

# **ANÁLISIS TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA COMBUSTIÓN ESTABILIZADA EN LA SUPERFICIE DE UN MEDIO POROSO CONFINADO**

---

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA

**I.M. CAMILO ECHEVERRI URIBE**

**M. Sc. ANDRÉS A. AMELL ARRIETA**

**Director**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA**

**MEDELLÍN, 04 DE NOVIEMBRE DE 2016**



**GASURE**  
Grupo de Ciencia y Tecnología del  
Gas y Uso Racional de la Energía



# Agradecimientos

Quiero, expresar mi más sincero y profundo agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que con su apoyo hicieron posible la realización de este trabajo.

A mis padres, Manuel (QEPD) y Nhora, mi mamita Carolina y mi hermano Manuel Alejandro (con quien disfruto enormemente jugar al fútbol), por haberme hecho la persona que soy hoy en día; muchos de los logros se los debo a ustedes, en los cuales incluyo este. Gracias por motivarme siempre para alcanzar mis metas

A mi novia, Sandy, por brindarme su amor, apoyo, confianza y por compartir innumerables momentos felices e inolvidables a mi lado.

A mi director y profesor M. Sc. Andrés A. Amell Arrieta, por sus valiosos aportes en la orientación y dirección de este trabajo, y además, por haberme dado la oportunidad de ser parte del Grupo GASURE.

Gracias también a mis compañeros del grupo GASURE por el excelente ambiente de trabajo, por su apoyo y valiosas discusiones académicas. Agradezco especialmente a Carlos E. Arrieta y Alex M. García, con quienes tuve largas, pero exitosas jornadas de medición.

Al profesor David Aguiar y el Grupo GIGA por el soporte experimental en la medición de las inestabilidades acústicas.

A la Unión Temporal de Investigación e Innovación en Combustión Avanzada de Uso Industrial (UT. INCOMBUSTION) a través del proyecto "*Desarrollo de un sistema de combustión sumergida*" a partir del cual surgió la idea de la realización de este trabajo de investigación y mediante el cual financió la ejecución del mismo.

Por último, pero no menos importante, a Dios por dirigirme en el sendero correcto, ayudándome a aprender de mis errores y a no cometerlos nuevamente.

A todos, mis más sinceros agradecimientos y gratitud.

### ***Nota al lector***

*En el presente trabajo se incluyen recursos multimedia cuyo uso requiere la conexión a internet. Estas se encuentran como notas de pie de página y puede accederse a ellas presionando la tecla Control + Clic Izquierdo.*



# Resumen

En este trabajo se realiza un estudio de la combustión estabilizada sobre la superficie de un medio poroso confinado, en donde se evalúan parámetros como los perfiles de temperatura al interior del medio poroso, estabilidad y morfología de llamas, emisiones contaminantes, efectos de la recirculación de gases sobre la estructura de la llama, entre otros. Lo anterior, debido a que no hay reportes de la combustión estabilizada en la superficie de medios porosos confinados, lo cual es un vacío teniendo en cuenta que para aprovechar eficientemente la energía aportada por los combustibles, el calor debe concentrarse, tal como sucede en motores de combustión interna, turbinas y hornos.

Para abordar el problema, se realizan análisis teóricos, numéricos y experimentales, tomando como base estudios previos realizados por el grupo GASURE y la revisión del marco teórico y estado del arte.

Se hace una descripción detallada de la metodología implementada para evaluar los aspectos teóricos, como también los modelos, suposiciones (o simplificaciones) utilizados en las simulaciones numéricas y las técnicas de medición de cada uno de los parámetros evaluados experimentalmente, destacando la implementación de la técnica OH-PLIF para realizar un diagnóstico óptico de la combustión (morfología de llama).

Uno de los hallazgos de este trabajo es que en la combustión estabilizada sobre la superficie de medios porosos confinados, prima el efecto del régimen de la transferencia de calor sobre los efectos de la recirculación de gases, lo cual se evidenció en los resultados de la morfología de llama, emisiones contaminantes, perfiles de temperatura del medio poroso y rango de operación del quemador, tanto numérica como experimentalmente. Lo anterior, se pudo establecer al comparar la combustión estabilizada sobre la superficie del medio poroso confinado con respecto a uno no confinado.

Adicionalmente, se encontró que para la geometría utilizada en los experimentos se generaron fenómenos termo-acústicos en el quemador confinado, los cuales no se presentan en condiciones de no confinamiento y que además, al modificar la geometría de la sección de salida del quemador, el efecto termo-acústico puede mitigarse o incluso disiparse.

**Palabras clave:** combustión, superficie, acústica, recirculación, transferencia de calor, poroso, confinado.

# Tabla de contenido

Pág.

Lista de figuras.....	iii
Lista de tablas .....	vii
1 Introducción .....	8
1.1 Planteamiento del problema.....	9
1.2 Objetivos .....	11
1.2.1 Objetivo general.....	11
1.2.2 Objetivos específicos .....	11
2 Marco teórico y estado del arte .....	12
2.1 Laser Induced Fluorescence (LIF) .....	13
2.2 Efecto de la interacción de múltiples descargas de premezcla.....	16
2.3 Velocidad de deflagración laminar .....	20
2.4 Quemadores de medios porosos inertes .....	20
2.5 Estudios de la combustión en medios porosos .....	22
2.6 Modelamiento de la combustión en medios porosos .....	25
2.6.1 Suposiciones y limitaciones del modelo de medios porosos en <i>ANSYS-Fluent</i> .....	26
2.6.2 Modelamiento de medios porosos basado en la velocidad física.....	27
2.6.3 Ecuaciones de conservación.....	27
2.7 Flujos en medios confinados .....	29
2.7.1 Efecto del confinamiento en la formación de corrientes de recirculación que puedan afectar la zona de reacción.....	30
2.7.2 Extinción de llama y fenómeno de retollama en medios porosos.....	32
2.7.3 Fenómeno acústico en cámaras de combustión .....	34
2.8 Mediciones experimentales en quemadores de PIM .....	37
3 Metodología .....	38
3.1 Selección del material poroso .....	39
3.2 Metodología del modelamiento y simulación numérica .....	39
3.2.1 Geometría y mallado.....	40
3.2.2 Propiedades de la fase sólida y gaseosa .....	41
3.2.2.1 Fase sólida.....	41
3.2.2.2 Fase gaseosa.....	42
3.2.3 Determinación de los factores de resistencia viscosa ( $1/\alpha$ ) e inercial ( <b>C2</b> ) .....	42
3.2.4 Coeficiente convectivo de transferencia de calor en el medio poroso .....	44
3.2.5 Solucionadores .....	45

3.2.6	Esquemas de discretización .....	45
3.2.7	Selección del modelo de combustión.....	46
3.2.8	Criterios de convergencia.....	46
3.2.8.1	Independencia del mallado.....	49
3.3	Metodología experimental .....	50
3.3.1	Metodología para determinar el rango de estabilidad del quemador, emisiones contaminantes y perfiles de temperatura del medio poroso.....	53
3.3.2	Metodología para el estudio de la morfología de la llama y efectos acústicos .....	55
3.3.2.1	Montaje de la técnica OH-PLIF.....	55
3.3.2.2	Procesamiento de imágenes: OH-PLIF.....	59
3.3.2.3	Mediciones intensidad acústica.....	59
3.3.3	Determinación de las condiciones de recirculación .....	62
4	Resultados.....	63
4.1	Análisis del número de Peclet .....	64
4.2	Resultados de simulaciones numéricas .....	66
4.2.1	Rango de operación y morfología de llama .....	66
4.2.2	Perfil de temperatura de la fase sólida y gaseosa.....	72
4.2.3	Emisiones contaminantes.....	74
4.3	Resultados experimentales.....	75
4.3.1	Estabilidad y morfología de llama .....	75
4.3.1.1	Fenómeno termo-acústico.....	77
4.3.1.2	Comparación de rango de operación del quemador confinado vs quemador libre	79
4.3.2	Efecto de la recirculación en llamas confinadas .....	87
4.3.3	Emisiones de gases y perfiles de temperatura.....	91
4.3.3.1	Comparación de las emisiones contaminantes para una llama libre y una confinada, estabilizada sobre la superficie del medio poroso.....	94
4.3.3.2	Comparación del perfil de temperatura numérico y experimental.....	95
4.3.3.3	Comparación de las emisiones contaminantes experimental y numérica .....	97
4.3.4	Intensidad del sonido .....	98
5	Conclusiones.....	101
	Recomendaciones para trabajos futuros.....	104
	Bibliografía.....	105
	Anexos.....	112

# Lista de figuras

Pág.

Figura 1. Excitación de un electrón. Adaptado de García [18].	13
Figura 2. Proceso de la fluorescencia.	14
Figura 3. Diagrama esquemático del nivel de energía de diferentes procesos posibles de transición entre el estado tierra ( $X^2\Pi$ ) y el primer estado excitado ( $A^2\Sigma^+$ ) del OH. Tomado de Jonsson [20].	15
Figura 4. Tipos de llama: a) Llama no premezcladas, b) Llama premezclada. Tomada en el Laboratorio de Combustión del Grupo GASURE.	16
Figura 5. Llamas de premezcla. Adaptada de [24].	17
Figura 6. Efecto de la separación de llamas de premezcla GLP/aire en atmósfera libre. Tomado de [27].	18
Figura 7. Comparación de la estructura de una llama de premezcla GLP/aire en atmósfera libre con múltiples llamas de premezcla separadas por una distancia $S$ . a) Llama sin interacción, b) Interacción de múltiples llamas de premezcla con la técnica OH-PLIF, c) Interacción de múltiples llamas de premezcla con quimioluminiscencia. $\phi=1.28$ . Tomado de [28].	19
Figura 8. Efecto de $S/D_0$ en la reducción de la longitud del cono de premezcla. Tomada de [28].	20
Figura 9. Quemadores de combustión estabilizada en la superficie. a. Placas metálicas, b. Fibras metálicas, c. Estructuras cerámicas: honeycomb. Tomado de [33].	21
Figura 10. Método del flux de calor para determinar la velocidad de deflagración laminar [32].	21
Figura 11. Esquema de la transferencia de calor en un quemador PIM a) Esquema de la transferencia de calor en un medio poroso. Tomada de [3] y b) Dirección del flujo de calor en un medio poroso. Adaptada de [40].	23
Figura 12. Flujo a través de un quemador poroso de placas perforadas. Adaptada de Yahagi y Hase [60].	30
Figura 13. Límites de estabilidad. Tomado de J. A. Wüning and J. G. Wüning [63].	32
Figura 14. Esquema de la transferencia de calor en el sistema.	33
Figura 15. Combustión inestable. a) Retrollama, b) Desprendimiento de llama. Fotografías tomadas en el Laboratorio de Combustión del Grupo GASURE.	33
Figura 16. Efecto de la adición de calor en los puntos de máxima o mínima amplitud de una onda de presión.	35
Figura 17. Efecto de la frecuencia en las llamas. Imagen Schlieren $\phi = 1.05$ , velocidad media de $V = 1.76$ m/s y amplitud de perturbación de la velocidad $v1 = 0.26$ m/s. a) $f=10,5$ Hz, b) $f=150,5$ Hz. Tomado de Schuller [70].	36
Figura 18. Dimensiones de la geometría mallada (medidas en mm).	40
Figura 19. Mallado y condiciones de frontera.	41

Figura 20. Curva experimental para determinar $1/\alpha$ y $C2$ .....	43
Figura 21. Curva del coeficiente convectivo de transferencia de calor en función de la relación de equivalencia. ....	44
Figura 22. Metodología de convergencia y exactitud para la solución final de la simulación numérica.....	48
Figura 23. Independencia de mallado para 37.800, 151.200 y 218.160 celdas.....	49
Figura 24. Quemador de prueba: a) Partes del quemador, b) Vista superior (sección de salida 1) (S1), c) Vista superior (sección de salida 2) (S2), d) Longitud de la cámara de combustión. Dimensiones en mm.....	52
Figura 25. Dimensiones del medio poroso.....	52
Figura 26. Esquema montaje experimental para determinar rango de estabilidad, perfil de temperatura al interior del medio poroso y emisiones de gases.....	55
Figura 27. Esquema del montaje para el estudio de la morfología de la llama.....	56
Figura 28. Esquema de la formación del plano láser con la utilización del juego de lentes. ....	56
Figura 29. Simulación de la variación de la intensidad LIF de varias líneas de excitación para el OH. Software LIFBASE 2.1. ....	57
Figura 30. Comparación de la intensidad LIF del OH, obtenida experimentalmente y simulado. ....	57
Figura 31. Plano laser con acetona: a) vista lateral, b) vista superior. ....	58
Figura 32. Prueba de linealidad de la intensidad del OH vs Energía del rayo láser. ....	58
Figura 33. Procedimiento para el post-procesamiento de las imágenes.....	59
Figura 34. Sonómetro SoundPro modelo SP-DL-1-1/3 con micrófono BK. ....	60
Figura 35. Esquema del montaje experimental para la medición de la acústica. ....	61
Figura 37. Rango de operación según número de Peclet. ....	65
Figura 38. Mapa de estabilidad con base al número de Peclet.....	65
Figura 39. Estabilidad de las llamas mediante simulación numérica (contorno de temperatura): a) Desprendimiento (260 kW/m <sup>2</sup> , $\phi=0.55$ ), b) Estable (260 kW/m <sup>2</sup> , $\phi=0.7$ ), c) Retrollama (390 kW/m <sup>2</sup> , $\phi=0.8$ ).....	66
Figura 40. Estabilidad de las llamas mediante simulación numérica (contorno de OH): a) Desprendimiento (260 kW/m <sup>2</sup> , $\phi=0.55$ ), b) Estable (260 kW/m <sup>2</sup> , $\phi=0.7$ ), c) Retrollama (390 kW/m <sup>2</sup> , $\phi=0.8$ ).....	67
Figura 41. Mapa de estabilidad de las simulaciones numéricas.....	68
Figura 42. Líneas para determinar la posición de la máxima fracción del radical OH. ....	69
Figura 43. Altura del frente de llama simulado con respecto a la superficie del medio poroso. ....	69
Figura 44. Vectores de velocidad en m/s. Condición: 260 kW/m <sup>2</sup> , $\phi=0.70$ .....	70
Figura 45. Puntos de anclaje para diferentes condiciones de estabilidad de llama. Adaptada de [86]. ....	71
Figura 46. Puntos de anclaje para diferentes condiciones de estabilidad de llama. Elaboración propia. ....	71
Figura 47. Perfil de temperatura numérico al interior del medio poroso. ....	73
Figura 48. Línea para determinar las emisiones contaminantes. ....	74
Figura 49. Emisiones contaminantes de las simulaciones numéricas: a-b) Efecto de la potencia específica, c-d) Efecto de la relación de equivalencia. ....	75

Figura 50. Rango de estabilidad: a) Experimental, b) Comparación de los resultados experimentales con los numéricos. ....	76
Figura 51. Termografía del quemador operando a una potencia específica de $260 \text{ kW/m}^2$ y $\phi=0.70$ : a) Vista lateral izquierda, b) Vista frontal, c) Vista lateral derecha, d) vista trasera.....	77
Figura 52. Histograma de temperatura a lo largo de la línea P1 de la Figura 51 d).....	77
Figura 53. Esquema de honeycomb. ....	78
Figura 54. Configuraciones: a) Esquema llama libre, b) Esquema llama confinada. V.C.: volumen de control. ....	80
Figura 55. Comparación del rango de estabilidad para una llama confinada y no confinada estabilizada sobre la superficie de un medio poroso tipo honeycomb. ....	81
Figura 56. Perfil de temperatura al interior del medio poroso: a) Efecto de la potencia específica, b) Efecto de la relación de equivalencia. C: Confinada, L: Libre. ....	82
Figura 57. Morfología de llamas confinadas. La línea de color amarillo indica la presencia del fenómeno termo-acústico.....	83
Figura 58. Procesamiento de imagen de llama desprendida y confinada ( $520 \text{ kW/m}^2$ , $\phi=0.70$ ): a) Fotografía e imagen OH-PLIF, b) Perfil de la altura del frente de llama con respecto a la superficie del medio poroso.....	84
Figura 59. Procesamiento de imagen de llama estable y confinada ( $260 \text{ kW/m}^2$ , $\phi=0.70$ ): a) Fotografía e imagen OH-PLIF, b) Perfil de la altura del frente de llama con respecto a la superficie del medio poroso.....	85
Figura 60. Altura del frente de llama con respecto a la superficie del quemador: a) Efecto de la relación de equivalencia, b) Efecto de la potencia específica. (C): llama confinada. ....	86
Figura 61. Comparación de las emisiones de $\text{CO}_2$ con respecto al valor esperado: a) Efecto de la potencia específica, b) Efecto de la relación de equivalencia. ....	88
Figura 62. Comparación de la altura del frente de llama con respecto a la superficie del medio poroso para una llama confinada y una llama libre. (C): Confinada, (L): Libre.....	89
Figura 63. Efecto de la potencia específica: a-b) Emisiones contaminantes, c) Perfil de temperatura. ....	92
Figura 64. Efecto de la relación de equivalencia: a-b) Emisiones contaminantes, b) Perfil de temperatura. ....	93
Figura 65. Variación de las emisiones contaminantes con respecto a la altura de la superficie del medio poroso: a-b) Efecto en la potencia específica, c-d) Efecto de la relación de equivalencia. A: punto de medición ubicado a 7 cm por debajo de la salida de la cámara de combustión, B: punto de medición a 5 cm de la superficie del medio poroso. ....	94
Figura 66. Comparación de emisiones contaminantes para una llama libre y confinada: a-b) Efecto de la relación de equivalencia, c-d) Efecto de la potencia específica. (C): Confinada, (L): Libre. ..	95
Figura 67. Comparación perfil de temperatura experimental y numérico. ....	96
Figura 68. Comparación de las emisiones contaminantes numérica y experimentalmente: a-b): Relación de equivalencia constante, c-d) Potencia específica constante. ....	97
Figura 69. Intensidad del sonido en función de la frecuencia. ....	98
Figura 70. Comparación del nivel del sonido para secciones de salida de la cámara de combustión diferentes.....	99

Figura 71. Rango de operación con una sección de salida de 6 cm x 6 cm. Marcadores amarillos: fenómeno termo-acústico.....	100
Figura A2 - 1. Esquema del método Pressure-Based Segregated.....	116
Figura A2 - 2. Esquema del algoritmo Pressure-Based Coupled.....	117
Figura A6 - 1. Diagrama de combustión del metano utilizando el software CombuGas desarrollado por el Grupo GASURE.....	127
Figura A7 - 1. Resultados del uso del software REFACT.....	128

# Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros del PIM utilizados en las simulaciones. ....	42
Tabla 2. Metodología para obtener convergencia en las simulaciones numéricas.....	47
Tabla 3. Diseño de experimentos #1.....	53
Tabla 4. Rangos de medición, precisión y principio de funcionamiento de los analizadores de gases. .....	54
Tabla 5. Características del micrófono. ....	60
Tabla 6. Diseño de experimentos #2.....	62

# Introducción

1

En la actualidad las economías mundiales giran en torno a la disponibilidad de recursos energéticos y una muestra de ello es la reciente volatilidad en los precios del petróleo, la cual causó alertas en muchos países en los que la fuente principal de ingreso es este recurso. Por lo anterior, muchas investigaciones en el mundo apuntan hacia las fuentes de energía de origen renovable, pero éstas no están lo suficientemente desarrolladas como para realizar un cambio inmediato hacia estas tecnologías. De acuerdo a la Agencia Internacional de la Energía [1] más del 80% de la energía en el mundo es aportada por fuentes de origen fósil, en donde el principal método para el aprovechamiento de esta energía es la combustión y es allí en donde aparece un concepto muy importante en la actualidad que se conoce como eficiencia energética, pero que debe ir de la mano con el cuidado del medio ambiente.

En este orden de ideas, la forma de utilizar este tipo de combustibles es usando tecnologías que permitan disminuir al máximo posible la emisión de gases contaminantes al ambiente y, que a su vez, tengan alta eficiencia energética. Una de las tecnologías que permite tener estas ventajas en comparación con tecnologías convencionales de combustión se conoce como la combustión en medios porosos inertes. Esta tecnología permite obtener eficiencias de hasta 71 % en comparación con sistemas de combustión comunes que pueden llegar a alcanzar el 47 %, gracias al principio de la recirculación de calor, lo cual permite operar este tipo de sistemas con la misma cantidad de energía, pero con menor consumo de combustible y en condiciones de operación que logran disminuir enormemente las emisiones contaminantes al ambiente.

Por las razones anteriores, en este trabajo se estudia la combustión estabilizada en la superficie de un medio poroso confinado, ya que éste de acuerdo a la literatura, presenta mayores eficiencias en comparación a la combustión sumergida (o combustión en quemadores radiantes), y además no ha sido estudiada cuando se confina la llama en una cámara de combustión.

## 1.1 Planteamiento del problema

Una de las técnicas más prometedoras que en los últimos años se ha estado investigando es la combustión premezclada en medios porosos inertes (PIM, del inglés Porous Inert Media), en la cual es posible distinguir, a su vez, dos técnicas para la estabilización de la llama: al interior del medio poroso inerte [2] y sobre la superficie del medio poroso [3].

En una llama libre la oxidación tiene lugar en una delgada zona de reacción debido a las pobres propiedades de transferencia de calor que caracterizan a las mezclas gaseosas, las cuales ocasionan una baja transferencia de energía hacia la premezcla aguas arriba, afectando la propagación de la llama y adicionalmente la estabilidad de la combustión, sobre todo en condiciones de premezcla pobres [4]. Con la inclusión de un material sólido poroso en la zona de reacción se amplían los límites de inflamabilidad y se mejora el coeficiente global de transferencia de calor hacia la premezcla sin quemar, principalmente por radiación y conducción, debido a las buenas propiedades térmicas que tienen los materiales sólidos en comparación con los gaseosos [3]. De esta manera, se logra que parte del calor liberado en el proceso de combustión sea conducido y radiado hacia la premezcla aguas arriba mejorando la estabilidad del proceso.

