el perfil de formación de CO , desplazando su acumulación hacia regiones más alejadas del quemador. Además, en este caso, la concentración

de CO a la salida del quemador aumenta considerablemente (75.95 veces), lo que indica que, aunque el hidrógeno favorece la reactividad, en proporciones más altas puede generar zonas locales de combustión incompleta.

Estos resultados destacan que la adición moderada de H_2 (10 %-20 %) puede optimizar la eficiencia de la combustión al minimizar la formación de CO , mientras que proporciones más elevadas (30 % H_2) requieren ajustes adicionales en las condiciones operativas para evitar el aumento de contaminantes. Esto subraya la necesidad de equilibrar cuidadosamente las proporciones de combustible para maximizar los beneficios del hidrógeno y reducir las emisiones contaminantes.

Relación de equivalencia de 0.55. Para mezclas con 10 % y 20 % de H_2 , se observa un incremento inicial más pronunciado en la concentración de CO al inicio del quemador, seguido de una disminución abrupta y una posterior estabilización en valores cercanos a 0.025 ppm. Esto sugiere que en estas proporciones el hidrógeno incrementa la reactividad de la mezcla, generando acumulaciones de CO en las primeras etapas de la combustión antes de que el compuesto sea mayormente oxidado en zonas posteriores.

Sin embargo, con un 30 % de H_2 , el comportamiento del CO es más dinámico y complejo, mostrando un incremento inicial seguido de una caída y un segundo pico de mayor magnitud hacia el final del quemador (0.15 ppm). Este perfil refleja que, aunque el hidrógeno favorece la reactividad y la liberación de energía, también genera mayores acumulaciones de CO en ciertas etapas, probablemente debido a oxidaciones incompletas localizadas.

Además, los valores de concentración de CO a la salida del quemador aumentan de manera notable con el contenido de hidrógeno. Con un 10 % de H_2 , la concentración de CO se incrementa 205.62 veces; con un 20 %, aumenta 279.86 veces; y con un 30 %, el incremento es exponencial, alcanzando 5.82×10^7 veces. Este resultado destaca que, aunque el hidrógeno mejora la reactividad y eficiencia de la combustión, su presencia en proporciones más altas puede incrementar significativa-

mente las emisiones de CO , especialmente en condiciones de combustión incompleta o desequilibrada.

El hidrógeno tiene un efecto dual en la combustión: por un lado, mejora la reactividad y acelera el proceso, pero por otro, incrementa las emisiones de CO en proporciones más altas.

5.3.2 FORMACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO

Relación de equivalencia de 0.45. La incorporación de hidrógeno (H_2) en las mezclas de metano (CH_4) influye significativamente en el perfil y la magnitud de las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) durante la combustión. A partir del análisis, se observa que la adición de H_2 no solo acelera el incremento inicial de CO_2 , sino que también desplaza los máximos de concentración hacia posiciones diferentes dentro del quemador, dependiendo del porcentaje de hidrógeno presente.

En la mezcla con un 10 % de H_2 , la concentración de CO_2 aumenta rápidamente, alcanzando un máximo temprano cerca de los 0.115 m y estabilizándose antes de disminuir abruptamente. Este comportamiento refleja cómo incluso pequeñas cantidades de hidrógeno incrementan significativamente la producción de CO_2 , con un aumento de 33.27 veces en comparación con el metano puro. Al incrementar el contenido de hidrógeno al 20 %, se observa un máximo más temprano, cerca de los 0.11 m, pero con un valor ligeramente menor, lo que sugiere una combustión más intensa pero más localizada, con un aumento de 75.14 veces en la concentración de CO_2 . Finalmente, en la mezcla con un 30 % de H_2 , el pico de concentración se produce más tarde, cerca de los 0.15 m, alcanzando el valor más alto, acompañado de un incremento de 110.91 veces en comparación con el 100 % CH_4 .