Por lo anterior, actualmente existe un gran interés por evaluar el comportamiento de quemadores de medios porosos bajo diversas condiciones de operación que emulen las condiciones de operación que se presentan en dispositivos prácticos. Tal es el caso de operación a presiones positivas y en sistemas confinados que es característico de turbinas a gas [5], como también en quemadores con cámaras de combustión para generar corrientes de gases de combustión a alta velocidad y gran impulso aerodinámico en la descarga. En especial, este interés se debe a que estudios recientes muestran que bajo estas condiciones y en un quemador de medio poroso las propiedades de combustión, sobre todo, la velocidad de deflagración laminar ( $S_L$ ), exhibe un comportamiento muy diferente al que se presenta en una llama convencional [6], lo cual tiene un impacto directo en la estabilidad de la reacción.

Se ha encontrado que la presión afecta el proceso de combustión y sus fenómenos relacionados, como es el caso del comportamiento de la velocidad de deflagración en quemadores PIM en modo sumergido en altas presiones en comparación de las llamas libres bajo las mismas condiciones, donde se ha encontrado que  $S_L$  aumenta en los PIM en lugar de disminuir como ocurre en llamas libre de premezcla en altas presiones [7].

Por otro lado, en todo sistema de combustión confinado se generan corrientes de recirculación de productos de combustión [8,9], los cuales pueden afectar la estabilidad de llama. Estas recirculaciones dependen de los impulsos con los que son descargados los gases (aire y combustible) en las cámaras de combustión y de la geometría del recinto donde se descargan las corrientes de fluido [10]. Sin embargo, el comportamiento de las corrientes de recirculación difiere cuando el flujo se descarga por medio de un orificio a cuando éste se descarga a través de múltiples orificios como ocurre en un medio poroso. Esto se debe a que si bien en cada poro la velocidad se incrementa, el flujo másico en cada poro es menor y como resultado el impulso se disminuye. A pesar de lo anterior, las corrientes de recirculación van a estar presentes y pueden afectar la fluidodinámica de la combustión estabilizada sobre el medio poroso al generar fluctuaciones en la llama, de tal forma que pueden producir efectos acústicos no deseados en la cámara de combustión. Estas interacciones tienen consecuencias indeseables que van desde pequeños incrementos en el ruido

hasta un fallo mecánico causado por el aumento de las tasas de transferencia de calor o de resonancia [11].

Por lo anterior, la comprensión de los efectos de las fluctuaciones de presión en la combustión es fundamental para el diseño y desarrollo de dispositivos de combustión prácticos, seguros y eficientes.

Hasta el momento son pocos los estudios realizados de combustión estabilizada en la superficie de PIM en medios confinados. Los estudios hacen referencia al caso cuando la combustión se da dentro del medio poroso (combustión sumergida) [7,12,13], pero no reportándose estudios para la combustión estabilizada en la superficie de PIM confinados; sólo se encontraron reportes acerca de la combustión estabilizada en la superficie de PIM en medios no confinados, es decir, de llamas libres [14–17].

Con la combustión estabilizada en la superficie en las condiciones planteadas, sería posible aumentar la potencia específica ( $P_{T_{esp}}$ ) por medio del aumento del flujo de combustible con el fin de vencer cabezas de presiones y garantizar mayor transferencia de calor por convección, lo cual puede ser de gran efectividad en el calentamiento de columnas hidrostáticas de un fluido líquido. Adicionalmente, con la aplicación de esta tecnología de combustión es posible lograr disminuciones de las emisiones contaminantes con respecto a los sistemas de combustión convencionales.

*En el contexto anteriormente planteado resulta pertinente encontrar respuesta a la siguiente pregunta: ¿Cómo y por qué se ve afectado el rango de operación estable (estabilidad de la zona de reacción y efectos acústicos críticos), la morfología de la zona de reacción y emisiones de CO y NO<sub>x</sub>, en un quemador de medio poroso con combustión estabilizada en la superficie en un ambiente confinado?*

Por esta razón, este trabajo se presenta como una alternativa para el estudio fenomenológico, la innovación y apropiación tecnológica en sistemas de combustión estabilizada en la superficie de un medio poroso confinado.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Evaluar el desempeño de los parámetros característicos (perfiles de temperatura, emisiones contaminantes, estabilidad y morfología de llama) de un sistema de combustión estabilizado en la superficie de un medio poroso confinado.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Analizar teórica y numéricamente los fenómenos y parámetros característicos (perfiles de temperatura, emisiones contaminantes, estabilidad y morfología de llama) de un sistema de combustión estabilizado en la superficie de un medio poroso confinado.
- Evaluar experimentalmente el comportamiento de los parámetros característicos (perfiles de temperatura, emisiones contaminantes, estabilidad y morfología de llama) de un sistema de combustión estabilizado en la superficie de un medio poroso confinado.
- Comparar los parámetros característicos (perfiles de temperatura, emisiones contaminantes, estabilidad y morfología de llama) de un sistema de combustión estabilizado en la superficie de un medio poroso confinado, con respecto a otro que opere en condiciones atmosféricas.

# Marco teórico y estado del arte

## 2

Debido a que el propósito central de este trabajo es analizar la combustión en medios porosos confinados, es necesario presentar algunos de los conceptos teóricos más importantes y el estado del arte actual para tener bases conceptuales que permitan comprender los fenómenos que se dan en esta tecnología de combustión.

Para lograrlo, en primer lugar se hace una presentación de la técnica LIF con el fin de mostrarle al lector, de forma rápida, cuál es el principio por el cual es posible determinar la ubicación del frente de llama utilizando técnicas de diagnóstico óptico de la combustión.

Luego, se introduce el concepto de velocidad de deflagración laminar que es fundamental en este estudio, ya que la estabilización de las llamas sobre la superficie del medio poroso está altamente relacionada con este término. Posteriormente, se presentan los diferentes tipos de medios porosos que hay en la actualidad y que operan con combustión estabilizada en la superficie, junto con estudios que evalúan este tipo de tecnología ya sea teórica, numérica o experimentalmente.

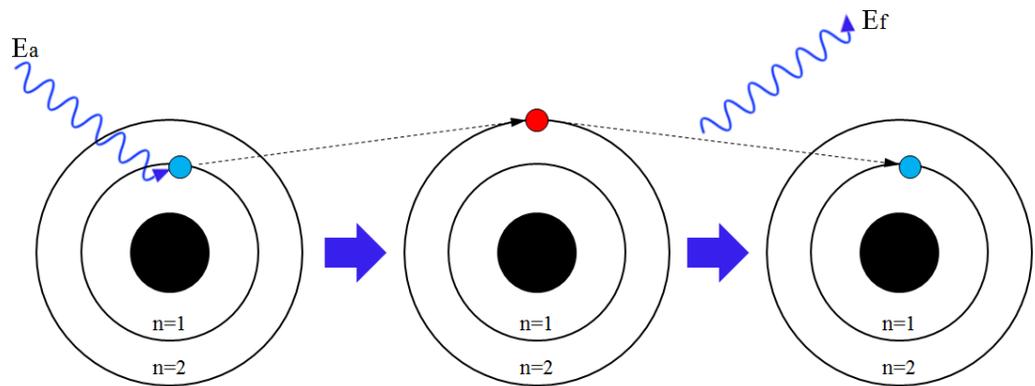
En la revisión del estado del arte se incluyen las metodologías de medición experimental, el uso de software CFD para la predicción de este tipo de combustión, incluyendo las suposiciones y limitaciones de los modelos y otros fenómenos asociados a la aerodinámica del flujo, debido a que en medios confinados se generan corrientes de recirculación las cuales pueden afectar la estabilidad de las llamas.

Finalmente, se presentan los diferentes fenómenos de inestabilidad que pueden presentarse en este tipo de quemadores como lo son los desprendimientos, las retrollamas y los efectos termoacústicos.

## 2.1 Laser Induced Fluorescence (LIF)

La técnica LIF o fluorescencia láser inducida es una técnica que en los últimos años se ha utilizado para realizar diagnósticos ópticos en la combustión con el fin de estudiar la morfología de llamas, determinar la ubicación el frente de llama y comprender fenómenos presentes en la combustión.

El principio de esta técnica se basa en la excitación de electrones. Para comprender este fenómeno en la Figura 1 se muestra un átomo con un electrón en un nivel de energía  $n=1$ . Si a este electrón se le excita mediante la adición de energía, el electrón la absorbe y pasa de su estado estable  $n=1$  a un estado mayor  $n=2$  y se dice que el electrón se encuentra en un estado excitado, sin embargo estos estados son muy inestables y por ende, para que el electrón permanezca en su estado más estable, éste debe liberar la energía absorbida ( $E_a$ ) y regresar a su nivel original, pero al hacerlo la energía liberada ( $E_f$ ) es emitida en forma de fotones. Tal fenómeno se conoce como fluorescencia. Cabe anotar que la energía liberada es menor a la absorbida, debido a que se produce una disipación de energía, la cual se explicará a continuación.



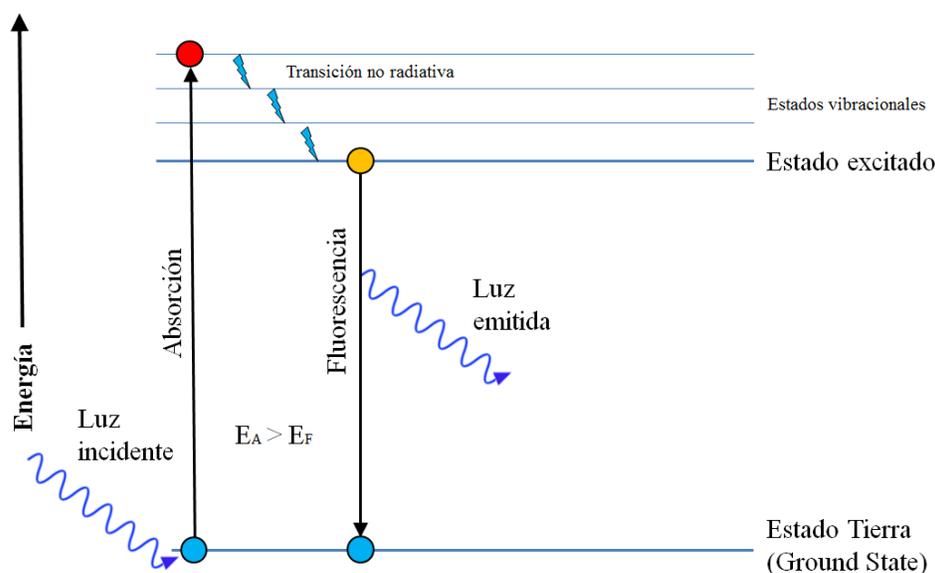
**Figura 1. Excitación de un electrón. Adaptado de García [18].**

En la Figura 2 se presenta un diagrama en donde se pueden observar diferentes niveles de energía. El primer nivel de energía es conocido como *Ground State* (estado tierra) y es el estado de más baja de energía al que puede estar un electrón. Por encima de este, se encuentran los niveles de mayor energía. Cuando un electrón pasa del estado tierra a uno mayor, se dice que este pasó a un estado vibracional en donde el electrón pierde energía en forma de calor debido a la vibración de las moléculas (transición no radiativa) y finalmente se llega al estado excitado. Tal como se mencionó anteriormente, el electrón en el estado excitado es inestable y tiende a volver a su estado más estable dando lugar a un proceso de des-excitación o fluorescencia en donde el electrón emite un fotón para liberar el exceso de energía que contiene. Para ampliar la explicación de este fenómeno, el lector puede seguir el recurso multimedia si así lo desea <sup>1</sup>. Es importante resaltar que no debe confundirse excitación con ionización, siendo este último el proceso mediante el cual un electrón es alejado totalmente del átomo mediante la adición de una cantidad considerable de energía.

<sup>1</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=CcssdJf0pKQ>

Debido a que las moléculas son diferentes unas de otras, cada una de ellas presenta un comportamiento diferente cuando es excitada. Sin embargo, investigaciones han mostrado que el tiempo de fluorescencia de una molécula puede estar en el rango  $10^{-5} \sim 10^{-10}$  s [19].

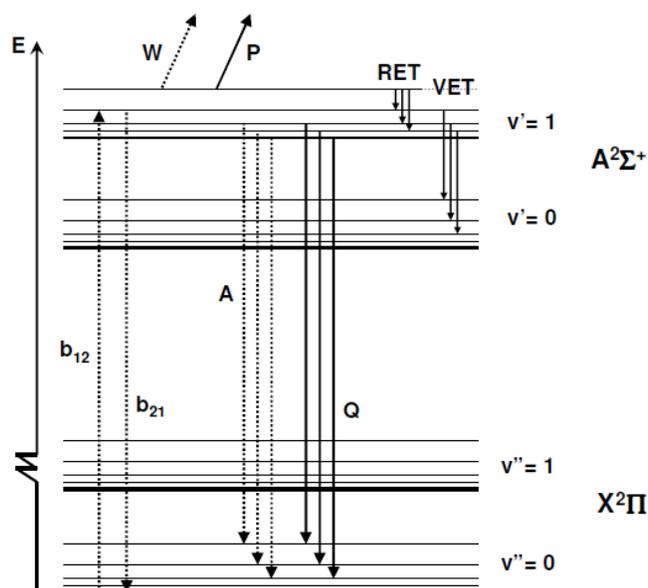
Comúnmente la detección de radicales OH se realiza con fluorescencia inducida por láser en la transición  $A^2\Sigma^+ \leftrightarrow X^2\Pi$ , la cual tiene lugar en el UV.  $X^2\Pi$  representa el estado fundamental o tierra (*ground*) y  $A^2\Sigma^+$  es el primer estado electrónico excitado de la molécula OH. En cada estado electrónico existe un número de niveles vibracionales ( $v'$  y  $v''$ ), en los cuales reside un número de niveles rotacionales ( $J$  y  $K$ ). En este trabajo se usa la fluorescencia *off-resonant*, la cual se detecta alrededor de 313 nm después de la excitación de los niveles vibracionales  $v'=1 \leftarrow v''=0$ , que tiene lugar alrededor de 282 nm. La ventaja de utilizar esta técnica es que con ella se reduce considerablemente la radiación de los alrededores generada por la dispersión de la luz del láser en los accesorios ópticos (lentes, filtros, etc.).



**Figura 2. Proceso de la fluorescencia.**

El mecanismo principal por el cual se da el proceso de des-excitación no radiante se conoce como *Enfriamiento Colisional*,  $Q$ , por lo tanto sólo una pequeña fracción de las moléculas excitadas contribuye a la señal de fluorescencia. Tal enfriamiento es fuertemente afectado por la temperatura ambiente, la composición molecular y la presión. En un sistema de combustión real, en el que hay por lo general una amplia gama tanto de temperaturas como de presiones, el enfriamiento colisional tiene un efecto importante en la señal de fluorescencia producida [20].

En la Figura 3 se presentan diferentes procesos posibles de transición entre el estado tierra ( $X^2\Pi$ ) y el primer estado excitado ( $A^2\Sigma^+$ ) del OH. Las líneas punteadas  $b_{12}$  y  $b_{21}$  simbolizan absorción y emisión estimulada, respectivamente,  $A$  es emisión espontánea,  $W$  fotoionización,  $P$  es predisiociación,  $RET$  y  $VET$  indican la energía rotacional y vibracional transferida, respectivamente.



**Figura 3.** Diagrama esquemático del nivel de energía de diferentes procesos posibles de transición entre el estado tierra ( $X^2\Pi$ ) y el primer estado excitado ( $A^2\Sigma^+$ ) del OH. Tomado de Jonsson [20].

Es importante destacar que el radical hidroxilo (OH) es una especie intermedia importante en cualquier llama que involucre el oxígeno y el hidrógeno, ya que el gradiente de la señal de LIF se usa comúnmente como un marcador del frente de llama, ya que esta especie naturalmente está presente en las llamas [21], de allí que se le dé el nombre de técnica OH-LIF. Otro aspecto a resaltar es que para llamas de premezcla pobres de  $H_2$ -aire, el tiempo que de vida del radical OH es de aproximadamente de 1 ms, mientras que en mezclas ricas el tiempo puede caer hasta 200 ns debido a su reacción con  $H_2$  para producir  $H_2O$  y un radical H [22]. Lo anterior se presenta con el fin de darle al lector un orden de magnitud del tiempo en que se da este fenómeno.

Para llevar a cabo las mediciones con la técnica OH-LIF es necesario realizar la calibración de un láser, por medio del cual un medio excitado puede ser devuelto a su estado fundamental emitiendo fotones (ondas de luz). En el proceso de emisión *LASER* (del inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), un fotón incidente en átomos excitados activos crea un fotón similar en términos de longitud de onda y fase cuando el átomo es disminuido a su estado de energía fundamental, tal como se describió anteriormente. El medio en el que se produce la emisión láser se conoce como el medio activo o medio amplificador [18].

Existen diferentes configuraciones de láser, sin embargo, en este estudio, el sistema utilizado cuenta un láser de estado sólido brilliant B que usa como medio Nd:YAG (*Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet*), marca Quantel, acoplado a un generador de segundo armónico que juntos operan a una frecuencia, una energía y longitud de onda de 10 Hz, 410 mJ y 532 nm, respectivamente. Este láser se usa para bombear un láser colorante *TDL* (*Tunable Dye Laser*) que utiliza como medio activo un colorante orgánico de estado líquido (*Rodamina 590 Chloride*) y que permite obtener un rayo láser con longitudes de ondas entre 278.5 y 284 nm, las cuales que pueden utilizarse para excitar radicales OH.

## 2.2 Efecto de la interacción de múltiples descargas de premezcla

En este trabajo uno de los aspectos teóricos fundamentales a abordar es la comprensión de los fenómenos que ocurren cuando se tiene una descarga de una llama de premezcla, en comparación con múltiples llamas de premezcla que se descargan a través de una determinada separación. Para hacerlo, en primer lugar se deben definir los dos términos más utilizados para medir las concentraciones de combustible y aire en una mezcla con respecto a las concentraciones ideales o estequiométricas. Estos se conocen como la tasa de aireación ( $n$ ) y su inverso, la relación de equivalencia ( $\phi$ ).

La tasa de aireación es la relación entre la cantidad de aire y la cantidad de combustible comparada con la relación estequiométrica, mientras que la relación de equivalencia es el inverso de la tasa de aireación. Si las relaciones se expresan en términos másicos éstas pueden expresarse de la siguiente manera:

$$n = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f(m_a)_{est}} \quad \text{Ec 1}$$

$$\phi = \frac{1}{n} \quad \text{Ec 2}$$

En donde  $\dot{m}_a$  y  $\dot{m}_f$  son los flujos másicos de aire y combustible, respectivamente,  $(m_a)_{est}$  es la masa de aire estequiométrica para que la combustión sea completa y está expresada en unidades de  $kg_{aire}/kg_{combustible}$ . Dependiendo del valor que tenga la relación de equivalencia (o tasa de aireación) pueden obtenerse llamas pobres, ricas o estequiométricas, con valores de  $\phi < 1$  ( $\lambda > 1$ ),  $\phi > 1$  ( $\lambda < 1$ ) y  $\phi = 1$  ( $\lambda = 1$ ), respectivamente [23].

Los conceptos anteriores son de gran ayuda para introducir dos tipos de llamas: llamas premezcladas y llamas no premezcladas. Las llamas premezcladas son aquellas que se obtienen cuando el combustible y el comburente se mezclan al interior del quemador antes del punto de la ignición, lo cual no sucede con las llamas no premezcladas, en las que el combustible y el comburente sólo se encuentran en la zona de reacción. En la Figura 4 se presenta la diferencia de la estructura entre una llama no premezclada (o de difusión) y una llama premezclada.

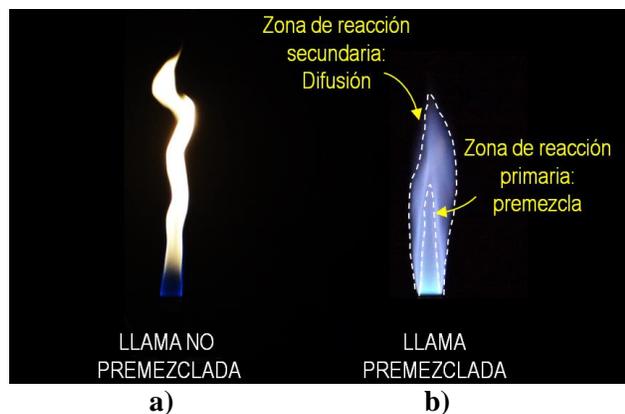
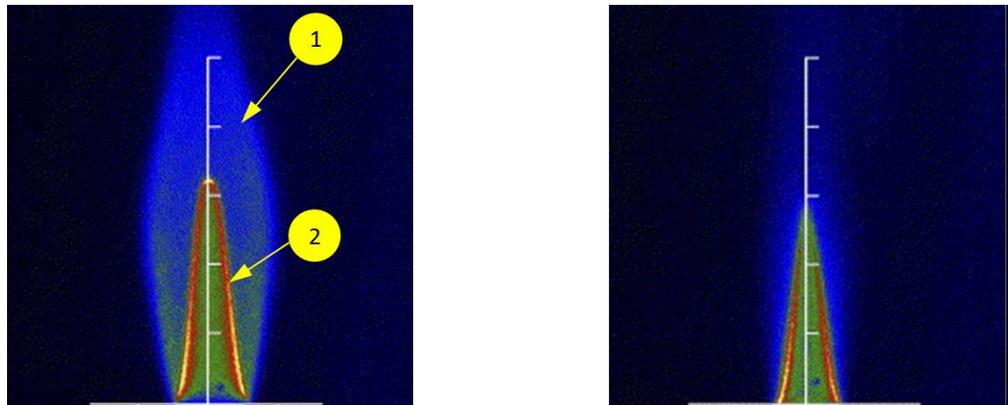


Figura 4. Tipos de llama: a) Llama no premezcladas, b) Llama premezclada. Tomada en el Laboratorio de Combustión del Grupo GASURE.

En quemadores tipo Bunsen, el combustible es descargado a través de un orificio ubicado en la parte inferior del cuerpo del quemador produciendo un arrastre de una determinada cantidad de aire de los alrededores conocida como aire primario, sin embargo, generalmente este aire no es suficiente para oxidar completamente el combustible y se requiere del aire de la atmósfera para completar la combustión a través de difusión molecular, de allí que se generen dos zonas de reacción como se muestra en la Figura 5a), obteniendo lo que se conoce como una llama de premezcla parcial (llamas ricas).

Un segundo caso es el que se conoce como llamas totalmente premezcladas, en las que la llama se genera con una cantidad de aire primario igual o mayor al requerido para oxidar por completo el combustible (llamas pobres o estequiométricas) tal como se observa en la Figura 5b). Una de las características es que la zona de difusión (cono azul externo) desaparece y quedando sólo el cono interno.



a) Llama parcialmente premezclada ( $n < 1$ ). 1) Zona de difusión, 2) Zona de premezcla.

b) Llama totalmente premezclada ( $n > 1$ )

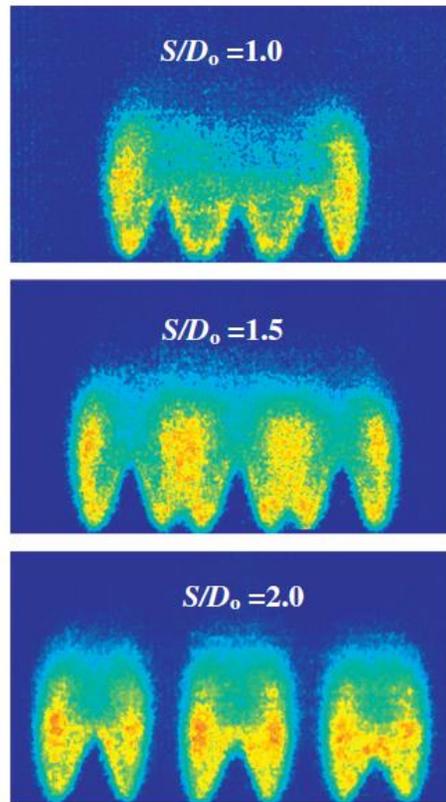
**Figura 5. Llamas de premezcla. Adaptada de [24].**

Debido a que en el presente trabajo se estudian llamas de premezcla que se estabilizan sobre una superficie porosa, es importante analizar qué efecto tiene la separación de los canales a través de los cuales se descarga la premezcla sobre la estabilidad de estas. Para esto, es de gran ayuda presentar los trabajos realizados por Makmool et al. [25,26] en los cuales se estudia el efecto de la separación de llamas de premezcla de GLP/aire en atmósfera libre de acuerdo a la relación  $S/D_o$  (Distancia centro-centro/Diámetro externo del quemador).

En el primer estudio [27] se analizaron diferentes relaciones de  $S/D_o$  como se observa en la Figura 6, encontrando que la combustión es inhibida para  $S/D_o = 1,0$  porque la estructura correspondiente de OH-PLIF muestra una señal relativamente débil en la región interior de las llamas. Por otra parte, la tasa de combustión parece ser mayor en  $S/D_o = 1,5$  ya que la señal OH-PLIF es más intensa dentro de las llamas, especialmente en la región de conexión entre las llamas adyacentes debido a que las capas exteriores de cada llama se fusionan para formar una gran zona de radicales OH. En  $S/D_o = 2,0$ , sin embargo, no se observan interacciones entre las llamas, es decir, se forma una estructura individual para cada llama.

En contraste con los otros casos, en  $S/D_o = 2,0$ , la interacción entre las llamas se vuelve débil y por lo tanto el precalentamiento y la recirculación de calor entre las llamas adyacentes puede no ser lo suficientemente fuerte como para mejorar la combustión de la llama central y por el contrario,

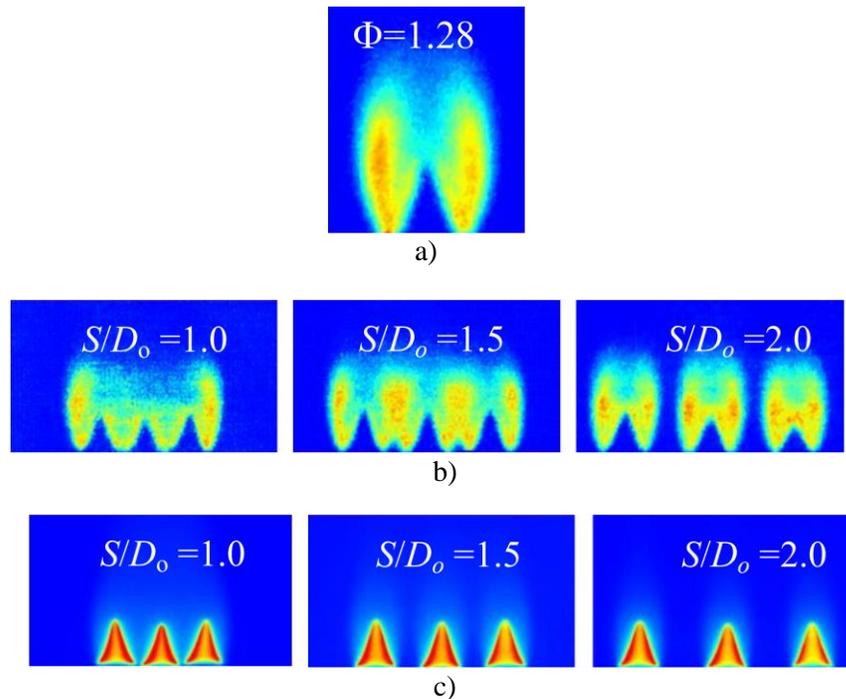
cada llama se quema libremente generando un fuerte arrastre del aire circundante, lo que podría perturbar la combustión y la dinámica de fluidos de las llamas.



**Figura 6. Efecto de la separación de llamas de premezcla GLP/aire en atmósfera libre. Tomado de [27].**

En su segundo estudio Makmool et al. [28] muestran que cuando existe una baja separación entre las llamas de premezcla, se produce una reducción de la longitud de la llama central. La Figura 7a) muestra la señal OH-PLIF para una llama libre en la atmósfera para una relación de equivalencia de  $\phi=1,28$  y en la Figura 7b) se muestran imágenes tomadas con la técnica OH-PLIF para diferentes relaciones  $S/D_0$  y la misma relación de equivalencia. En ellas se puede notar que para una separación de  $S/D_0=1,0$  la combustión se puede mejorar significativamente debido al intenso intercambio de calor y a las especies reactivas entre las llamas cercanas, resultando en una mayor reducción de la longitud del cono de premezcla en comparación con la llama sin interacción con otras.

Asimismo, en  $S/D_0=1,0$  debido a que se presenta una disminución relativa en la intensidad OH-PLIF, parece como si la oxidación a través de la distribución OH fuese inhibida, especialmente en la zona central de las múltiples llamas, lo cual puede ser un indicio de una combustión pobre o incompleta. Adicionalmente, la Figura 7c) muestra las intensidades de quimioluminiscencia para las mismas llamas, pero no se observan diferencias significativas en comparación con la señal proporcionada con la técnica OH-PLIF, sin embargo, en  $S/D_0=1,0$  la llama central presentó una intensidad de quimioluminiscencia ligeramente superior y con una longitud de cono ligeramente menor a las demás.



**Figura 7. Comparación de la estructura de una llama de premezcla GLP/aire en atmósfera libre con múltiples llamas de premezcla separadas por una distancia  $S$ . a) Llama sin interacción, b) Interacción de múltiples llamas de premezcla con la técnica OH-PLIF, c) Interacción de múltiples llamas de premezcla con quimioluminiscencia.  $\phi=1.28$ . Tomado de [28].**

En la Figura 8 se muestra el efecto de la relación  $S/D_0$  sobre la longitud del cono de múltiples llamas de premezcla ( $L_m$ ) y la longitud del cono de una llama de premezcla ( $L_s$ ). En ella se puede observar que a medida que aumenta la relación de equivalencia, la altura del cono de las múltiples llamas de premezcla son menores en comparación con la de la llama individual (es decir,  $L_m/L_s < 1$ ) debido a una mayor velocidad de combustión en las primeras. Las llamas más ricas tienen una interacción de llama más fuerte, es decir, donde se dio la reducción más grande en longitud de la llama, especialmente en  $S/D_0=1,0$ .

La reducción de la longitud de la llama se da por el fuerte efecto de auto-precalentamiento que se produce cuando las llamas se colocan cerca unas de las otras, mejorando la velocidad de combustión y reduciendo la longitud del cono central de premezcla. Asimismo, se debe tener en cuenta que la velocidad de deflagración laminar para mezclas GLP/aire obtiene su máximo en relaciones de equivalencia ricas y no en  $\phi=1,0$ .

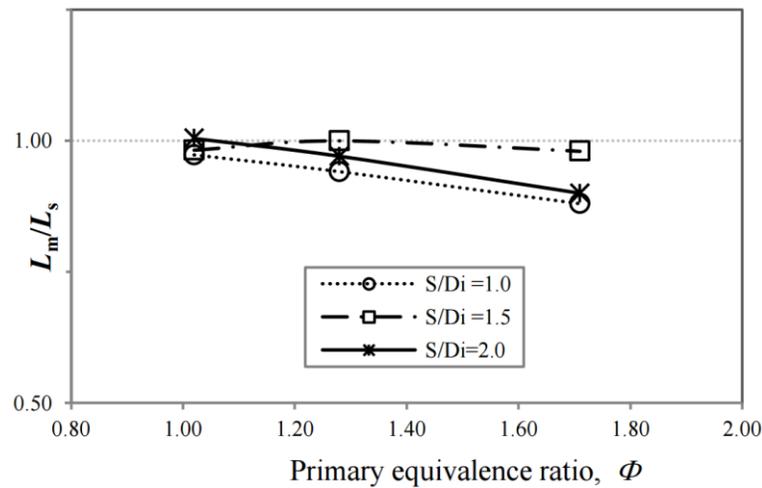


Figura 8. Efecto de  $S/D_0$  en la reducción de la longitud del cono de premezcla. Tomada de [28].

### 2.3 Velocidad de deflagración laminar

Considerando un régimen laminar, llama plana unidimensional, estacionaria y adiabática, la velocidad de deflagración laminar ( $S_L$ ) se define como la velocidad con la que se desplaza la zona de reacción o frente de llama desde la zona quemada hacia la zona sin quemar [29].

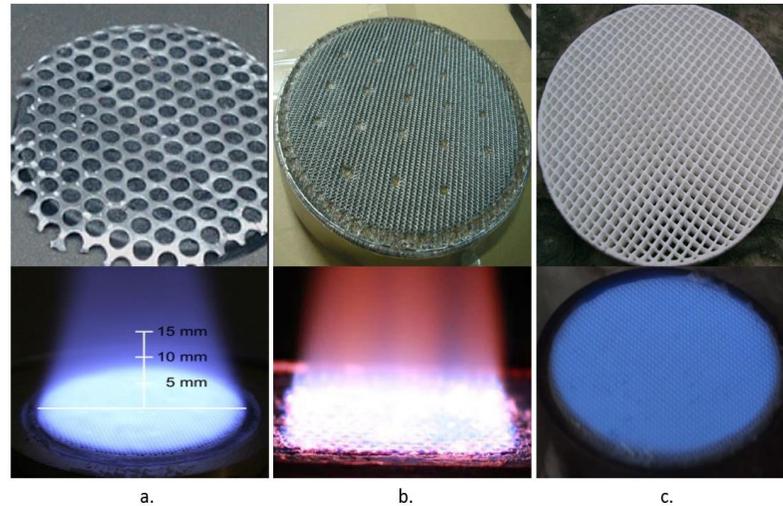
La definición anterior es solo una idealización, ya que una llama real se ve afectada por otros fenómenos tales como pérdidas de calor hacia las paredes, efecto de la capa límite en las regiones cercanas a las paredes, estiramiento del frente de llama (efecto termo-difusivo) e inestabilidades hidrodinámicas;  $S_L$  es una de las propiedades intrínsecas de mayor importancia de cualquier mezcla de combustibles que dependen tanto de la presión como de la temperatura, donde el aumento de temperatura de la premezcla y/o de la temperatura ambiente, aumenta la velocidad de combustión laminar, mientras que el aumento de la presión ambiente la disminuye, siendo más significativo el efecto de la temperatura. Asimismo,  $S_L$  depende de la composición del combustible [29], ya que al aumentar la cantidad de inertes, disminuye la velocidad de combustión laminar, donde el dióxido de carbono tiene un efecto muy significativo [30].

Finalmente, es importante resaltar que  $S_L$  es de gran importancia en el estudio de la estructura y estabilidad de llamas de premezcla, validación de mecanismos de reacción y es un punto de partida para el análisis de la combustión turbulenta en llamas premezcladas. En particular, para este trabajo de investigación, permite el análisis de fenómenos como extinción o retollamas en el rango de estabilidad del quemador de medio poroso.

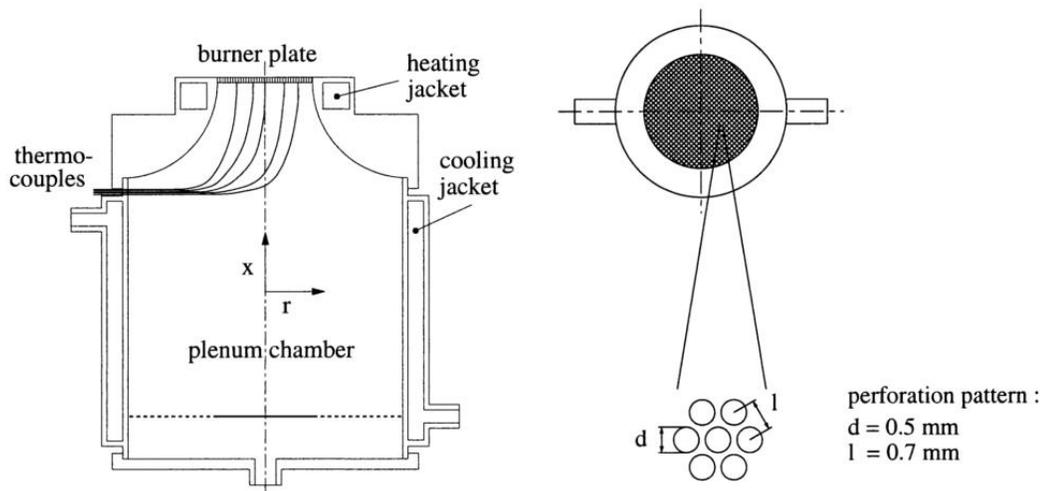
### 2.4 Quemadores de medios porosos inertes

En la actualidad existen dos tipos de quemadores que utilizan cerámicos, fibras metálicas o placas metálicas perforadas para estabilizar una reacción de premezcla, como se muestra en la Figura 9; ellos son los quemadores de combustión estabilizada en la superficie [31] o quemadores de superficie radiante (o combustión sumergida) [3]. El principio de funcionamiento de estos

quemadores es semejante al de los quemadores utilizados para determinar la velocidad de deflagración laminar por el método del flux de calor [32], como se muestra en la Figura 10, por lo que la relación entre la velocidad de descarga y la velocidad de deflagración son variables muy importantes en la operación de este tipo de quemadores.



**Figura 9. Quemadores de combustión estabilizada en la superficie. a. Placas metálicas, b. Fibras metálicas, c. Estructuras cerámicas: honeycomb. Tomado de [33]**



**Figura 10. Método del flux de calor para determinar la velocidad de deflagración laminar [32].**

Cuando se reduce la velocidad de salida de la premezcla de aire-combustible por debajo de la velocidad de deflagración, la llama se propaga aguas arriba hasta alcanzar la superficie del quemador en donde experimenta una pérdida de calor hacia el medio cerámico, disminuyendo su temperatura y por ende, la velocidad de deflagración. Como consecuencia, la velocidad de flujo y la velocidad de deflagración se equilibran obteniéndose una llama plana que se estabiliza en la superficie del quemador o algunas veces parcialmente dentro del quemador [33]. El enfriamiento de la llama es beneficioso porque se disminuyen las emisiones contaminantes, en especial las emisiones de  $\text{NO}_x$  térmico. Por otro lado, con esta tecnología se recircula el calor hacia la premezcla

no quemada, ya que la energía que se transfiere al material cerámico posteriormente se transfiere a la premezcla por convección y radiación.

En estos quemadores al igual que en los quemadores de premezcla convencionales, están sujetos a presentar inestabilidades como desprendimientos y retrollamas cuando la velocidad de deflagración laminar es menor y mayor, respectivamente, que la velocidad del flujo en la descarga [34]. Para evitar la propagación de la llama aguas arriba del quemador, problemas de seguridad y daños en los equipos de combustión, se han diseñado elementos llamados atrapa-llamas caracterizados por tener diámetros a partir de los cuales una llama no puede propagarse, gracias a un fenómeno al que se le conoce como “*quenching*” (enfriamiento) [35]; este fenómeno tiene un efecto térmico y otro cinético. En el primero, se transfiere calor de la llama hacia la pared (ley de Fourier) de tal forma que se pierde más energía que la que se genera por la combustión dándose la extinción de la llama, mientras que en el segundo, se da una acción inhibitoria debido a la destrucción de centros activos propagadores (radicales o especies intermedias) de la combustión, lo cual hace que en las zonas próximas a la pared no haya reacciones químicas, disminuyendo las tasas de progreso que tienen la forma Arrhenius (ver Ec 3), y que a su vez disminuyen las temperaturas, de tal forma que si la pérdida de calor es significativa las reacciones no continúan y se apaga la llama. El diámetro mínimo a partir del cual no hay propagación de una llama dentro de un ducto se conoce como diámetro crítico de enfriamiento y es con el cual se diseñan los atrapa-llamas (sistemas de seguridad) y bajo el cual se establecen los criterios para que las llamas de un quemador PIM se establezca en la superficie y no se apague.

$$R = AT^n e^{-Ea/(RuT)} [F][O] \quad \text{Ec 3}$$

Donde  $A$  es el coeficiente pre-exponencial,  $T$  es la temperatura,  $n$  el exponente de la temperatura y su valor depende del combustible,  $Ea$  es la energía de activación del combustible,  $Ru$  es la constante universal de gases,  $[F]$  es la concentración del combustible y  $[O]$  es la concentración del oxidante.

## 2.5 Estudios de la combustión en medios porosos

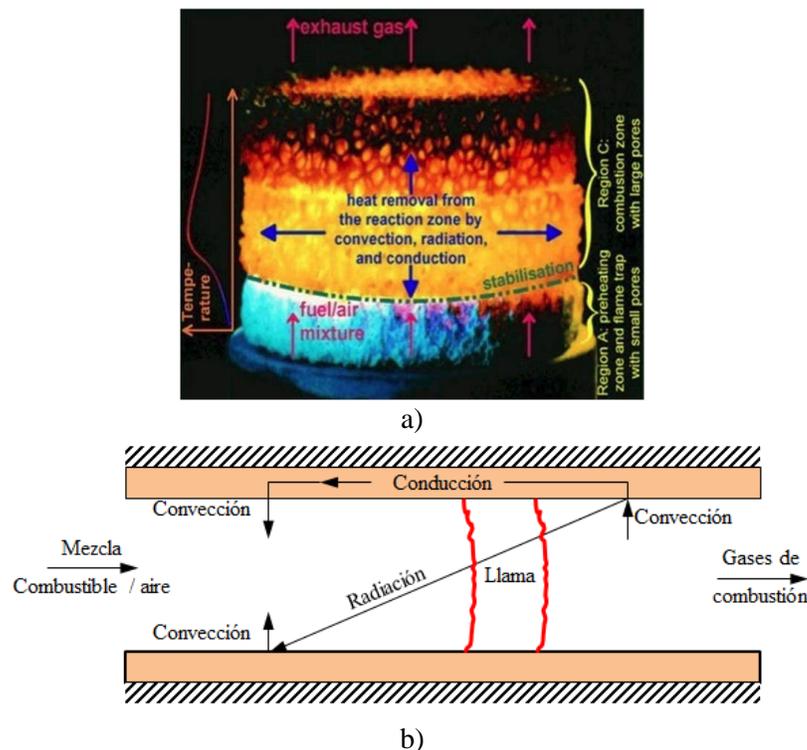
Para estudiar la combustión en medios porosos primero se debe caracterizar el medio poroso. Esto se hace de acuerdo a la cantidad de poros dada por el número de poros por unidad de longitud (centímetros-CPC o pulgadas-CPI), o por unidad de área (centímetros cuadrados-CPSC o pulgadas cuadradas-CPSI) y un segundo término relacionado con el tamaño de los poros, que se expresa en porcentaje de porosidad o, en otras palabras, porcentaje de área abierta.

Otra forma de caracterizar los medios porosos es por medio del rango de potencia específica en el cual operan, es decir, la potencia por unidad de área. Esta potencia puede variar desde 100 kW/m<sup>2</sup> hasta 2000 kW/m<sup>2</sup>, permitiendo tener grandes cantidades de energía en una zona más pequeña en comparación con quemadores convencionales [33], es decir, con el uso de los medios porosos es posible utilizar equipos de combustión más compactos en con respecto a los equipos convencionales.

Los estudios de la combustión en medios porosos han ido desde simulaciones numéricas [36,37] con el fin de modelar la fenomenología en este tipo de combustión, hasta análisis experimentales [7,38] para observar comportamientos de los parámetros característicos en esta tecnología (perfiles de temperatura, morfología de llama, emisiones contaminantes) y a su vez validar los modelos

utilizados en las simulaciones numéricas en las que se resuelven las ecuaciones de conservación de masa, momentum, energía y especies químicas [39].

El proceso de combustión dentro de los medios porosos es complejo porque requiere la solución de la transferencia de energía y la cinética química que ocurre localmente en el medio acoplado. El esquema general de la transferencia de calor en un medio poroso se muestra en la Figura 11 en donde se encuentran todas las formas de transferencia de calor (conducción, convección y radiación). Cuando la combustión es estabilizada en la superficie el modo de transferencia de calor que prevalece es la convección, caso contrario a la combustión sumergida en donde la radiación juega un papel más importante.