El hidrógeno actúa como un acelerador de la combustión, aumentando significativamente la producción de CO_2 en función de su proporción en la mezcla. Sin embargo, las variaciones en la posición y la magnitud de los máximos reflejan que una

mayor cantidad de hidrógeno puede modificar la dinámica del proceso, generando picos más tardíos pero de mayor intensidad. Estos resultados destacan la necesidad de optimizar la proporción de hidrógeno en aplicaciones de combustión para equilibrar la eficiencia y las emisiones de CO_2 .

Relación de equivalencia de 0.5. A niveles más bajos de hidrógeno (10 % y 20 %), la formación de CO_2 ocurre rápidamente en las primeras etapas del quemador, alcanzando picos elevados que reflejan una mayor reactividad del combustible. Sin embargo, en estas proporciones, la concentración de CO_2 disminuye drásticamente después del pico, indicando que las reacciones de oxidación del carbono se completan eficientemente en esta región.

Con un 30 % de hidrógeno, el patrón cambia significativamente. La formación de CO_2 se retrasa y comienza a incrementarse en una región más alejada del quemador, lo que sugiere que las reacciones relacionadas con el hidrógeno alteran el equilibrio químico en las etapas iniciales, desplazando la oxidación del carbono hacia zonas posteriores.

En términos de las concentraciones de CO_2 a la salida del quemador, se observa un aumento considerable en todos los casos, con incrementos de 69.79, 80.03 y 77.42 veces para mezclas con 10 %, 20 % y 30 % de hidrógeno, respectivamente. Este comportamiento refleja el impacto positivo del hidrógeno en intensificar las reacciones de combustión, aunque el aumento más pronunciado ocurre en la mezcla con 20 % de hidrógeno, lo que podría indicar un punto óptimo en la proporción de combustible para maximizar la oxidación del carbono.

Relación de equivalencia de 0.55. En mezclas con un 10 % y 20 % de H_2 , las concentraciones de CO_2 a la salida del quemador disminuyen drásticamente en comparación con el metano puro, con factores de reducción de 9.51×10^8 y 4.07×10^{11} , respectivamente. Esta disminución no se asocia a una combustión menos eficiente, sino a la menor cantidad de carbono presente en la mezcla debido a la sustitución parcial del metano por hidrógeno. Además, en estas proporciones, el

hidrógeno acelera las reacciones de oxidación, lo que desplaza el proceso de formación de CO_2 hacia regiones más cercanas a la entrada del quemador, como se observa en la estabilización de las concentraciones alrededor de los 0.07 m.

Sin embargo, en mezclas con un 30 % de H_2 , se observa un comportamiento distinto, donde la concentración de CO_2 aumenta significativamente, en un factor de 52.03 veces a la salida del quemador. Esto podría atribuirse a una mayor proporción de carbono oxidado en la región de combustión, posiblemente debido a una mayor disponibilidad de oxígeno o a condiciones más favorables para la formación de productos finales.

5.3.3 PRODUCCIÓN DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO

Relación de equivalencia de 0.45. El análisis de la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x) revela que la adición de hidrógeno (H_2) al metano (CH_4) afecta significativamente las concentraciones de estas emisiones, tanto en términos de magnitud como de distribución a lo largo del quemador.

Con un 10 % de H_2 , se registra el incremento más notable en la concentración de NO_x , alcanzando un valor máximo de 0.059 ppm en los primeros 0.03 m del quemador, con un aumento relativo de 4.37×10^8 veces en comparación con la mezcla sin hidrógeno. Este comportamiento refleja un incremento en la temperatura local generado por la alta reactividad del H_2 , lo que favorece la formación de NO_x térmicos en las primeras etapas de combustión.

Al incrementar la proporción a 20 % de H_2 , la concentración de NO_x disminuye significativamente, con valores muy cercanos a cero en todo el dominio, y un aumento relativo mucho menor (9.29×10^6 veces). Este resultado sugiere que una mayor cantidad de hidrógeno en esta proporción puede estar promoviendo una combustión más homogénea y una mejor distribución térmica, limitando la formación de NO_x .