**Figura 11. Esquema de la transferencia de calor en un quemador PIM a) Esquema de la transferencia de calor en un medio poroso. Tomada de [3] y b) Dirección del flujo de calor en un medio poroso. Adaptada de [40].**

Cuando las llamas son estabilizadas en la superficie de los medios porosos, se deben tener en cuenta no sólo parámetros que den cuenta de la cinética química como la velocidad de deflagración laminar, sino también los fenómenos de enfriamiento con el fin de que la llama no se propague aguas arriba del medio poroso y se estabilice en la superficie. Se ha verificado que el fenómeno de enfriamiento depende de las dimensiones del poro del elemento estabilizador y de la velocidad de deflagración laminar, las cuales están relacionadas con el número de Peclet ( $Pe$ ). El número de Peclet es un número adimensional que compara la transferencia de calor por convección con la transferencia de calor por conducción; para altos números de Peclet el término de conducción se vuelve pequeño y predomina el efecto de la convección, mientras que para números de Peclet pequeños predomina el efecto de la conducción [41]. El número de Peclet del flujo se determina por medio de la siguiente expresión:

$$Pe = \frac{\rho_u c_p V_U l_c}{k} = \frac{V_U l_c}{D_T} \quad \text{Ec 4}$$

Donde  $\rho_u$ ,  $C_p$ ,  $V_U$ ,  $l_c$ ,  $k$  y  $D_T$  son la densidad, el calor específico, la velocidad del flujo, es la longitud características del poro, la conductividad y la difusividad térmica de los gases sin quemar, respectivamente. En el caso de cuerpos monolíticos o placas perforadas  $l_c$  es el diámetro hidráulico ( $d_h$ ) [42].

Para una llama laminar uni-dimensional, Zeldovich demostró que las condiciones críticas de extinción de la llama corresponden a un número de Peclet crítico ( $Pe_{cr}$ ) [33] que se calcula de la siguiente manera:

$$Pe_{cr} = \frac{S_L d_c}{D_T} \quad \text{Ec 5}$$

Donde  $d_c$  es el diámetro equivalente promedio de los espacios vacíos del material poroso. En la literatura, se encontró si  $Pe < Pe_{cr}$  la llama se estabilizará en la superficie del material poroso sin propagarse dentro del mismo, pero si  $Pe > Pe_{cr}$  la llama se propagará al interior del medio poroso [3]. Para el caso del metano la llama estará sobre la superficie del medio poroso si  $Pe < 30$ .

Algunos estudios relacionados con la combustión estabilizada en la superficie de un medio poroso se presentan a continuación.

Nakamura et al. [43] estudiaron numérica y experimentalmente, la combustión estabilizada sobre la superficie de una placa cerámica porosa (alumina-silicio), con una premezcla de metano/aire. Usaron dos placas con porosidad del 32%, diámetro de 103 mm y espesores de 5 mm/20 mm. Se encontró que la llama se estabiliza aguas abajo del quemador en una posición menor a 1 mm, pero su valor varía dependiendo de la relación de equivalencia y la potencia. Cuando la llama se aproxima a la superficie de la placa, la temperatura de la superficie de la placa aumenta y el calor es liberado por radiación. Esto permite que tanto la velocidad de deflagración como la temperatura de llama disminuyan, y como resultado, la llama se estabiliza en una posición donde la velocidad de deflagración se equilibra con la velocidad del flujo por encima de la superficie de la placa. También encontraron que a menor espesor de la placa, la temperatura de la superficie de ésta es menor, porque éste es enfriado por la premezcla fresca que se suministra aguas arriba.

Bouma y De Goey [15] también realizaron un estudio numérico de este tipo de combustión en medios porosos (superficie) con validación experimental. En el estudio se usó un medio poroso con porosidad del 85 % y con diámetros de poros del orden de 0.4 mm, haciendo que el fenómeno de retollama difícilmente se pueda dar. Los resultados numéricos de emisiones de CO, NO y temperaturas son predichos aceptablemente con respecto a los resultados experimentales. Encontraron que la radiación del gas es un fenómeno muy importante y que no debe despreciarse porque puede generar errores significativos, ya que si bien los efectos en la temperatura de llama son pequeños, en las emisiones de CO y NO pueden generar grandes diferencias, especialmente en las zonas más lejanas de la superficie del quemador.

Addamane et al. [16] estudiaron experimentalmente la combustión estabilizada sobre la superficie de un medio poroso, usando un quemador de premezcla parcial con aire atmosférico inducido por metano, con el fin de evaluar el rango de estabilidad. Los resultados muestran que con este tipo de quemador se tienen amplios rangos de operación estable. Además, las temperaturas del

medio poroso disminuyen cuando aumenta el flujo de combustible debido a que hay un mayor impacto de la convección sobre la conducción dentro del lecho poroso y, por ende, la profundidad de penetración de temperatura dentro del lecho se reduce con el aumento de la velocidad de flujo del combustible y del número de Peclet.

Zheng et al. [44] realizaron una investigación experimental utilizando un micro-combustor, con el fin de evaluar las características de la combustión y estabilidad de llama en la superficie de una pared porosa con llamas planas de metano/aire. En el sistema se utilizó una pared refrigerada con el fin de simular una carga real, la cual tiene un impacto importante sobre la estabilidad. En el estudio se encontró que cuando se incrementa el flujo de la premezcla, el espesor de la llama de metano/aire disminuye y luego vuelve a aumentar, mientras que la distancia entre la llama y la superficie porosa disminuye rápidamente, pero luego permanece constante. Además, a mayores velocidades de la premezcla y relaciones de equivalencia (con  $\phi < 1.0$ ) la llama se estabiliza en un espacio más pequeño, logrando así que el diseño de este tipo de quemadores sea más compacto.

## 2.6 Modelamiento de la combustión en medios porosos

El modelamiento de la combustión en medios porosos ha tenido grandes avances en los últimos años, sin embargo aún se requieren investigaciones que permitan desarrollar sistemas más eficientes y explicar con mayor certeza los fenómenos que ocurren en la combustión.

Con el fin de explicar el comportamiento de la naturaleza, el ser humano desarrolla modelos con los que es posible explicar un determinado fenómeno, pero muchos de estos modelos son simplificados debido a que es difícil modelar ciertos comportamientos. Por lo anterior, en muchas ocasiones deben realizarse ciertas suposiciones de tal manera que se puedan resolver los problemas y tener un buen acercamiento a la realidad.

En el modelamiento de la combustión en medios poros también se hacen una serie de suposiciones que permiten tener un modelo aproximado que puede explicar cómo va a darse el proceso de combustión, sin embargo, mientras menor cantidad de suposiciones, más exactas y cercanas a la realidad van a ser las soluciones.

Para modelar la combustión en medios porosos se asume que las propiedades termo-físicas del aire, tales como la densidad, conductividad térmica y calor específico son funciones de la temperatura. En general, puede asumirse que las propiedades de la fase sólida pueden ser constantes, pero no hay equilibrio térmico entre las fases gaseosas y sólidas. Por lo tanto, hay dos ecuaciones de energía para modelar el transporte de energía en el sistema. Se asume que la radiación gaseosa es despreciable en comparación con la radiación de la fase sólida [45], entre otras que se discutirán en la sección 2.6.1.

Con el fin de llevar a cabo la etapa de simulación numérica es posible seleccionar uno entre los diferentes programas de CFD disponibles actualmente como lo son *ANSYS-Fluent*, *CFX*, *Open Foam*, entre otros. Entre ellos, *ANSYS-Fluent* es un programa de CFD que tiene un amplio desarrollo en la simulación de la dinámica de flujos de fluidos y si bien no tiene una licencia gratuita, es un software que permite en un entorno amigable llevar a cabo los procesos de cómputo. Adicionalmente, de acuerdo a la revisión bibliográfica *ANSYS-Fluent* es ampliamente utilizado en estudios de combustión en medios porosos.

Lin et al. [46] estudiaron la combustión con baja concentración del metano (LCM, del inglés “Low-concentration methane”) en un quemador de medios porosos con sección divergente (DPMB, del inglés “Divergent Porous Medium Burner”) mediante el uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD) por medio del software *Fluent*. Los autores concluyen que el software predice correctamente las temperaturas dadas por el medio sólido.

Dai et al. [47] realizaron un estudio numérico para caracterizar la propagación de las ondas de combustión aguas arriba, e investigar los efectos de diferentes factores como lo son rango de operación con el metano, pérdida de calor a través de paredes, entre otros. El análisis permitió concluir que *Fluent* permite predecir con una buena aproximación el fenómeno de combustión.

Liu et al. [48] utilizaron el software *Fluent* para resolver un modelo matemático transitorio de dos dimensiones de la combustión en medios porosos, en este caso, en modo sumergido para evaluar diferentes parámetros característicos de la combustión y los perfiles de temperatura dentro del medio poroso. Los resultados muestran que los rangos de operación estable dados por la simulación numérica están acordes con los experimentos, al igual que los perfiles de temperatura.

Por lo anterior, se justifica el uso del software *ANSYS-Fluent* en el estudio numérico de este trabajo.

### 2.6.1 Suposiciones y limitaciones del modelo de medios porosos en *ANSYS-Fluent*

El modelo de medios porosos incorpora una resistencia inercial de flujo que se determina empíricamente en una región del modelo, definida como “porosa”. Básicamente, lo que realiza el modelo de medios porosos es adicionar un término de generación en la ecuación de conservación de momentum. Como consecuencia, deben conocerse las siguientes limitaciones y suposiciones que tiene el modelo:

- Debido a que la obstrucción del volumen presente físicamente no está representada en el modelo, *ANSYS-Fluent* por defecto utiliza y reporta una velocidad superficial dentro del medio poroso basada en el caudal volumétrico del flujo, esto con el fin de confirmar la continuidad de los vectores de velocidad a través de la interfaz del medio poroso. Sin embargo, la formulación de la velocidad superficial no tiene en cuenta la porosidad para calcular los términos de convección y difusión en las ecuaciones de transporte.
- Por la consideración anterior, se sugiere utilizar un método alternativo más preciso en el que se calcula la velocidad verdadera dentro del medio poroso, el cual se encuentra más detallado en la sección 2.6.2.
- El modelo de medios porosos de *ANSYS-Fluent*, asume porosidad isotrópica.
- Los términos de resistencia de momentum del medio porosos y de fuentes de calor se calculan por separado en cada fase. Ver ecuación de momentum para medios porosos en la sección 2.6.3.
- Siempre se utiliza un esquema de interpolación de presión único en el interior de las zonas de medios porosos, independientemente del esquema de presión seleccionado en el árbol de tareas “métodos de solución”.
- No se consideran interacciones entre el medio poroso y las ondas de choque.

- Se recomienda el método de Inicialización estándar para simulaciones de medios porosos. El método de inicialización híbrido (por defecto) no tiene en cuenta las propiedades de los medios porosos, y dependiendo de las condiciones de frontera puede producir un campo de velocidad inicial poco realista.

### 2.6.2 Modelamiento de medios porosos basado en la velocidad física

Para comprender por qué la modelación de los medios porosos se realiza con base a la velocidad física, primero es necesario presentar la ecuación para la velocidad superficial, expresada como:

$$\vec{v}_s = \gamma \vec{v} \quad \text{Ec 6}$$

Donde  $\gamma$  es la porosidad del medio, definida como la relación entre el volumen ocupado por el fluido y el volumen total,  $\vec{v}_s$  es la velocidad superficial y  $\vec{v}$  es la velocidad física.

La razón por la cual la velocidad superficial no se utiliza en la modelación de los medios porosos es porque los valores de la velocidad dentro de la región porosa son iguales a los de la región externa, lo cual no es cierto. Asimismo, la porosidad no se tiene en cuenta en los términos diferenciales de las ecuaciones de transporte, lo cual limita la precisión del modelo poroso en los casos donde debería presentarse un aumento de la velocidad del flujo al entrar en la región porosa, presentándose gradientes de velocidad muy importantes [49], lo cual puede afectar considerablemente los resultados numéricos.

Por otra parte, al modelar los medios porosos con la velocidad superficial, los resultados que arroja el modelo no son precisos cuando los gradientes son importantes. Para simulaciones numéricas más precisas de flujos en medios porosos, se hace necesario resolver la velocidad verdadera (o física) a lo largo del campo de flujo, en lugar de la velocidad superficial de manera que se pueda incluir la porosidad en todos los términos de las ecuaciones de transporte.

### 2.6.3 Ecuaciones de conservación

Con base a lo presentado en la sección 2.6.2, las ecuaciones a resolver para el modelamiento de un sistema de combustión en el que se utiliza un medio poroso, deben tener en cuenta el parámetro de la porosidad. Asumiendo un medio poroso inerte sin efectos catalíticos, flujo de una sola fase, interfaz fluido-sólido impermeable y radiación del gas despreciable, las ecuaciones de conservación para flujo reactivo incompresible, considerando efectos de combustión y transferencia de calor, y utilizando una notación vectorial, las ecuaciones pueden expresarse de la siguiente manera [50,51]:

$$\textit{Continuidad:} \quad \gamma \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \gamma \vec{v}) = 0 \quad \text{Ec 7}$$

$$\textit{Momentum:} \quad \gamma \rho_f \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \gamma \rho_f \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = -\gamma \nabla P + \gamma \mu \nabla^2 \vec{v} - (\nabla P)_p \quad \text{Ec 8}$$

$$\textit{Término fuente ecuación de momentum} \quad (\nabla P)_p = \left( \frac{\mu}{K_1} + \frac{\rho_f}{K_2} |\vec{v}_s| \right) \vec{v}_s \quad \text{Ec 9}$$

La ecuación de la energía para la fase sólida y la fase gaseosa que pasa a través del medio poroso se deben escribir por separado. Los efectos de la conducción, así como las interacciones convectivas con la fase de gas deben ser incluidos en la ecuación de energía en fase sólida, mientras que la radiación puede ser despreciada debido a la baja emisividad que tiene la zona de precalentamiento (medio poroso). La transferencia de calor convectiva con la fase sólida, la conducción, y los términos de liberación de energía química deben incluirse en la ecuación de la fase gaseosa [52].

$$\begin{aligned}
 \text{Energía de la fase} & \gamma \rho_f c_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \gamma \rho_f c_{p,f} \vec{v} \cdot \nabla T_f \\
 \text{gaseosa:} & = \gamma \nabla \cdot (k_f \cdot \nabla T_f) + h_v (T_s - T_f) - \gamma \sum_{k=1}^N \dot{\omega}_k M_k h_k
 \end{aligned} \tag{Ec 10}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Energía de la fase} & (1 - \gamma) \rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \gamma) \nabla \cdot (k_s \cdot \nabla T_s) - h_v (T_s - T_f) \\
 \text{sólida:} &
 \end{aligned} \tag{Ec 11}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Especies:} & \gamma \rho_f \frac{\partial Y_k}{\partial t} + \gamma \rho_f \vec{v} \cdot \nabla Y_k = \gamma \rho_f \nabla \cdot (D_{km} \cdot \nabla Y_k) + \gamma \dot{\omega}_k M_k
 \end{aligned} \tag{Ec 12}$$

En las ecuaciones anteriores  $\rho_f$  y  $\mu$  son la densidad y viscosidad dinámica (o absoluta) del fluido, respectivamente.  $(\nabla P)_p$  es el término fuente de la ecuación de momentum, el cual hace referencia a la caída de presión en el medio poroso.  $K_1$  y  $K_2$  son los coeficientes de permeabilidad y pérdidas inerciales, respectivamente. Los subíndices  $f$  y  $s$  hacen referencia al fluido (o gas) y sólido, respectivamente,  $c_p$  es el calor específico a presión constante,  $k$  es la conductividad térmica,  $T$  es la temperatura.  $\dot{\omega}_k$ ,  $Y_k$ ,  $M_k$  y  $h_k$  son la tasa de progreso molar, la fracción molar, peso molecular y entalpía total, de la  $k$ -ésima especie, respectivamente.  $N$  es el número de especies químicas totales y  $h_v$  es el coeficiente volumétrico de transferencia de calor.

El comportamiento y las características estructurales de los medios porosos han sido ampliamente estudiados [53–55], tal es el caso de la permeabilidad (propiedad del medio poroso) que puede variar en muchos órdenes de magnitud para distintos medios y se define como la capacidad que tiene un material poroso para permitir el paso de un fluido a través de él (tiene unidades de área [m<sup>2</sup>]). Las permeabilidades de los medios utilizados para los quemadores PIM son muy grandes debido a sus altas porosidades, lo cual trae como beneficio tener bajas caídas de presión a través de ellos.

Moreira y Coury [55] desarrollaron un modelo para determinar la permeabilidad de los medios porosos con una muy buena precisión con respecto a resultados experimentales para espumas cerámicas. Este modelo se caracteriza porque es posible determinar la permeabilidad con la información de las características geométricas del medio poroso y las propiedades del fluido que pasa a través de él. En el modelamiento numérico de los medios porosos la permeabilidad es una propiedad de vital importancia y para estimarla Moreira y Coury proponen la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta P}{L} = 1,275 \times 10^9 \frac{(1 - \gamma)^2}{\gamma^3} \frac{\mu v_s}{d_{poro}^{-0,05}} + 1,89 \times 10^4 \frac{(1 - \gamma)}{\gamma^3} \frac{\rho v_s^2}{d_{poro}^{-0,25}} \tag{Ec 13}$$

En la ecuación anterior,  $\Delta P$  es la caída de presión,  $L$  es la longitud del medio poroso,  $\mu$  y  $\rho$  son la viscosidad y densidad del fluido, respectivamente, y  $d_{poro}$  es el diámetro del poro.

La caída de presión  $\Delta P$  se divide en dos partes. La primera componente hace referencia a la caída de presión debido a las fuerzas viscosas y se calcula por medio de la ley de Darcy, mientras que la otra componente se debe a pérdidas inerciales. Estas componentes se determinan por medio de las ecuaciones 15 y 16 [56]:

$$\Delta P = \Delta P_{viscoso} + \Delta P_{inercial} \quad \text{Ec 14}$$

$$\Delta P_{viscoso} = C_{viscoso} \mu v_s \Delta x \quad \text{Ec 15}$$

$$\Delta P_{inercial} = \frac{\rho}{2} C_{inercial} v_s^2 \Delta x \quad \text{Ec 16}$$

En las ecuaciones anteriores  $\Delta P_{viscoso}$  y  $\Delta P_{inercial}$  son las caídas de presión debido a las fuerzas viscosas e inerciales, respectivamente,  $\Delta x$  es la longitud del elemento del canal,  $C_{viscoso}$  y  $C_{inercial}$  son las resistencias viscosa e inercial a lo largo del medio poroso.

Algunos estudios con medios porosos relacionados con la importancia tanto de la radiación, como el modelo de combustión, se presentan a continuación, sin embargo estos hacen referencia al modo de combustión sumergido en medios porosos, pero se pueden tomar como referencia para el trabajo presente.

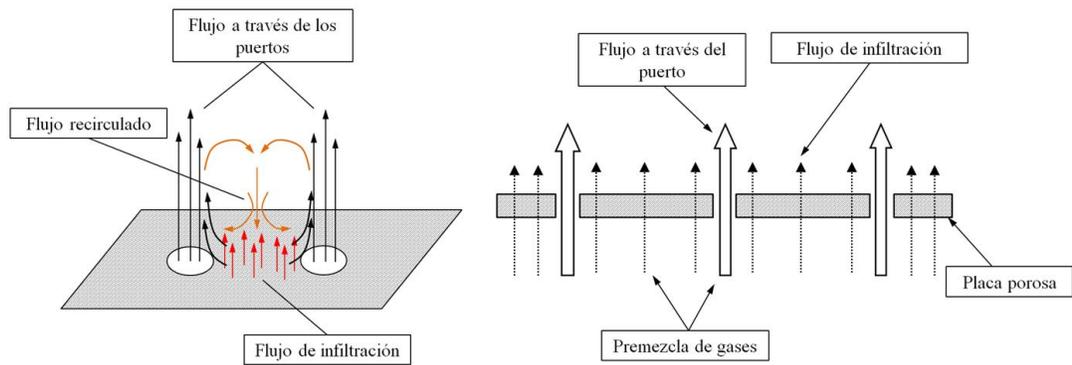
Diamantis et al. [57] realizaron estudios en medios porosos en flujo laminar en modo sumergido utilizando mecanismos cinéticos detallados y observaron que la solución final es sensible al modelo de radiación utilizado, lo cual puede conllevar complicaciones numéricas adicionales.

Por otro lado, Yarahmadi et al. [51] realizaron un estudio de la combustión en medios porosos (modo sumergido) tanto en régimen laminar como turbulento en una cámara de combustión (axisimétrico bidimensional) para analizar las diferencias entre los modelos en cuanto a las características de la combustión. Los autores encontraron que los resultados teniendo en cuenta la turbulencia arrojaban predicciones más satisfactorias que los modelos en régimen laminar, indicando la necesidad de implementar los modelos de turbulencia para la región de la combustión.

## 2.7 Flujos en medios confinados

En todo sistema de combustión que se encuentre confinado se presentan corrientes de recirculación, lo cual no ocurre en la combustión no confinada debido a que en las cámaras de combustión se generan presiones negativas que hacen que una fracción de los productos de combustión recirculen. Estas corrientes de recirculación pueden perturbar la estabilidad de la llama cuando ésta se estabiliza sobre la superficie del medio poroso [58]. Para caracterizar estas corrientes de recirculación Thring y Newby [59], Craya-Curtet [10] y Magnussen [9] desarrollaron diferentes parámetros teóricos de similitud de manera que fuera posible tener una aproximación a la fluido-dinámica de estas corrientes y poder optimizar los diseños de las cámaras de combustión.

Otro de los parámetros importantes en la combustión es la estabilización de las llamas en grandes potencias, ya que en ambientes, sean confinados o no, existen límites de operación bajo los cuales las llamas pueden extinguirse. Para solucionar estos inconvenientes es importante el desarrollo de mecanismos de estabilización de llamas con el fin de aumentar los rangos de operación. Uno de los métodos para estabilizar las llamas fue estudiado por Yahagi y Hase [60], el cual consiste en la estabilización de llamas utilizando un quemador poroso perforado, como el que se muestra en el esquema de la Figura 4; en este tipo de quemadores el flujo no sólo pasa a través de los puertos, sino también a través de las fibras (flujo infiltrado), lo cual ayuda a reducir la velocidad del flujo en los puertos. Adicionalmente, las llamas generadas con el flujo infiltrado ayudan a darles estabilidad a las llamas formadas en los puertos, mientras que las corrientes de recirculación generadas por el flujo de los puertos ayudan a mejorar la estabilidad de las llamas infiltradas.



**Figura 12. Flujo a través de un quemador poroso de placas perforadas. Adaptada de Yahagi y Hase [60].**

Por último, se ha encontrado que en la combustión se generan fenómenos acústicos a causa de fluctuaciones aleatorias de la tasa de liberación de calor y de la presión en la zona de combustión. Las llamas que son perfectamente laminares en un gas homogéneo son prácticamente silenciosas y por lo tanto, el ruido de una llama depende de la turbulencia de la corriente de gas y de las variaciones locales de la composición de la mezcla. Estos efectos acústicos no son deseados puesto que pueden causar daños en los equipos de combustión aumentando el nivel de riesgo tanto del equipo como del personal que esté operando el sistema. En la sección 2.7.3 se profundiza un poco acerca de este fenómeno.

### **2.7.1 Efecto del confinamiento en la formación de corrientes de recirculación que puedan afectar la zona de reacción.**

Al generarse corrientes de recirculación, una fracción de gases quemados puede entrar al frente de llama y diluirse con los gases de premezcla, lo cual disminuye la velocidad de deflagración laminar, tal como se evidencia en diferentes estudios en los que se analiza el efecto de gases inertes o el vapor de agua diluido con los gases de la premezcla combustible/aire.

Burbano et al. [30] encontraron al aumentar la dilución de  $N_2$  en la una premezcla equimolar  $H_2/CO$  se reduce considerablemente la velocidad de combustión laminar debido a una disminución de la tasa de la liberación de calor y el aumento de la capacidad calorífica, mientras que cuando la dilución se hace con  $CO_2$ , la velocidad de deflagración laminar disminuye en una mayor proporción

en comparación con la dilución con  $N_2$ , comportamiento que se atribuye a la mayor capacidad calorífica de los productos de la combustión y la disociación de  $CO_2$  durante la combustión.

Le Cong y Dagaut [61] realizaron un estudio en donde analizaron el efecto de la dilución del vapor de agua en una premezcla de metano/aire bajo las condiciones de un reactor agitado, encontrando que esta dilución disminuye la velocidad de deflagración laminar. El estudio también permitió identificar que la inhibición de la velocidad de deflagración laminar se debe principalmente a que la presencia de  $H_2O$  produce una reducción en la concentración de los principales radicales responsables del consumo del metano, en donde la reacción  $H_2O+O=2OH$  compite por los radicales  $O$  con la reacción  $CH_4+O=CH_3+OH$ , mientras que por otro lado la reacción de tercer cuerpo  $H+O_2+M=HO_2+M$  compite con  $CH_4+H=CH_3+H_2$  por los radicales  $H$  disminuyendo la tasa de consumo del  $CH_4$  en la presencia de vapor de agua. Por lo anterior, el incremento de la concentración de  $H_2O$  da como resultado bajas velocidades de deflagración, bajas temperaturas de llama adiabática y reduce la formación de óxidos nitrosos.

Chan et al. [62] realizaron un estudio sobre la influencia de la dilución de  $CO_2$  en una premezcla de  $CH_4$ /aire. Al igual que Burbano et al. [30], encontraron que la velocidad de deflagración laminar disminuye debido a que el aumento en la concentración de  $CO_2$  reduce las concentraciones de reactivos, disminuyendo la velocidad de reacción neta y por tanto la velocidad de combustión. Además, el  $CO_2$  actúa como un disipador de calor, causando una disminución en la temperatura en la zona de reacción reduciendo la capacidad de superar la energía de activación para que ocurran reacciones.

Por lo anterior, si se presentan fuertes corrientes de recirculación en la combustión estabilizada en la superficie de un medio poroso, es posible que los gases calientes a pesar de estar a altas temperaturas tengan un efecto importante en la velocidad de deflagración laminar y la disminuyan, aumentando la posibilidad de una extinción de llama.

En la Figura 13 se muestra un diagrama de la temperatura de un horno en función del factor de recirculación, el cual se determina mediante la expresión de la Ec 17. Este diagrama permite conocer órdenes de magnitud de los factores de recirculación, es decir, saber si valores se consideran altos o bajos. La región A corresponde a la región de la estabilidad de las llamas convencionales, las cuales son posibles en todo el rango de temperatura en la cámara de combustión. La región B representa una combustión inestable donde se pueden generar desprendimientos o apagados de llama. Finalmente, si la recirculación y temperatura son los suficientemente grandes, el combustible puede quemarse de la forma de combustión sin llama (región C). Cabe anotar también que este diagrama se construyó para llamas no premezcladas.

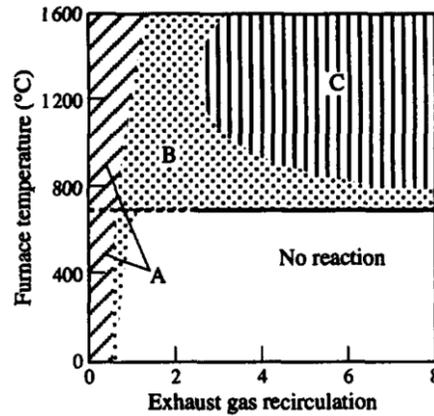


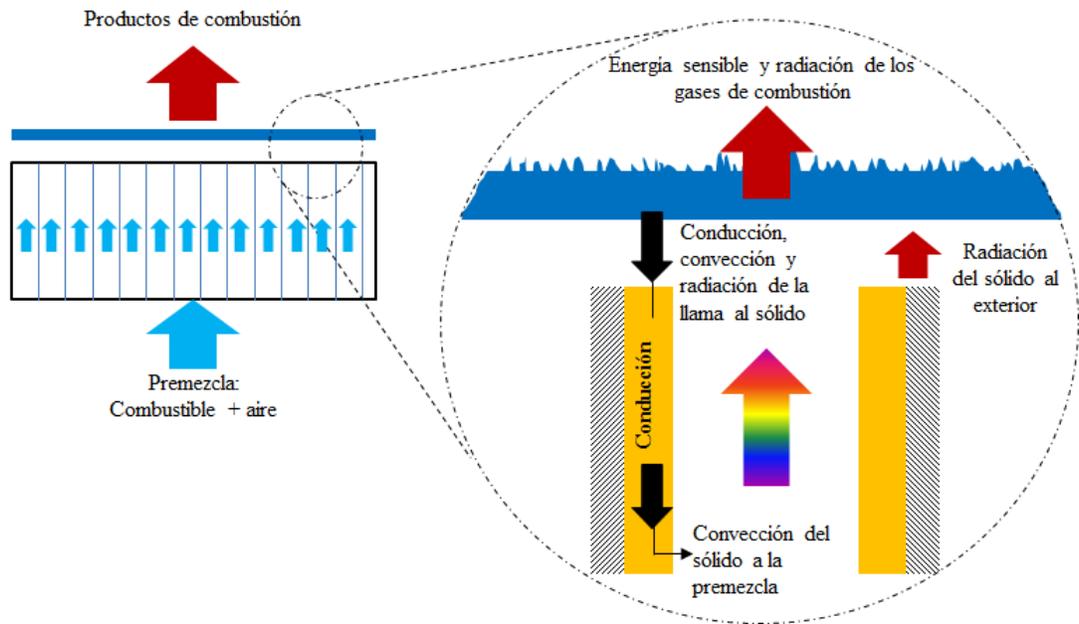
Figura 13. Límites de estabilidad. Tomado de J. A. Wüning and J. G. Wüning [63].

$$K_v = \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_f + \dot{m}_a} \quad \text{Ec 17}$$

En la ecuación anterior,  $\dot{m}_r$  es el flujo másico de gases de combustión recirculados,  $\dot{m}_f$  y  $\dot{m}_a$  son los flujos másicos de combustible y aire que entran al horno, respectivamente.

### 2.7.2 Extinción de llama y fenómeno de retrollama en medios porosos

Para abordar estos fenómenos, es importante tener claro cómo es la transferencia de calor del sistema, la cual se presenta la Figura 14 y donde se observa que la zona de reacción transfiere calor por convección y radiación a la superficie porosa, que a su vez por medio de conducción se calienta y precalienta los gases frescos de premezcla por convección. Por otro lado, el sólido transfiere calor por radiación desde la superficie a los alrededores, y los gases calientes (productos de combustión) transfieren calor por radiación y convección al ambiente y alrededores.



**Figura 14. Esquema de la transferencia de calor en el sistema.**

Como puede notarse la transferencia de calor en un medio poroso es compleja, especialmente cuando la transferencia de calor por radiación es importante.

Una vez aclarada la transferencia de calor en el sistema, es posible analizar el efecto de la temperatura sobre la velocidad de deflagración laminar. De acuerdo al esquema de la Figura 14 la premezcla es precalentada y cuando esto ocurre la velocidad de deflagración laminar incrementa, pero a su vez la llama sufre una pérdida de calor a través del medio sólido, de tal forma que  $S_L$  disminuye y posteriormente, la llama se estabiliza sobre la superficie porosa a causa del equilibrio con la velocidad del flujo de la premezcla. Sin embargo, pueden ocurrir varios casos; el primero, Figura 15a), la temperatura de precalentamiento aumenta de tal manera que la premezcla tiene una mayor temperatura y por lo tanto se incrementa considerablemente la velocidad de deflagración, generando el fenómeno de la retrollama; y el segundo caso, Figura 15b), en donde la llama pierde más calor del que genera en la zona de reacción y por lo tanto se produce el desprendimiento o extinción la llama como consecuencia del enfriamiento de la llama.



a)



b)

**Figura 15. Combustión inestable. a) Retrollama, b) Desprendimiento de llama. Fotografías tomadas en el Laboratorio de Combustión del Grupo GASURE.**

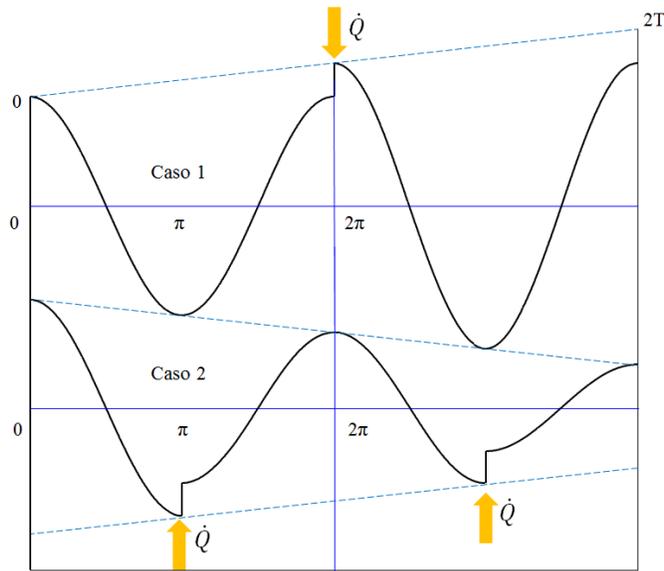
Por lo anterior, existen condiciones de operación en las que la llama puede ser estable o inestable, y esto depende de propiedades del medio poroso, tales como diámetros de poro, propiedades térmicas y la densidad de poros. Todas estas propiedades hacen que el medio poroso pueda ser evaluado u operado bajo ciertas condiciones de potencia específica y relación de equivalencia muy específicas con el fin de garantizar la seguridad y confiabilidad en su funcionamiento.

### 2.7.3 Fenómeno acústico en cámaras de combustión

Antes de examinar los fenómenos acústicos en sistemas de combustión, primero debe hacerse la pregunta, ¿qué es acústica? Lawrence et al. [64] en su libro *Fundamentals of Acoustics* definen la acústica como la ciencia que estudia la generación, transmisión y recepción de la energía como ondas vibracionales en la materia. El fenómeno acústico más familiar es el asociado con la sensación de sonido, lo cual no es más que los cambios sutiles y rápidos en la presión del aire y que son captados por el oído. La presión de sonido más baja que un oído medio (humano) puede detectar es de aproximadamente 0.00002 Pa, y el límite para el dolor es de aproximadamente 200 Pa.

Algunos conceptos importantes a tener en cuenta para el estudio de la acústica son la *Octava*, y los *tercios de Octava*. El primero se define como el “intervalo entre dos frecuencias cuya relación es 2. Es corriente medir en octavas el intervalo que separa dos frecuencias cualesquiera; para ello, basta hallar el logaritmo en base 2 de la relación de frecuencias”, mientras que el segundo es la “tercera parte de una banda de octava y grupo de frecuencias en torno a una banda central que cumplen la relación  $f_2 = 2^{1/3} \times f_1$ ” [65].

La acústica no es un fenómeno nuevo en el campo de la combustión. Lord Rayleigh desde el siglo XIX ya daba explicaciones acerca de la fenomenología en la generación del sonido en su más reconocido trabajo “*The theory of Sound*” [66]. De acuerdo a Rayleigh, si se tiene una onda de presión a la cual se adiciona calor en el punto de máxima presión, la amplitud de las oscilaciones aumenta (Caso 1), pero si se adiciona calor en el punto de mínima presión entonces la amplitud de las oscilaciones disminuye (Caso 2). Para ilustrarse, el lector puede remitirse a la Figura 16. Asimismo, si se remueve energía en el punto de mínima presión entonces la amplitud de las oscilaciones aumenta y si se remueve energía en el punto de máxima presión entonces la amplitud de las oscilaciones disminuye.



**Figura 16. Efecto de la adición de calor en los puntos de máxima o mínima amplitud de una onda de presión.**

Por lo tanto, una inestabilidad termo-acústica aparece cuando la tasa de liberación de calor de una llama está en fase con el campo de presión del flujo. Matemáticamente, el criterio de Rayleigh indica que la condición necesaria para que se presente la inestabilidad es que  $\int_V p' \dot{q}' dV > 0$ , donde  $p'$  y  $\dot{q}'$  son la fluctuación del campo de presión y de la tasa de liberación de calor, respectivamente, y  $V$  es el dominio del flujo.

Existen extensiones del criterio de Rayleigh, en donde éste se utiliza como término fuente  $S$  en la ecuación de la energía acústica la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} = S - D \tag{Ec 18}$$

En la ecuación anterior,  $E$  y  $F$ , designan la energía y flux acústico, respectivamente,  $S$  es el término fuente que bajo ciertas condiciones toma la forma que se muestra en la Ec 19, y  $D$  es la energía acústica disipada por unidad de volumen.

$$S = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\Gamma - 1}{\rho c^2} p' \dot{q}' dt \tag{Ec 19}$$

En la ecuación anterior,  $\Gamma = c_p/c_v$  es la relación de calores específicos,  $\rho$  es la densidad,  $T$  es el tiempo y  $c$  es la velocidad del sonido. El término fuente  $S$  será positivo y la amplitud de las oscilaciones incrementará si  $-\pi/2 < \phi < \pi/2$ , es decir, cuando la presión y liberación de calor inestable están en fase. Por otro lado, el término fuente será negativo y la amplitud de las oscilaciones disminuirá si  $-\pi/2 < \phi < 3\pi/2$ , es decir, cuando la presión y la liberación de calor inestable están fuera de fase [67].

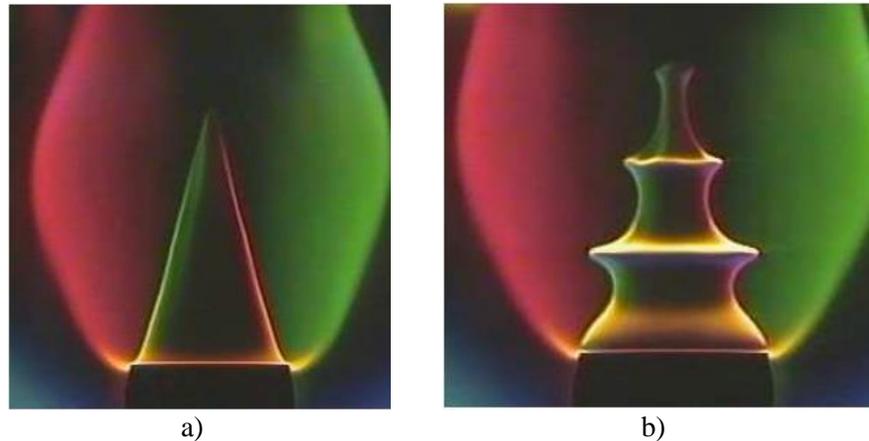
Si se integra el balance de energía local sobre el volumen  $V$ , se encuentra que la energía acústica incrementa si [68]:

$$\frac{\Gamma - 1}{\rho c^2} \cdot \frac{1}{T} \int_V \int_T p' \dot{q}' dV dt > \int_A \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dA + \int_V D dV \quad \text{Ec 20}$$

De acuerdo a la expresión anterior no basta con que la fluctuación del campo de presión y de la tasa de liberación de calor estén en fase, ya que si la energía acústica disipada es mayor que la energía acústica generada entonces el fenómeno termo-acústico se atenuará hasta desaparecer.

Experimentalmente, se han realizado investigaciones estudios que estudian cómo se afecta la morfología de la llama ante frecuencias de excitación. Schuller [69], por ejemplo, capturó imágenes con la técnica Schlieren de una llama con una frecuencia de excitación baja y otra alta, encontrando que a bajas frecuencias no se observan cambios en la morfología de la llama, pero cuando la frecuencia se incrementa se observa cómo la morfología de la llama cambia, tal como se observa en la Figura 17.

Para que el lector amplíe su comprensión acerca de este fenómeno, se le recomienda dirigirse al recurso multimedia en la web<sup>2</sup> en donde se presenta el experimento del tubo Rijke.



**Figura 17. Efecto de la frecuencia en las llamas. Imagen Schlieren  $\phi = 1.05$ , velocidad media de  $\bar{V} = 1.76$  m/s y amplitud de perturbación de la velocidad  $v_1 = 0.26$  m/s. a)  $f=10,5$  Hz, b)  $f=150,5$  Hz. Tomado de Schuller [70].**

Los fenómenos termo-acústicos en las llamas son indeseados, ya que éstos pueden llegar a generar daños en los equipos llevándolos a su destrucción afectando tanto la confiabilidad de los equipos como la seguridad de los usuarios.

Un tubo de longitud  $L$ , con un lado abierto y el otro cerrado, toma el nombre de “tubo de cuarto de onda” (quarter wave tube), ya que la frecuencia propia de la onda es igual a  $f = \frac{(2n+1)}{4} \times \frac{c}{L}$ , donde  $c$  es la velocidad del sonido y  $n$  puede tomar valores de números enteros. Su nombre se debe a que cuando  $n = 0 \rightarrow L = \frac{c}{4f} = \frac{\lambda}{4}$ , es decir, la longitud del tubo contiene en su interior un cuarto de la longitud de onda del flujo.

<sup>2</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=XUFBXXtGloE>

## 2.8 Mediciones experimentales en quemadores de PIM

Un aspecto muy importante en la investigación de la combustión en PIM son las técnicas e instrumentos de medición con los que se caracterizan los quemadores. Para esta caracterización se deben medir los flujos de aire y combustible, los perfiles de temperatura dentro del material poroso y las emisiones contaminantes.

Para la medición del perfil de temperatura dentro del material poroso y de la cámara de combustión, generalmente, se utilizan técnicas intrusivas por medio de la inserción de termopares dentro del material poroso en donde los tipos de más utilizados son el tipo S y tipo K. Estos termopares van conectados a una unidad de adquisición de datos en línea que permite determinar si se ha llegado al estado estable. Los termopares tipo S se utilizan cuando se desea registrar la temperatura dentro del material poroso cuando la combustión es sumergida debido a que es una zona de temperaturas muy altas, mientras que en la zona de precalentamiento basta con los termopares tipo K [7].

Las emisiones contaminantes se toman en chimenea por medio de una sonda que lleva los gases hacia un analizador de gases. Para una mayor precisión en la medición de las emisiones contaminantes, generalmente se utiliza el principio de funcionamiento de infrarrojos no dispersivos para la detección del  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}$ ; para el  $\text{O}_2$  se utiliza el paramagnetismo y para las emisiones de  $\text{NO}_x$  la quimioluminiscencia [71].

Adicionalmente, para la caracterización de los quemadores PIM es fundamental el control de la potencia y la tasa de aireación, por lo tanto se utilizan medidores de flujo másico o rotámetros calibrados que permitan mantener constantes estos parámetros durante la fase experimental.

Otra de las variables a controlar y que es fundamental en estos estudios son los materiales porosos. Habitualmente se utilizan espumas, bolas o fibras cerámicas fabricadas de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), alúmina estabilizada con itrio (YZA, del inglés Yttria Stabilised Alumina), zirconio parcialmente estabilizado (PSZ, del inglés Partially Stabilised Zirconia) o carburo de silicio con silicio infiltrado ( $\text{SiSiC}$ ) [7,38,71]. La densidad de poro se establece dependiendo de los requerimientos de operación; para el caso de la combustión sumergida la densidad de poro para la zona de combustión es de aproximadamente 10 poros por pulgada (ppi, del inglés pores per inches), mientras que para la de precalentamiento es de 40 ppi debido a que se debe garantizar que la llama no se propague dentro de la zona de precalentamiento y se estabilice en la superficie de éste, lo cual requiere de diámetros de poro menores, es decir, mayor densidad de poros.

Para el procedimiento experimental el quemador PIM se enciende aguas abajo, en donde la llama se propaga aguas arriba hasta estabilizarse en la superficie o dentro del medio poroso, dependiendo de la tipo de medio poroso que se esté utilizando [71]. La estabilidad a una condición de operación dada se determina mediante el monitoreo del comportamiento del perfil de temperatura hasta que éste permanezca constante por un poco más de 5 minutos en donde las variaciones de las temperaturas sean menores a 15 K durante ese tiempo [71]. Una vez se alcanza la estabilidad se toman los datos experimentales durante 10 minutos.