Con un 30 % de H_2 , el patrón de concentración de NO_x cambia notablemente, con un incremento cercano a los 0.12 m del quemador y un valor máximo de 0.009 ppm a la salida, representando un aumento relativo de 9.32×10^8 veces. Este comportamiento podría deberse a dinámicas de mezcla más complejas y a cambios en las zonas de alta temperatura debido a la mayor reactividad del hidrógeno.

En general, los resultados demuestran que la adición de hidrógeno tiene un efecto no lineal sobre la formación de NO_x . Mientras que proporciones moderadas (20 % H_2) parecen minimizar estas emisiones, concentraciones más bajas (10 % H_2) o más altas (30 % H_2) generan mayores cantidades de NO_x , especialmente en zonas específicas del quemador. Por lo tanto, es crucial optimizar la proporción de hidrógeno en función de las condiciones operativas para equilibrar la eficiencia de combustión con la reducción de emisiones contaminantes.

Relación de equivalencia de 0.5. En particular, las mezclas con un 30 % de H_2 presentan las concentraciones más altas de NO_x , con un incremento sostenido a lo largo del dominio y alcanzando un máximo de 5×10^{-4} ppm cerca del final del quemador. Esto confirma que el alto contenido de hidrógeno favorece la formación de NO_x debido a las mayores temperaturas generadas durante la combustión.

Además, se observó un notable incremento en las concentraciones de NO_x en la salida del quemador en comparación con los valores iniciales. Para la mezcla con un 10 % de H_2 , la concentración de NO_x aumentó en un factor de 1.8×10^6 , mientras que en la mezcla con un 20 % de H_2 el incremento fue de 5.92×10^5 . Sin embargo, el mayor aumento se registró en la mezcla con un 30 % de H_2 , donde las concentraciones de NO_x crecieron 2.99×10^7 veces.

El contenido de hidrógeno en las mezclas de combustible afecta significativamente las emisiones de NO_x , debido a la correlación directa entre el hidrógeno, las temperaturas alcanzadas en la combustión, y los mecanismos térmicos responsables de la formación de estos compuestos. Aunque las mezclas con menor contenido de hidrógeno (10 % y 20 %) generan concentraciones prácticamente nulas de NO_x den-

tro del quemador, los incrementos observados en la salida destacan la importancia de controlar las condiciones de combustión para mitigar la formación de contaminantes, especialmente en mezclas con altos porcentajes de hidrógeno.

Relación de equivalencia de 0.55. La mezcla con un 20 % de H_2 (80 % CH_4 - 20 % H_2) presenta concentraciones iniciales bajas de NO_x , alcanzando un máximo de aproximadamente 0.2 *ppm* al inicio del dominio, seguido de una rápida caída a valores cercanos a cero. Esto indica que, en esta proporción, aunque el hidrógeno aumenta ligeramente la reactividad, no genera un incremento significativo en las temperaturas promedio del dominio, manteniendo bajos los niveles de formación de NO_x . Además, esta mezcla muestra el menor incremento relativo de NO_x a la salida del quemador (1.11×10^8 veces), destacándose como una opción más eficiente para minimizar estas emisiones.

Para la mezcla con un 10 % de H_2 (90 % CH_4 - 10 % H_2), se observan múltiples picos de NO_x a lo largo del quemador, alcanzando una concentración máxima cercana a 0.19 *ppm*. Este comportamiento refleja que el hidrógeno incrementa la reactividad en ciertas regiones, generando temperaturas locales más altas y favoreciendo la formación de NO_x . La salida del quemador para esta mezcla muestra el mayor incremento relativo en las concentraciones de NO_x (8.90×10^8 veces), evidenciando un mayor impacto en términos de contaminación.

La mezcla con un 30 % de H_2 (70 % CH_4 - 30 % H_2) presenta el pico más alto de concentración de NO_x en el dominio, alcanzando valores superiores a 0.23 *ppm*. Este comportamiento es característico de mezclas con alto contenido de hidrógeno, donde las temperaturas elevadas asociadas a su alta reactividad favorecen significativamente la formación de NO_x por mecanismos térmicos. Aunque los valores disminuyen en etapas posteriores del quemador, la salida del quemador para esta mezcla también muestra un incremento considerable en las concentraciones de NO_x (1.88×10^8 veces).