# Metodología

# 3

En este capítulo se presenta de manera detallada cómo se abordaron las diferentes actividades para el cumplimiento de los objetivos planteados.

Inicialmente, se presentan los criterios para la selección del material poroso, posteriormente se presenta de forma detallada cuál fue la metodología implementada para llevar a cabo el modelamiento y simulación numérica del sistema desde la definición de la geometría, mallado y criterios de convergencia, hasta las suposiciones y modelos seleccionados para obtener la convergencia.

Luego, se presenta de forma específica la metodología para llevar a cabo la fase experimental en donde se determina el rango de operación, perfiles de temperatura, emisiones contaminantes y morfología de llama, siendo esta última de especial interés, ya que se realiza mediante diagnóstico óptico de la combustión.

Finalmente, se muestra la metodología para determinar el nivel de sonido cuando se presentan inestabilidades termo-acústicas.

### 3.1 Selección del material poroso

La zona de precalentamiento (medio poroso) debe cumplir la función de transferir el calor desde la zona de combustión a la mezcla fresca de combustible-aire, razón por la cual el material seleccionado debe cumplir los siguientes aspectos:

- El material debe tener una baja conductividad térmica, evitando que la temperatura del material aguas arriba alcance valores de temperatura de autoignición y ocurra el fenómeno de retrollama.
- El material debe tener una alta resistencia al choque térmico, debido a la gran diferencia de temperatura que se presenta entre la superficie aguas abajo donde se tiene contacto con la zona de combustión (zona sometida a altas temperaturas) y la superficie aguas arriba en donde se encuentra la entrada de la premezcla fresca que estará sometida a temperaturas relativamente bajas.
- El material debe garantizar resistencia a altas temperaturas.

Bajo estas consideraciones, dentro de los materiales más usados en los medios porosos está la alúmina, óxido de aluminio, y el zirconio. Sin embargo, considerando el alto coeficiente de expansión térmica del zirconio y que los óxidos de aluminio se han utilizado en el diseño de equipos de alta eficiencia, en el presente trabajo se usa alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [3,31,72,73]. La ventaja de este material es la alta durabilidad y resistencia a la corrosión, además de la posibilidad de usar combustión con regeneración de calor para precalentar los reactivos, permitiendo ampliar los intervalos de inflamabilidad y disminuir las emisiones de CO e hidrocarburos sin quemar.

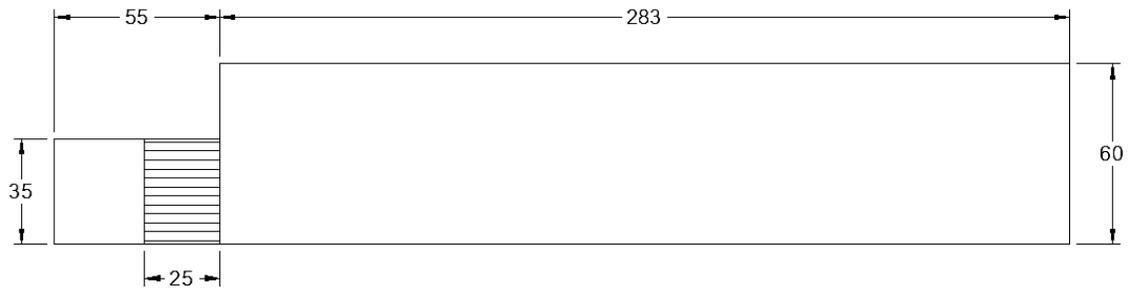
### 3.2 Metodología del modelamiento y simulación numérica

En el presente trabajo se utilizó la simulación computacional de flujos de fluidos como herramienta para predecir el comportamiento de la combustión estabilizada en la superficie de medios porosos, con el fin de realizar tanto una validación como verificación de los resultados experimentales y comprobar la capacidad de predicción de estas herramientas.

Las ecuaciones descritas en la sección 2.6 se implementaron en el software *ANSYS-Fluent* para un dominio computacional 2D axisimétrico para el modo combustión en la superficie. En esta sección se describe la metodología utilizada para determinar y modelar algunos de los términos mencionados en la sección 2.6, no sin antes introducir la geometría y parámetros de mallado utilizados. Debe aclararse que el sistema de combustión simulado no tiene en cuenta que la cámara de combustión usada en la experimentación es de sección cuadrada (como se presentará más adelante en la sección 3.3), debido a que en las simulaciones se usa la condición de axisimetría. Lo anterior, se debe a que se realizaron simulaciones en 3D y se compararon con las 2D, y se observó que no había diferencias significativas, pero en cambio, el tiempo computacional es considerablemente menor al utilizar el mallado 2D.

### 3.2.1 Geometría y mallado

En la Figura 18 se presentan las dimensiones del sistema a simular y en donde se observa que el medio poroso tiene una longitud de 25 mm, al igual que en el estudio realizado por Arrieta [33], quien encontró que el aumento en la longitud del medio poroso disminuye la eficiencia térmica del equipo y si bien no será evaluada, es un parámetro de diseño importante a tener en cuenta.



**Figura 18. Dimensiones de la geometría mallada (medidas en mm).**

Se generó un mallado estructurado con una relación de aspecto (Aspect Ratio) de 2.22 y una oblicuidad equiangular (o Equiangle skew) máxima de  $1,31064 \times 10^{-100}$ , parámetros que hacen referencia a la calidad del mallado. Por un lado, la relación de aspecto es la relación entre el lado más largo y el lado más corto en una celda, mientras que el equiangle skew es una medida de qué tan oblicuos son los ángulos de las celdas con respecto al valor ideal ( $60^\circ$  para tetraedros y  $90^\circ$  para hexaedros) y se determina mediante la expresión de la Ec 21.

$$\text{Equiangle Skew} = \max \left[ \frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{180 - \theta_e} \right] \quad \text{Ec 21}$$

En donde  $\theta_{max}$  y  $\theta_{min}$  son los ángulos más grande y más pequeño en una celda o cara, respectivamente, y  $\theta_e$  es el ángulo para una cara o celda equiangular, es decir,  $60^\circ$  para un triángulo y  $90^\circ$  para un cuadrado.

Cuando se realizan simulaciones de flujos de fluidos con combustión se recomienda que el Aspect Ratio  $< 8$  y Equiangle skew  $< 0.85$  con el fin de obtener buenos resultados y buena convergencia. Las condiciones de frontera y mallado se presentan en la Figura 19.

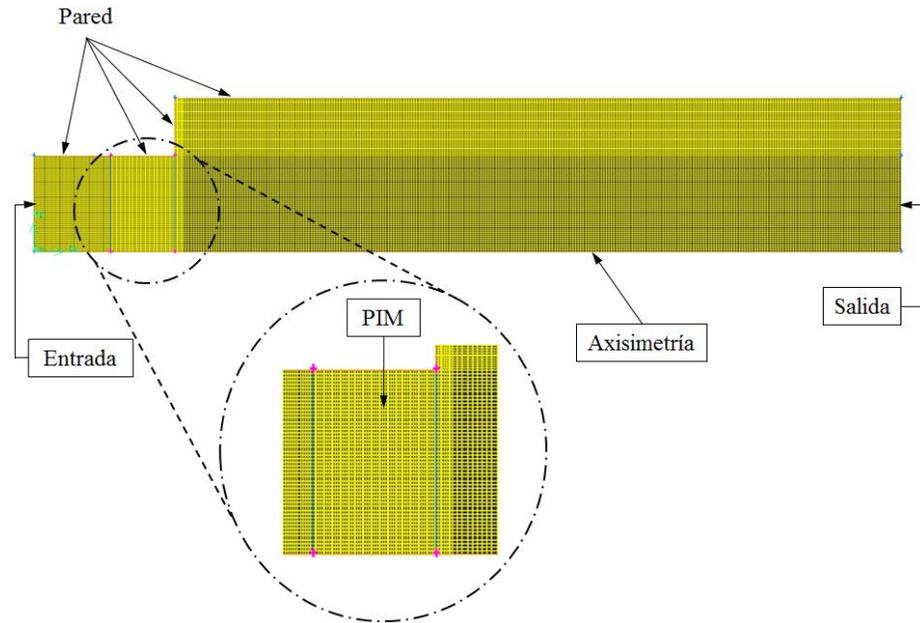


Figura 19. Mallado y condiciones de frontera.

### 3.2.2 Propiedades de la fase sólida y gaseosa

#### 3.2.2.1 Fase sólida

Para llevar a cabo las simulaciones numéricas es muy importante conocer las propiedades térmicas tanto de la fase sólida como de la gaseosa, ya que estas son las que permitirán obtener resultados más cercanos a la realidad.

Las propiedades de la fase sólida, como la conductividad térmica y el calor específico a presión constante del PIM, fueron modeladas a través de UDF's (ver Anexo 1), quedando en función de la temperatura de acuerdo a expresiones encontradas en las referencias [74] y [75].

Se introdujo un término fuente a la ecuación de la energía de la fase sólida mediante una UDF que corresponde a la radiación de una superficie de la forma  $Q_{rad} = e\sigma A(T^4 - T_{alr}^4)$ , donde  $e$  es la emisividad de la superficie,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.670\ 367 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ),  $A$  es el área de la sección transversal de la superficie,  $T$  es la temperatura de la superficie y  $T_{alr}$  es la temperatura de los alrededores. Por ende, la ecuación de la energía de la fase sólida queda definida de la siguiente manera:

$$\text{Energía de la fase sólida:} \quad (1 - \gamma)\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \gamma)\nabla \cdot (k_s \cdot \nabla T_s) - h_v(T_s - T_f) + Q_{rad} \quad \text{Ec 22}$$

En la Tabla 1 se listan los parámetros geométricos y propiedades físicas del medio poroso utilizado para llevar a cabo las simulaciones numéricas.

Tabla 1. Parámetros del PIM utilizados en las simulaciones.

Símbolo	Característica	Descripción	Unidad
	Material	Alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	
$\gamma$	Porosidad*	0.62	
$PPI$	Poros por pulgada*	18	
	Diámetro externo	70	mm
$L$	Espesor**	25	mm
$d_p$	Diámetro hidráulico de poro promedio	1.0**	mm
$A_{fs}$	Densidad de área superficial	1856**	1/m
$C_2$	Factor de resistencia inercial**	9250.6	1/m
$1/\alpha$	Factor de resistencia viscosa**	1.82x10 <sup>7</sup>	1/m <sup>2</sup>
$\rho_s$	Densidad	510	kg/m <sup>3</sup>

\* Información suministrados por el fabricante.  
\*\* Información evaluada experimentalmente.

### 3.2.2.2 Fase gaseosa

En la literatura se encuentran diferentes mecanismos cinéticos que predicen con muy buena precisión el proceso de oxidación del metano. Este es el caso del Gri Mech 3.0 [76] que cuenta con 53 especies químicas y 325 reacciones elementales o el mecanismo de San Diego [77] con 50 especies químicas y 235 reacciones elementales. Sin embargo, estos mecanismos al ser acoplados con software CFD hacen que el tiempo computacional se incremente considerablemente debido a que se debe resolver una ecuación adicional por cada especie que contenga el mecanismo.

Por lo anterior, se han desarrollado mecanismos cinéticos simplificados (menos especies y reacciones elementales) que arrojan buenos resultados, como es el caso del mecanismo DMR19 [78] que posee 19 especies (+ N<sub>2</sub>, Ar) y 84 reacciones elementales. Con base a esto, se selecciona el mecanismo DMR19 para llevar a cabo las simulaciones numéricas.

### 3.2.3 Determinación de los factores de resistencia viscosa ( $1/\alpha$ ) e inercial ( $C_2$ )

Para modelar el problema se requiere incorporar una resistencia al flujo en las regiones del dominio computacional que corresponden a un medio poroso. Esta resistencia se determinada empíricamente y se adiciona como un término fuente en la ecuación de conservación de momento (Ec 9).

El término fuente anteriormente mencionado, es función del factor de resistencia viscosa  $1/\alpha$  y de resistencia inercial  $C_2$ . Para determinarlos, se realiza un procedimiento experimental que permite construir la curva que se observa en la Figura 20. En esta figura, se presenta en el eje de las abscisas la velocidad del flujo antes de entrar al medio poroso, la cual se determina con la medición del caudal de gas con un rotámetro calibrado y dividiéndolo por el área transversal del medio poroso; en el eje de las ordenadas se presenta la caída de presión del flujo cuando atraviesa el medio poroso mediante la utilización de un manómetro diferencial. Una vez construida la curva, se determina la ecuación cuadrática que mejor se ajuste a la curva experimental.

En este caso la ecuación que mejor se ajusta, utilizando un honeycomb es:

$$\nabla p = 141.65u^2 + 8.1301u \quad \text{Ec 23}$$

Una forma simple para escribir la caída de presión en la ecuación de momento, es la siguiente:

$$\Delta p = \left( \frac{\mu u}{\alpha} + \frac{1}{2} C_2 \rho_g u^2 \right) L \quad \text{Ec 24}$$

Donde  $L$  es el espesor del medio poroso. Por lo tanto, al comparar la Ec 23 (honeycomb) con la Ec 24 se pueden obtener los siguientes coeficientes de la curva:

$$8.1301u = \left( \frac{\mu L}{\alpha} \right) u \quad \text{Ec 25}$$

$$141.65u^2 = \left( \frac{1}{2} C_2 \rho_g L \right) u^2 \quad \text{Ec 26}$$

Así, para el honeycomb o zona de precalentamiento se obtiene que  $C_2 = 9250.6 \text{ m}^{-1}$  y  $1/\alpha = 1.82 \times 10^7 \text{ m}^{-2}$ .

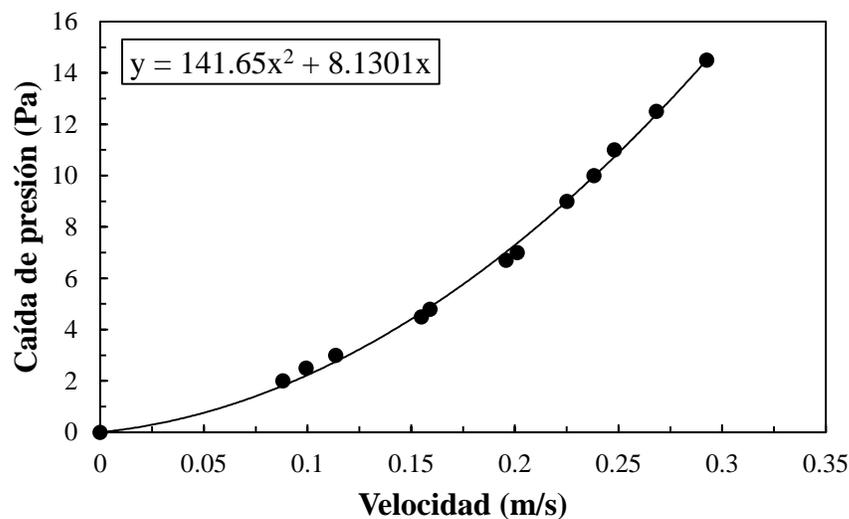


Figura 20. Curva experimental para determinar  $1/\alpha$  y  $C_2$ .

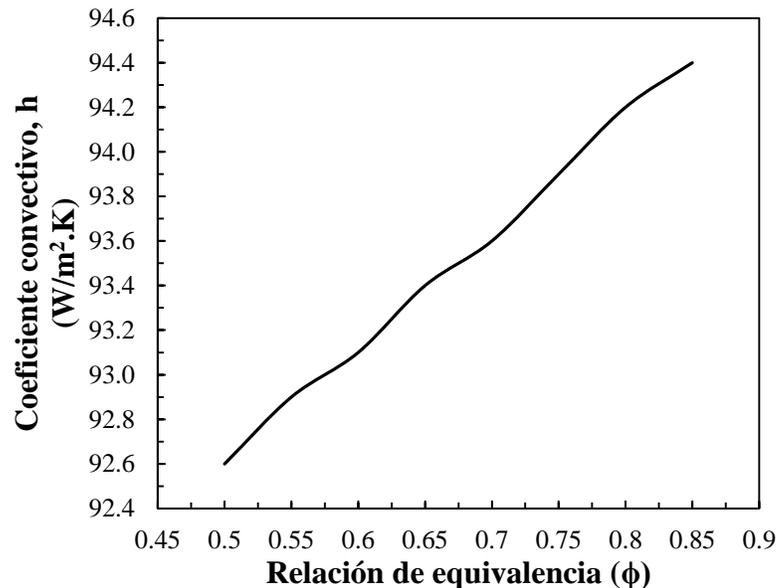
Los valores determinados anteriormente se ingresan en *ANSYS-Fluent* activando la casilla “Zona Porosa” (Porous Zone) en la dirección  $x$ . Para la dirección  $y$  se toma como base el trabajo de Kishore et al. [79] en el cual para una placa perforada se toma un valor de  $1.0 \times 10^3$  veces el valor de la dirección en  $x$ . Para este trabajo se tomó  $1.0 \times 10^4$  para ser más conservadores.

### 3.2.4 Coeficiente convectivo de transferencia de calor en el medio poroso

Uno de los parámetros más importantes en la modelación de los medios porosos es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, ya que éste determinará qué tanto se calentará la fase sólida y gaseosa. Para el cálculo de este parámetro se utilizó la expresión de la Ec 27 [80], expresión para determinar el coeficiente convectivo de transferencia de calor para materiales tipo honeycomb.

$$h = \left\{ 3.61 + \frac{0.0668(D_h/L)Re.Pr}{1 + 0.04[(D_h/L)Re.Pr]^{2/3}} \right\} \frac{k_g}{D_h} \quad \text{Ec 27}$$

En la ecuación anterior,  $D_h$  es el diámetro hidráulico de cada canal del honeycomb,  $L$  la longitud del medio poroso,  $Re$  el número de Reynolds,  $Pr$  es el número de Prandtl y  $k_g$  la conductividad del gas, que en este caso es una premezcla. Este coeficiente fue calculado para cada una de las simulaciones de acuerdo a la relación de equivalencia y la potencia específica, obteniendo la siguiente curva.



**Figura 21.** Curva del coeficiente convectivo de transferencia de calor en función de la relación de equivalencia.

Si bien la diferencia no es muy grande al pasar de  $\phi=0.50$  a  $\phi=0.85$  (1.9 %), se ingresaron los datos exactos en cada simulación. Por otro lado, el efecto de la variación de la potencia específica supera el 0.855 % en el rango estudiado, por lo cual el coeficiente convectivo de transferencia de calor se asume igual para una relación de equivalencia fija y diferentes potencias específicas.

### 3.2.5 Solucionadores

En *ANSYS-Fluent* se pueden utilizar dos tipos de solucionadores como lo son el Pressure-Based y el Density-Based.

En el Pressure-Based el campo de presión es extraído resolviendo una ecuación de corrección de la presión. La ecuación de la presión se deriva de la continuidad y las ecuaciones de momento de tal manera que el campo de velocidad, corregida por la presión, satisface la continuidad. Existen dos maneras de solucionar el problema:

- Segregado: se usa un algoritmo donde las ecuaciones son resueltas secuencialmente, y por ello es más eficiente en consumo de memoria. La convergencia es relativamente lenta. *ANSYS-Fluent* ofrece cuatro tipos de algoritmos segregados: SIMPLE, SIMPLEC y PISO. Para cálculos de estado estable por lo general se usa el SIMPLE o SIMPLEC, mientras que para simulaciones en estado transitorio se recomienda PISO.
- Acoplado: se resuelve un sistema de ecuaciones acoplado (momentum y continuidad), las ecuaciones restantes son resueltas de forma desacoplada. La convergencia es más rápida, pero requiere de 1.5 a 2 veces más memoria.

Para ver el diagrama de flujo de cómo funcionan estos solucionadores ver Anexo 2.

Existe otro solucionador conocido como Density-based, sin embargo no se profundizará en él, ya que no es compatible con la formulación de la velocidad física para medios porosos [56], lo cual de acuerdo a lo expuesto en la sección 2.6.2, la formulación de la velocidad física permite tener en cuenta la porosidad en las ecuaciones diferenciales de conservación y se pueden obtener resultados más precisos.

Con base en todo lo anterior se selecciona el algoritmo *Pressure-based Coupled*, porque es posible obtener la convergencia más rápidamente en comparación con el algoritmo segregado.

### 3.2.6 Esquemas de discretización

Los esquemas de discretización (o métodos de interpolación) hacen referencia a que los campos de las variables (almacenados en el centro de las celdas) deben interpolarse en las caras de los volúmenes de control. Existen diferentes esquemas de discretización que permiten solucionar las ecuaciones de transporte que gobiernan los fenómenos que se desean simular.

Para llevar a cabo las simulaciones, inicialmente se utilizan los esquemas “*First Order Upwind*” para las ecuaciones de momentum, energía, especies, mientras que para la ecuación de presión se utiliza el esquema “*PRESTO!*”. Una vez se obtiene un buen comportamiento de los residuales y monitores de las variables de interés, se incrementan los esquemas a “*Second Order Upwind*”, mientras que el algoritmo “*PRESTO!*” se mantiene para la presión dado que es el recomendado cuando se simulan medios porosos [56]. En la sección 3.2.8 (Criterios de convergencia) se muestra en mayor detalle la metodología en el uso de los esquemas de discretización.

### 3.2.7 Selección del modelo de combustión

*ANSYS-Fluent* puede modelar el mezclado y transporte de especies químicas mediante la resolución de ecuaciones de conservación que describen la convección, difusión, y las fuentes de reacción para cada una de las especies que las componen. Este software permite el modelamiento de múltiples reacciones químicas simultáneas, con reacciones que ocurren en la fase “bulk” (reacciones volumétricas) y/o en la pared o en la superficie de partículas.

El modelo seleccionado es el “*Laminar Finite-Rate*”, ya que ignora los efectos de las fluctuaciones debidas a la turbulencia. Este modelo calcula el término fuente de la ecuación de conservación de especies químicas mediante el uso de la forma Arrhenius y es el más apropiado para casos en los que se tienen llamas laminares. No es apropiado para casos en los que hay turbulencia por la alta no linealidad de la cinética química de la forma Arrhenius.

Otra de las razones por las cuales se seleccionó este modelo de combustión es el criterio del número de Reynolds, el cual se redefine en medios porosos y tiene valores diferentes, tal como lo reportaron Yarahmadi et al. [51] en donde la transición al flujo turbulento comienza en valores de Reynolds en el poro de 80 y es completamente turbulento cuando el Reynolds es igual o mayor a 120. En este estudio el número de Reynolds más grande, en el rango de estudio, fue de 32.

El modelo laminar es aceptable para combustión con química relativamente lenta y pequeñas fluctuaciones de turbulencia tales como llamas supersónicas. Para mayor detalle de este modelo de combustión dirigirse al Anexo 3.

### 3.2.8 Criterios de convergencia

Existen diferentes criterios bajo los cuales se puede establecer si las simulaciones numéricas han convergido o no. Sin embargo, en este trabajo se definió como criterio de convergencia que los residuales de la ecuación de continuidad y de energía fueran menores a  $10^{-5}$  y  $10^{-7}$ , respectivamente.

Otro de los criterios de convergencia utilizados fueron los balances de masa y energía en los que se establece convergencia si el error en estos balances es menor al 3%. Adicionalmente, se verificó la independencia del mallado evaluando el perfil de temperatura tanto del sólido como del gas en la zona porosa, tal como se presentará en la sección 3.2.8.1, y con el monitoreo del valor promedio de la velocidad de los gases a lo largo de la línea de simetría.

Para obtener convergencia se utilizó la metodología recomendada en la literatura, la cual consiste en resolver inicialmente las ecuaciones del flujo, luego la energía y por último las especies químicas, con el fin de evitar problemas de convergencia en las soluciones iniciales y tener resultados un poco más rápidos.

Adicionalmente, se debe hacer un análisis acerca de los solucionadores más adecuados para resolver el problema. Tener claro lo anterior puede ayudar a obtener un resultado confiable y rápido. En la Tabla 2 se muestra cuáles fueron los esquemas de discretización y factores de relajación utilizados para lograr la convergencia.

Tabla 2. Metodología para obtener convergencia en las simulaciones numéricas.

Parámetros de solución		Cálculo						
		1	2	3	4	5	6	7
Esquemas de discretización espaciales	Presión	PRESTO!						
	Momentum	First Order Upwind	First Order Upwind	Second Order Upwind	Second Order Upwind			
	Energía			First Order Upwind				
	Especies			First Order Upwind				
Factores de relajación	Momentum	0.5						
	Especies	0.8		0.9	1.0			
	Energía	0.8		0.9	1.0			
	Presión	0.5						
	Densidad	1.0						
	Fuerzas de cuerpo	1.0						
	Flow Courant Number	200						
Combustión		NO						SI

Para iniciar el proceso de combustión es necesario un “parche” de temperatura el cual se realiza una vez termina el proceso de cálculo número 1. El parche consiste en indicar en el dominio de cálculo, que la zona aguas abajo del honeycomb se encuentra a 2000 K, y se activa el modelo de combustión, en este caso el “*Laminar finite rate*”. Este proceso se realiza para todas y cada una de las simulaciones numéricas.

En la Figura 22 se muestra un diagrama de flujo en donde se observa la metodología utilizada para obtener la convergencia de las simulaciones.

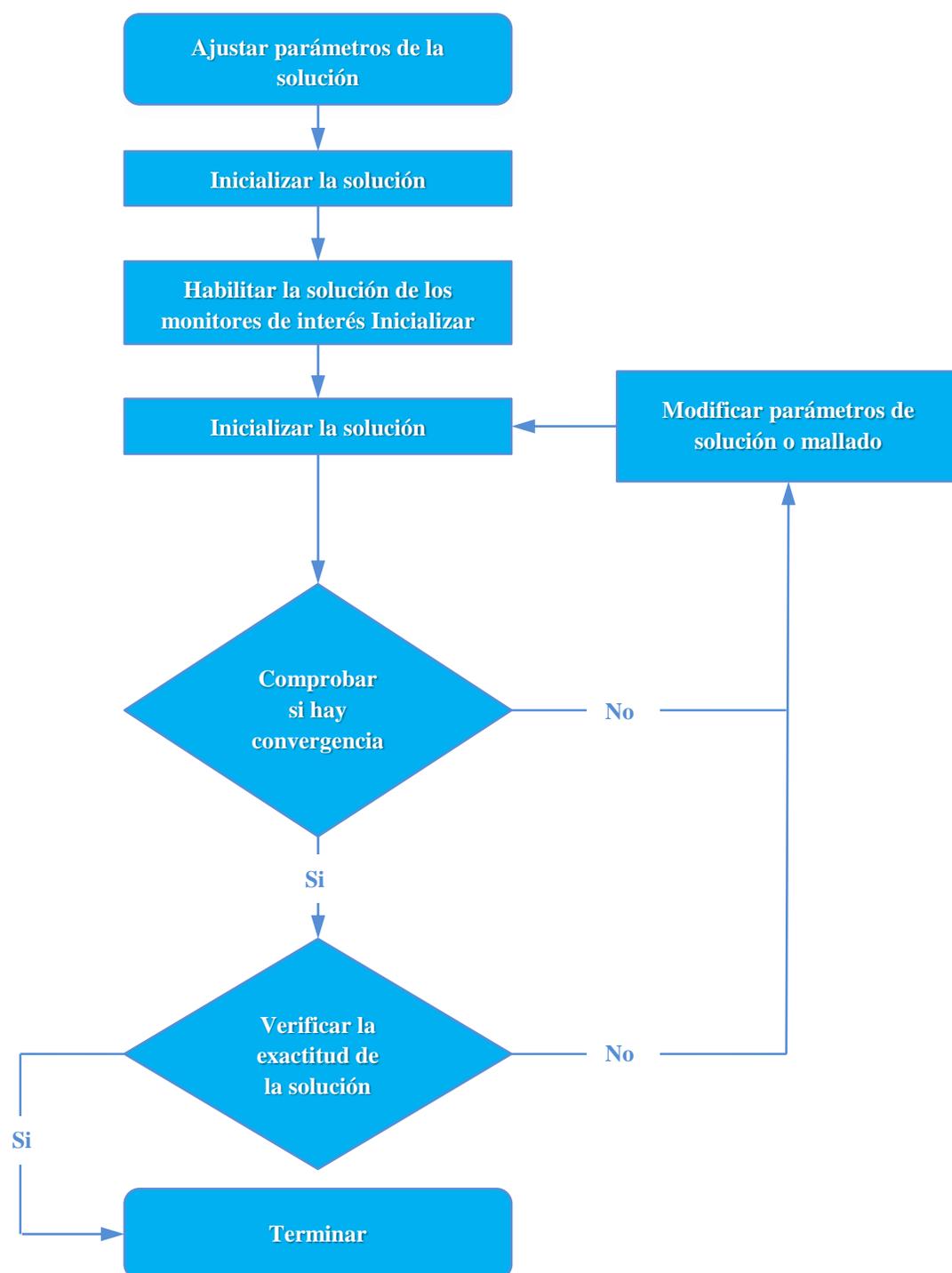


Figura 22. Metodología de convergencia y exactitud para la solución final de la simulación numérica.

### 3.2.8.1 Independencia del mallado

Para validar las simulaciones numéricas es necesario corroborar que los resultados no son dependientes del mallado. Para ello se generaron tres mallados, uno con 37,800 (treinta y siete mil ochocientas) celdas, otro más refinado con 151,200 (ciento cincuenta y un mil doscientas) celdas y finalmente uno con 218,160 (doscientas diez y ocho mil ciento sesenta celdas). El procedimiento para evaluar la independencia del mallado fue evaluar una propiedad crítica, que en este caso es la temperatura, ya que dependiendo de esta las se pueden obtener diferentes resultados, especialmente en la zona donde está ubicado el medio poroso. En la Figura 23 se muestra que con 151,200 celdas se obtiene un resultado casi idéntico al mallado de 218,160 celdas, con un error del 2 % en la región donde se presenta la mayor desviación. Con base a lo anterior, se concluye que los resultados son independientes del mallado realizado y se selecciona el mallado de 151,200 celdas, que permite disminuir considerablemente el tiempo computacional en comparación con el de 218,160 celdas.

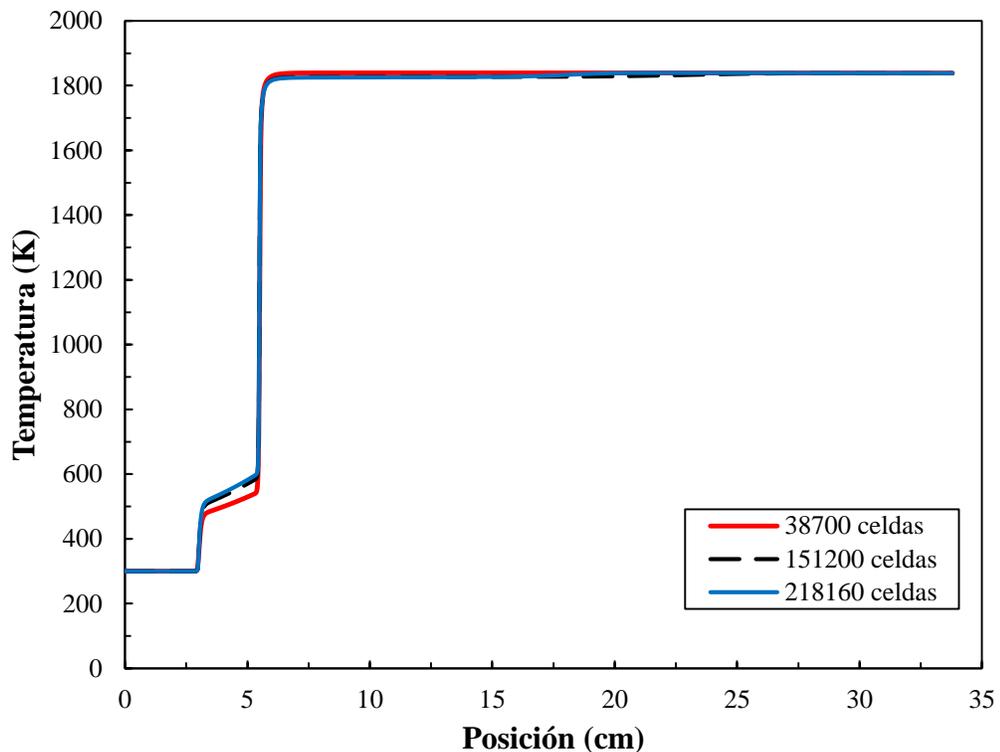


Figura 23. Independencia de mallado para 37.800, 151.200 y 218.160 celdas.

Las simulaciones numéricas que incluyen combustión generalmente presentan dificultades para obtener una solución convergente, ya que las reacciones químicas conducen a una gran liberación de calor y cambios fuertes de densidad y grandes aceleraciones en el flujo. En el software *ANSYS-Fluent* cuando se tienen reacciones muy rápidas (la escala del tiempo de la reacción es mucho más rápida que el tiempo de escala de la convección y difusión), la solución de las ecuaciones de transporte de especies se vuelve numéricamente difícil de resolver [56]. A tales sistemas se les da el nombre de sistemas “*stiff*” (difíciles), de allí el nombre del solucionador del modelo de combustión seleccionado “*Stiff chemistry solver*”, el cual permite resolver un poco más rápido las ecuaciones

mediante la técnica de tabulación adaptativa in situ (In Situ Adaptive Tabulation, ISAT). Para mayor información del algoritmo ISAT ver Anexo 3.

### 3.3 Metodología experimental

Para llevar a cabo los diferentes análisis y cumplir con los objetivos de este trabajo se plantean tres experimentos a partir de los cuales es posible determinar el rango de estabilidad (zona de combustión estable), los perfiles de temperatura al interior del medio poroso, la morfología de llama y las emisiones contaminantes.

El primer diseño de experimentos tiene como objetivo determinar la zona de combustión estable, entendiéndose por combustión estable como las condiciones bajo las cuales, a una determinada relación de equivalencia y potencia específica, no se presenta el fenómeno de extinción, retróllamas o zonas de inestabilidades termo-acústicas. En estas últimas si bien se puede obtener una llama estable sobre la superficie del medio poroso, el sonido generado puede conllevar a problemas de seguridad en los sistemas de combustión y, por lo tanto, se considera como una condición de operación no deseada, sin embargo, desde que sea posible, se toman los datos experimentales. Este primer diseño de experimentos tiene como objetivo determinar el rango de estabilidad, el perfil de temperatura al interior del medio poroso y emisiones contaminantes.

Con los resultados anteriores se procede a la segunda fase de la experimentación que consiste en que una vez conocida la zona de operación segura, se realiza la evaluación de la morfología de la llama mediante la técnica OH-PLIF. Por último, se realiza un montaje adicional con el fin de determinar la intensidad del sonido generado cuando se presentan inestabilidades termo-acústicas.

El tamaño de la muestra fue calculado con la ayuda del *software R* en donde se hizo un análisis de potencia para la temperatura. Para ello, se tomaron datos experimentales obtenidos en el Grupo GASURE en medios porosos con el fin de determinar el valor de *delta* (diferencia entre medias) para dos factores que en este caso son potencia específica y relación de equivalencia. El procedimiento implementado para determinar las medias fue fijar una potencia específica y determinar el promedio de la temperatura al interior del medio poroso para diferentes relaciones de equivalencia. El mismo procedimiento se realiza fijando la relación de equivalencia, y se restan los resultados de estas medias, dando como resultado el valor de *delta*. El código utilizado para determinar el tamaño de la muestra es el siguiente:

```
power.t.test(power = 0.9,  
            sig.level = 0.05,  
            delta = 5.8325,  
            type="two.sample",  
            alternative="two.sided")
```

Donde *power* es la potencia o la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando la hipótesis alternativa es verdadera, es decir, la probabilidad de rechazar de manera correcta una hipótesis nula falsa y sirve para medir la capacidad de una prueba para detectar diferencias; *type* es el tipo de prueba que en este caso es de dos muestras (potencia específica y relación de equivalencia); y *alternative* indica que los tratamientos pueden tener desviaciones del parámetro estimado en cualquier dirección desde un valor de referencia. El resultado de este análisis se muestra a continuación:

```
Two-sample t test power calculation
```

```
n = 2.1412
delta = 5.8325
sd = 1
sig.level = 0.05
power = 0.9
alternative = two.sided
```

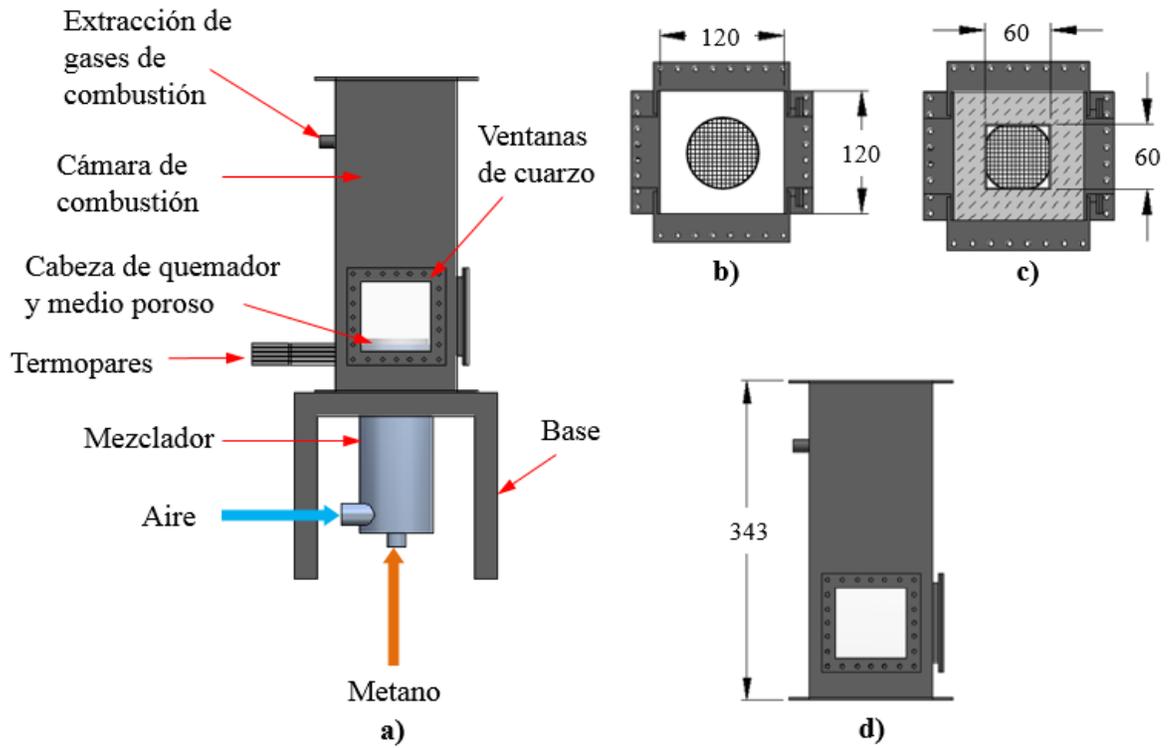
NOTE: n is number in \*each\* group.

El valor de  $n$  es el tamaño de la muestra y dado que no es un número entero se debe redondear, pero hacia el siguiente número mayor entero, de manera que se pueda garantizar una potencia de 0.9. Por estas razones, el tamaño de la muestra es de 3 en cada grupo, lo cual implica un total 6 mediciones en cada tratamiento. No obstante, debido a los altos costos que tiene el metano puro sólo se realizan 3 repeticiones en cada uno de los experimentos.

Cada uno de los montajes experimentales se describirá no sin antes presentar las características del quemador de prueba, el cual está constituido básicamente por cuatro (4) partes.

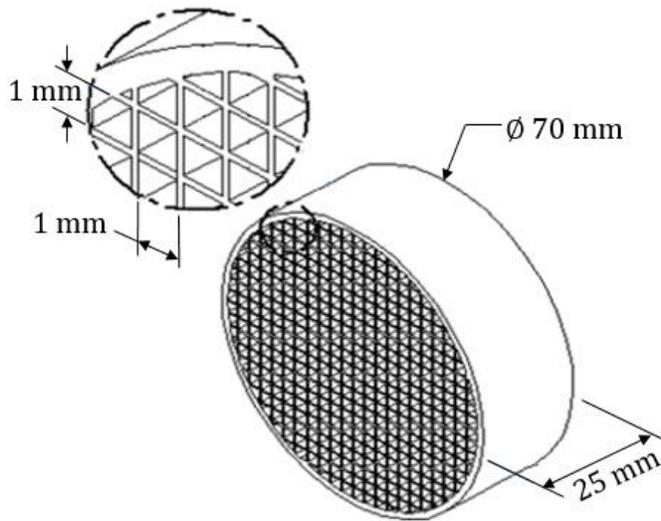
- a. **Zona de mezclado:** este componente del quemador tiene la función de mezclar el aire y el combustible, antes de que ingresen al medio poroso.
- b. **Medio poroso:** parte fundamental del quemador y sobre la cual se estabilizará la llama. Esta pieza se introduce dentro de la cabeza del quemador.
- c. **Cabeza del quemador:** pieza que contiene el medio poroso y que tiene perforaciones para permitir el paso de termopares hasta medio poroso y poder medir su temperatura. Esta pieza está conectada a la zona de mezclado
- d. **Cámara de combustión:** zona dentro de la cual se da el proceso de la combustión. Tiene una sección cuadrada y tres mirillas a través de las cuales se puede observar dónde se encuentra la zona de reacción. Las mirillas están a una altura tal que permite la visión del medio poroso y, a su vez, implementar la técnica OH-PLIF con el fin de caracterizar la morfología de la llama. Adicionalmente, la cámara de combustión cuenta tanto con una ranura para permitir el paso de termopares a la cabeza del quemador, como con un agujero para la toma de gases para de combustión.

En la Figura 24 se presenta en un esquema cada una de las partes que constituyen el quemador de prueba, junto con las dimensiones más importantes de la cámara de combustión y las secciones de salida de los gases de combustión con el fin de evaluar diferentes condiciones de confinamiento. Para el caso de la Figura 24 c) la disminución de la sección de salida se realiza utilizando manta aislante.



**Figura 24. Quemador de prueba: a) Partes del quemador, b) Vista superior (sección de salida 1) (S1), c) Vista superior (sección de salida 2) (S2), d) Longitud de la cámara de combustión. Dimensiones en mm.**

En el montaje, el medio poroso se encuentra centrado con respecto a la cámara de combustión y su esquema se presenta en la Figura 25, junto con algunas de sus medidas más representativas.



**Figura 25. Dimensiones del medio poroso.**

### 3.3.1 Metodología para determinar el rango de estabilidad del quemador, emisiones contaminantes y perfiles de temperatura del medio poroso

Determinar el rango de estabilidad, es decir, la región de combustión estable y los límites a partir de los cuales se da el fenómeno de la retrollama o el desprendimiento de llama, es una de los resultados más importantes en este trabajo. Para evaluar la estabilidad se seleccionaron cinco (5) potencias específicas y se modificó la relación de equivalencia en cada uno de ellos hasta encontrar las zonas límites, de la siguiente manera: si al fijar una potencia específica para la cual, por ejemplo, en  $\phi=0.50$  se encuentra que se obtiene el fenómeno de desprendimiento de llama, entonces no tiene sentido estudiar  $\phi=0.45$  a la misma potencia específica debido a que de ante mano se sabe que se obtendrá el mismo fenómeno; el mismo análisis aplica para la región de retrollama, ya que si, por ejemplo, para  $\phi=0.90$  se da el fenómeno de retrollama, no tiene sentido estudiar  $\phi=0.95$  porque se generará el mismo fenómeno, siempre y cuando se esté evaluando la misma potencia específica.

Una vez se determinan estas zonas, se registra el perfil de temperatura al interior del medio poroso y las emisiones contaminantes. En la Tabla 3 se muestra el diseño de experimentos a seguir y en el que no se incluye el rango de relación de equivalencia a estudiar, debido a que éste es una variable de salida que arroja el rango de estabilidad.