CAPÍTULO 6

LOGROS DEL TRABAJO

Como parte del desarrollo de este trabajo, se elaboró el artículo titulado “*Análisis numérico de las temperaturas de un quemador divergente con medios porosos usando gas metano para la validación de un modelo CFD*”, el cual fue presentado como ponencia en el Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica (*SOMIM*), celebrado en septiembre de 2024. El artículo fue incluido en las memorias oficiales del congreso y expone el desarrollo y validación de un modelo numérico de combustión en un quemador poroso divergente, mediante simulación CFD en ANSYS FLUENT [16]. La participación en este evento permitió difundir los resultados obtenidos y fortalecer el vínculo académico con la comunidad científica del área.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AL-AJMI, R., A. H. QAZAK, A. M. SADEQ, M. AL-SHAGHDARI, S. F. AHMED y A. K. SLEITI (2025), «Numerical investigation of the potential of using hydrogen as an alternative fuel in an industrial burner», *Fuel*, **385**, pág. 134 194.
- [2] ANDERSON, J. D. y J. WENDT (1995), *Computational fluid dynamics*, tomo 206, Springer.
- [3] CELLEK, M. S. y A. PINARBAŞI (2018), «Investigations on performance and emission characteristics of an industrial low swirl burner while burning natural gas, methane, hydrogen-enriched natural gas and hydrogen as fuels», *International Journal of Hydrogen Energy*, **43**(2), págs. 1194–1207.
- [4] FLUENT, C. (2005), «User's Guide Fluent 6.2 Documentation», *Fluent Inc. January*.
- [5] FRUZZA, F., R. LAMIONI, L. TOGNOTTI y C. GALLETTI (2023), «Flashback of H₂-enriched premixed flames in perforated burners: Numerical prediction of critical velocity», *International Journal of Hydrogen Energy*, **48**(81), págs. 31 790–31 801.
- [6] GONZALES, C. E. A. (2019), *Análisis teórico y experimental de la combustión de mezclas CH₄-SYNGAS en un quemador de medio poroso inerte*, Tesis Doctoral, Universidad de Antioquia.
- [7] GRIFFITHS, J. F. (2019), *Flame and combustion*, Routledge.

- [8] HERRERA, A., O. ÁLVAREZ, J. ESCOBAR, V. MORENO, A. OLIVEIRA JR y D. HOTZA (2012), «Fabricación y caracterización de espumas de alúmina para aplicación en quemadores porosos radiantes», *Matéria (Rio de Janeiro)*, **17**, págs. 973–987.
- [9] HEYWOOD, J. B. (2018), *Internal Combustion Engine Fundamentals*, segunda edición, McGraw-Hill Education, New York.
- [10] HSU, C.-K., C.-L. LEE, C.-H. WANG y C.-J. G. JOU (2014), «Reduction of energy consumption and pollution emissions for industrial furnace using hydrogen-rich tail gas», *International journal of hydrogen energy*, **39**(18), págs. 9675–9680.
- [11] INCROPERA, F. P., D. P. DEWITT, T. L. BERGMAN y A. S. LAVINE (2011), *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7^a edición, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- [12] JR., C. E. B. (2006), *Industrial Burners Handbook*, Elsevier.
- [13] KIRKPATRICK, A. T. y K. K. KUO (2024), *Principles of Combustion*, John Wiley & Sons.
- [14] KISLINGER, C., G. DAURER, S. SCHWARZ, M. DEMUTH, C. GABER y C. HOCHENAUER (2025), «CFD study of hydrogen combustion effects on the heat-up characteristics of steel samples using a low-swirl burner: A comparative analysis with methane», *Applied Thermal Engineering*, **261**, pág. 125 105.
- [15] LIU, Y., Y. DENG, J. SHI, Y. LIU, X. WANG, B. GE y Z. MIN (2023), «Experimental investigation on flame stability and emissions of lean premixed methane–air combustion in a developed divergent porous burner», *Journal of Cleaner Production*, **405**, pág. 137 070.
- [16] MARROQUÍN-FONSECAA, P. N., D. DE LA ROSA-URBALEJOA, H. G. RAMÍREZ-HERNÁNDEZA, S. MARTÍNEZ-MARTÍNEZA y O. A. DE LA GARZAA (2025), «Análisis numérico de las temperaturas de un quemador divergente

- con medios porosos usando gas metano para la validación de un modelo CFD», *Memorias del Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica*.
- [17] MAYRHOFER, M., M. KOLLER, P. SEEMANN, R. PRIELER y C. HOCHENAUER (2021), «Assessment of natural gas/hydrogen blends as an alternative fuel for industrial heat treatment furnaces», *International journal of hydrogen energy*, **46**(41), págs. 21 672–21 686.
- [18] MORAN, M. J., H. N. SHAPIRO, D. D. BOETTNER y M. B. BAILEY (2020), *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 9ª edición, John Wiley & Sons.
- [19] MULLINGER, P. y B. JENKINS (2022), *Industrial and process furnaces: principles, design and operation*, Butterworth-Heinemann.
- [20] MUNSON, B. R., D. F. YOUNG, T. H. OKIISHI y W. W. HUEBSCH (2013), *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 7ª edición, John Wiley & Sons.
- [21] NOZARI, H., O. TUNCER y A. KARABEYOGLU (2017), «Evaluation of ammonia-hydrogen-air combustion in SiC porous medium based burner», *Energy procedia*, **142**, págs. 674–679.
- [22] PASHCHENKO, D. (2020), «Hydrogen-rich fuel combustion in a swirling flame: CFD-modeling with experimental verification», *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**(38), págs. 19 996–20 003.
- [23] PRITCHARD, P. J. y J. W. MITCHELL (2020), *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics*, 9ª edición, John Wiley & Sons.
- [24] RIPOLL, N. y M. TOLEDO (2021), «Hydrogen and syngas production from methane-acetylene rich combustion in inert porous media burner», *Results in Engineering*, **12**, pág. 100 287.
- [25] RODRÍGUEZ, R. M., G. DA SILVA, L. URBINA *et al.* (2022), «Estudio del proceso de electrólisis para la producción de Hidrógeno Verde, a partir del agua de mar», *Tekhné*, **25**(3), págs. 01–22.

-
- [26] ROJAS MOYA, J. P. (2021), *Simulación computacional del proceso de combustión en medios porosos inertes con variación radial de la porosidad*, Tesis de doctorado, Universidad Técnica Federico Santa María.
- [27] SOLTANIAN, H., M. Z. TARGHI y M. MAEREFAT (2025), «Exergy, energy, and environmental investigation of porous cooking burner», *Results in Engineering*, **25**, pág. 103 773.
- [28] SORGULU, F., M. OZTURK, N. JAVANI y I. DINCER (2023), «Experimental investigation for combustion performance of hydrogen and natural gas fuel blends», *International Journal of Hydrogen Energy*, **48**(88), págs. 34 476–34 485.
- [29] TURNS, S. R. *et al.* (1996), *Introduction to combustion*, tomo 287, McGraw-Hill Companies New York, NY, USA.
- [30] WANG, T., H. ZHANG, Y. ZHANG, H. WANG, J. LYU y G. YUE (2022), «Efficiency and emissions of gas-fired industrial boiler fueled with hydrogen-enriched nature gas: A case study of 108 t/h steam boiler», *International Journal of Hydrogen Energy*, **47**(65), págs. 28 188–28 203.
- [31] WHITE, F. M. (2016), *Fluid Mechanics*, 8^a edición, McGraw-Hill Education.
- [32] ZHAO, Y., V. MCDONELL y S. SAMUELSEN (2019), «Experimental assessment of the combustion performance of an oven burner operated on pipeline natural gas mixed with hydrogen», *International journal of hydrogen energy*, **44**(47), págs. 26 049–26 062.