**Tabla 3. Diseño de experimentos #1.**

Potencia específica (kW/m <sup>2</sup> )	Tipo atmósfera	Variables respuesta
260		Rango de estabilidad
325		
390	Confinada	Perfil de temperatura del medio poroso
455		
520		Emisiones contaminantes

La prueba inicia ajustando el caudal de aire y combustible de acuerdo a la potencia y relación de equivalencia a medir. Posteriormente, se enciende el quemador hasta que llegue al estado estable, el cual se determinará con el monitoreo del perfil de temperatura al interior del medio poroso, donde se entenderá por estado estable como la condición bajo la cual el perfil de temperatura al interior del medio poroso no cambia con el tiempo, siguiendo la metodología de estabilización de acuerdo a lo presentado por otros estudios realizados en la sección 2.8.

Una vez alcanzado el estado estable se deja encendido el quemador durante 10 minutos en donde se registran los datos de temperatura del medio poroso y las emisiones contaminantes. Lo anterior, con el fin de observar si en ese tiempo no se produce ningún tipo de inestabilidad como una retrollama o fenómenos termo-acústicos. En caso de que se produzca el fenómeno de la retrollama o el desprendimiento de la llama la prueba terminará inmediatamente a pesar de que no hayan transcurrido los 10 minutos.

La medición de temperatura al interior del medio poroso se realiza utilizando termopares tipo K hasta que los valores sean asintóticos. Estos valores de temperatura son registrados en línea por medio de indicadores de temperatura marca *CHY modelo 804* con conexión USB con una precisión de 0.1 °C.

Las emisiones contaminantes se toman a aproximadamente 5 cm por debajo de la salida de la cámara de combustión. Se utiliza un analizador de gases *Sick Maihak s710* para medir las concentraciones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO y O<sub>2</sub>. Por otro lado, las concentraciones de NO y NO<sub>2</sub> se registran con un analizador *Thermo Scientific 42i-HL*. Ambos dispositivos cuentan con una unidad de acondicionamiento de manera que las mediciones se reportan en base seca. Los rangos de medición, precisión y principios de medición se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4. Rangos de medición, precisión y principio de funcionamiento de los analizadores de gases.**

<b>Especie</b>	<b>Rango</b>	<b>Precisión</b>	<b>Principio de medición</b>
CO <sub>2</sub>	0-30 % vol	±0.01	Infrarrojo no dispersivo
CH <sub>4</sub>	0-100 % vol	±0.01	
CO	0-60000 ppm	±1.0	
O <sub>2</sub>	0-100 % vol	±0.01	Paramagnetismo
NO	0-10 ppm 0-5000 ppm	±0.001	Quimioluminiscencia
NO <sub>2</sub>	0-10 ppm 0-5000 ppm	±0.001	

Los valores registrados con los analizadores se corrigen de acuerdo al documento “*Análisis de gases de combustión en la industria*” de la empresa *TESTO* [81]. Las expresiones se muestran a continuación:

$$CO_2 (\%) = \left( \frac{21 - O_{2\text{referencia}}}{21 - O_2} \right) \times CO_2 (\%) \quad \text{Ec 28}$$

$$CO (ppm) = \left( \frac{21 - O_{2\text{referencia}}}{21 - O_2} \right) \times CO (ppm) \quad \text{Ec 29}$$

$$NOx (ppm) = \left( \frac{21 - O_{2\text{referencia}}}{21 - O_2} \right) \times [NO(ppm) + NO_2(ppm)] \quad \text{Ec 30}$$

Esta corrección se hace con el fin de realizar comparaciones a las diferentes condiciones de relación de equivalencia y potencia específica estudiadas. Para lo anterior, se tomará una referencia de 11 % O<sub>2</sub> de acuerdo a estándares europeos [82]. El esquema del montaje experimental para determinar las 3 variables respuesta de la Tabla 3 se muestra en la Figura 26.

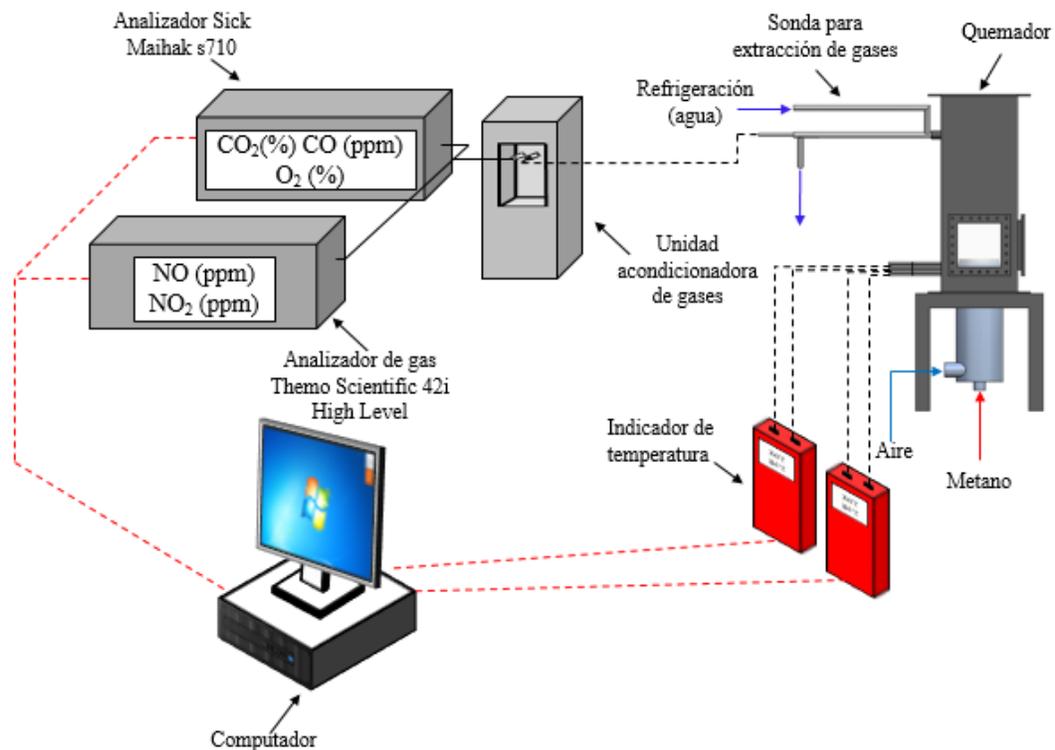


Figura 26. Esquema montaje experimental para determinar rango de estabilidad, perfil de temperatura al interior del medio poroso y emisiones de gases.

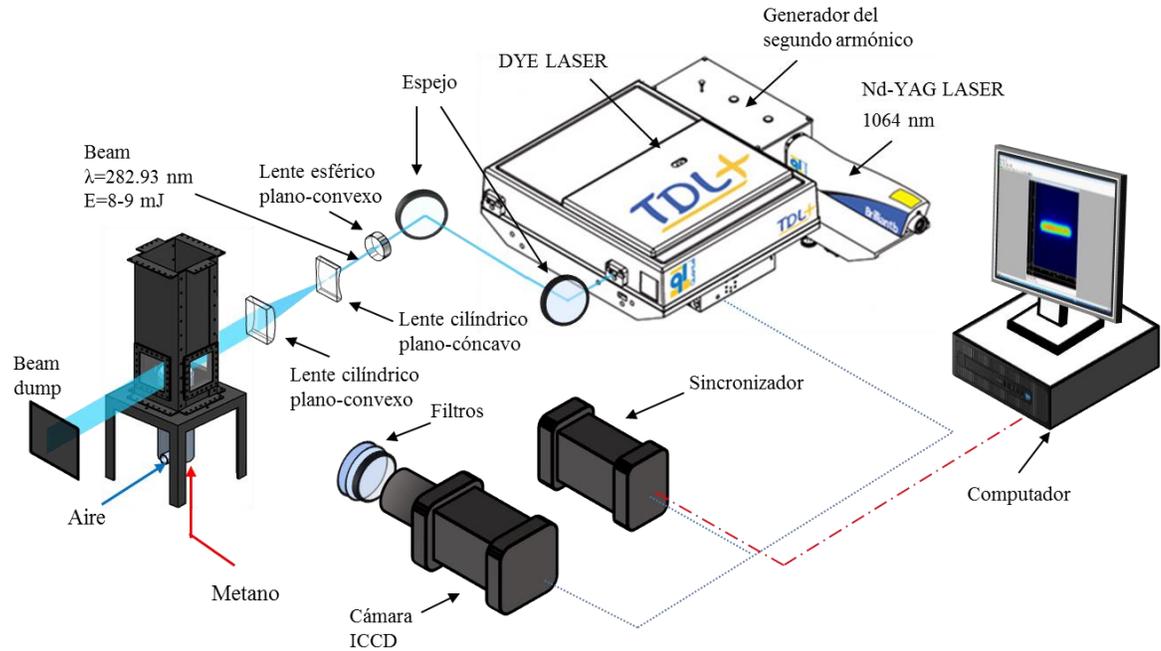
### 3.3.2 Metodología para el estudio de la morfología de la llama y efectos acústicos

La segunda fase de la experimentación se apoya de la primera, ya que con base a los resultados del rango de estabilidad, se seleccionan los puntos más representativos para analizar la morfología de llama usando la técnica OH-PLIF (sección 3.3.2.1), y a su vez, determinar la intensidad del sonido (cuando se presente) de acuerdo a la sección 3.3.2.3.

#### 3.3.2.1 Montaje de la técnica OH-PLIF

El montaje experimental se muestra en la Figura 27 en donde el rayo láser resultante del sistema *Brillant B* y *TDL*, se expande a través de juego de lentes (esférico cóncavo  $f_1=1500$  mm, cilíndrico cóncavo  $f_2=-25$  mm, cilíndrico convexo  $f_3=300$  mm) para formar un plano láser colimado de 20 mm de altura y un espesor de 0.34 mm. La fluorescencia es capturada con un dispositivo de acoplamiento de carga intensificado (ICCD), marca PRINCETON INSTRUMENT modelo PI-MAX IK RB FG 4, la cual es una cámara intensificadora de alto desempeño constituida de un captador CCD de alta resolución acoplado a un intensificador (Gen II RB). La velocidad mínima de la puerta (GATE) es de 2 nsec (500 ps), por lo cual es del tipo FastGate (FG) y está provista de un intensificador de fosforo P43. Tiene un captador CCD con una resolución de  $1024 \times 1024$  y tiene la capacidad de capturar 1 cuadro por segundo a máxima resolución. Para la sincronización temporal entre el láser y la cámara se utilizó un tiempo de retraso de  $214.68 \mu\text{s}$ , en donde una vez se genera la señal del flashlamp, la cámara tarda  $214.68 \mu\text{s}$  en accionarse. La cámara está equipada con un lente

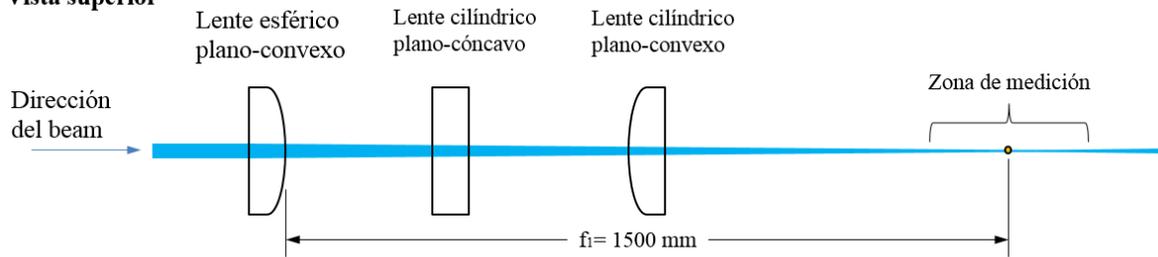
UV 105 mm f/4.0 y dos filtros (WG320 y UG5), con el fin de evitar que los reflejos del láser sean captados por la cámara y sólo dejar pasar el rango de luz en el que emite el OH, bloqueando la luz de mayor longitud de onda.



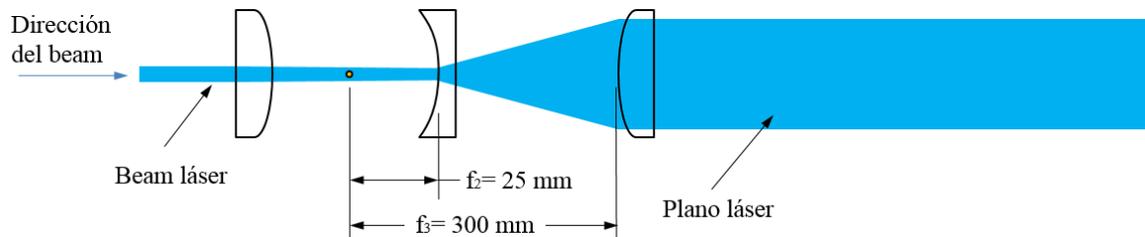
**Figura 27. Esquema del montaje para el estudio de la morfología de la llama.**

En la Figura 28 se presenta un esquema de cómo el rayo láser pasa de ser un cilindro a un plano, además de algunas de las medidas más importantes para la realización del experimento.

**Vista superior**

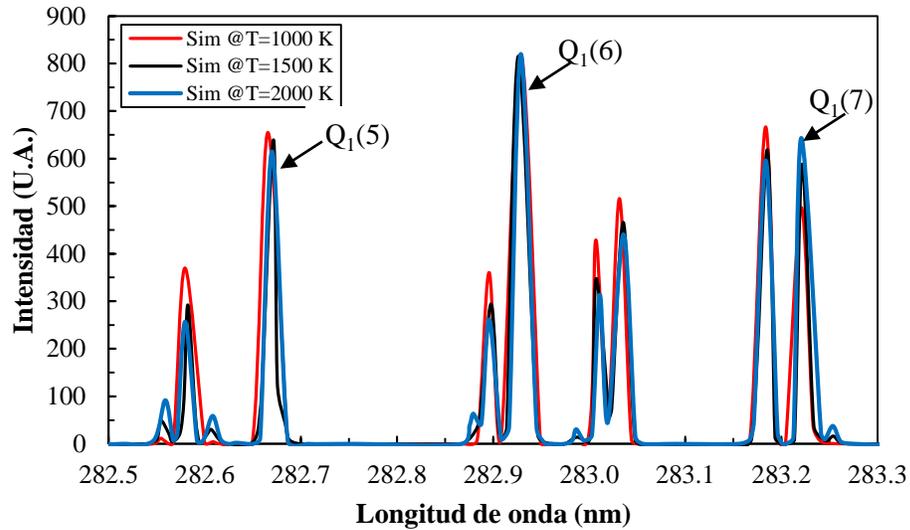


**Vista lateral**



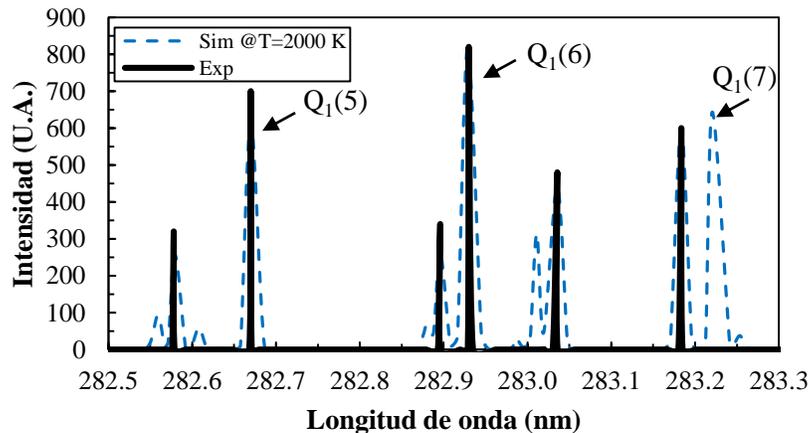
**Figura 28. Esquema de la formación del plano láser con la utilización del juego de lentes.**

Como se mencionó en la sección 2.1, el proceso de enfriamiento colisional es fuertemente afectado por la temperatura, la presión y la composición molecular, sin embargo existen ciertos procesos que son independientes de la temperatura. Por lo anterior, se realizaron simulaciones en el software *LIFBASE 2.1* [83] encontrando que la transición  $Q_1(6)$  no es fuertemente afectada por la temperatura. En la Figura 29 se muestran diferentes simulaciones de la intensidad del OH para diferentes temperaturas, en donde observar que para la transición  $Q_1(6)$  la intensidad es independiente de la temperatura y, en consecuencia, se selecciona esta línea de intensidad para la ejecución de los experimentos.



**Figura 29.** Simulación de la variación de la intensidad LIF de varias líneas de excitación para el OH. Software *LIFBASE 2.1*.

En la Figura 30 se presenta la comparación entre la intensidad LIF simulada y experimental para el OH, en donde se puede observar que con la transición  $Q_1(6)$  se tiene la mayor intensidad del OH y que corresponde a una longitud de onda de 282.93 nm.



**Figura 30.** Comparación de la intensidad LIF del OH, obtenida experimentalmente y simulado.

En la Figura 31 a) y Figura 31 b) se muestran las vistas lateral y superior, respectivamente, del plano láser generado utilizando acetona con el fin de capturar la energía de distribución del láser. La energía de distribución es muy importante porque lo largo del plano láser la energía no es uniforme y, por lo tanto, las imágenes que se tomen con la cámara deben ser normalizadas por esta energía.

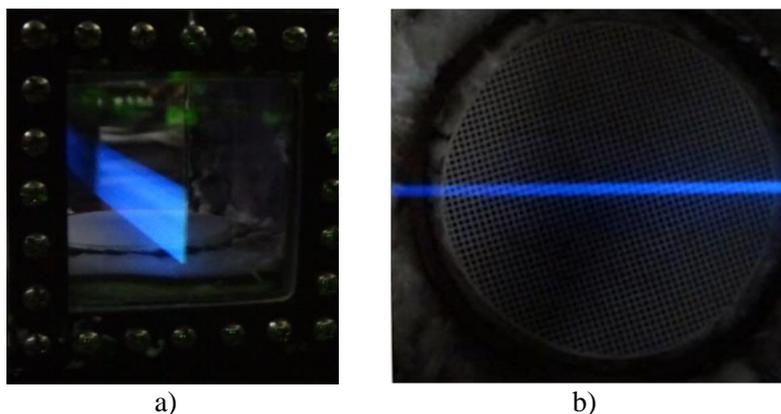


Figura 31. Plano laser con acetona: a) vista lateral, b) vista superior.

Para la excitación del radical OH se usó una energía del láser entre 8 mJ y 9 mJ, rango en el que la energía del láser y la intensidad de OH presentan un comportamiento lineal, fenómeno que es deseado porque existe una condición a partir de la cual, al incrementar la energía del láser, la intensidad del OH tiende a permanecer constante y, por lo tanto, que no se podrían hacer comparaciones de las mediciones realizadas, fenómeno se conoce como Saturación. En la Figura 32 se presenta un gráfico de Intensidad del OH (en unidades arbitrarias) en función de la energía del *beam*, mostrando que la región seleccionada aún se encuentra en la zona de linealidad. Puede verse que a partir de los 10 mJ, el comportamiento comienza a variar y no es lineal.

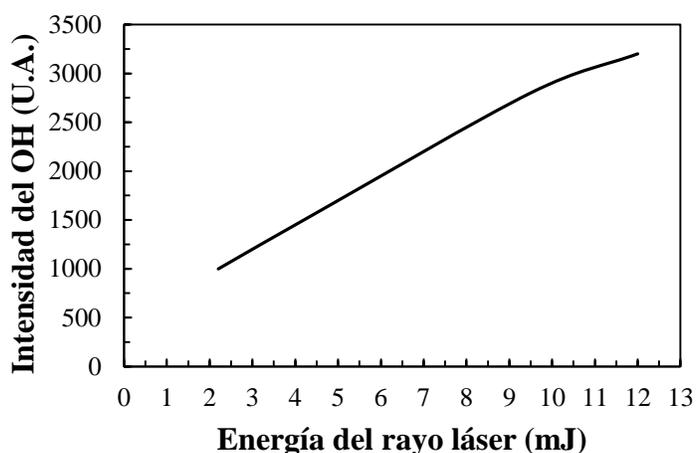
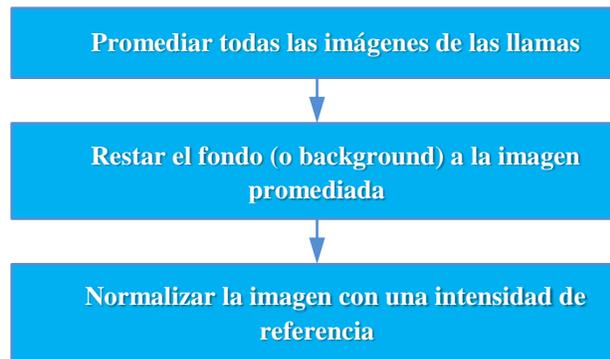


Figura 32. Prueba de linealidad de la intensidad del OH vs Energía del rayo láser.

### 3.3.2.2 Procesamiento de imágenes: OH-PLIF

Como se mencionó anteriormente, la energía del láser no es homogénea y por ende es necesario corregir todas las imágenes capturadas con la cámara ICCD por un nivel de intensidad. Por lo anterior, antes de realizar las mediciones con llama se toman imágenes utilizando acetona, de tal forma que se pueda obtener una distribución de energía de referencia que permita normalizar todas las imágenes obtenidas mediante la técnica OH-PLIF. El procedimiento para post-procesar las imágenes se muestra en el diagrama de la Figura 33, en donde se toma un total de 30 imágenes por experimento (shutter mode).



**Figura 33. Procedimiento para el post-procesamiento de las imágenes.**

Realizar el post-procesamiento es una de las fases más complejas, ya que cada problema es diferente y cada uno tiene su manera de ser resuelto de acuerdo al objeto de estudio. En este caso, se generó un código que permite observar la morfología de las llamas a las diferentes condiciones de potencia específica y relación de equivalencia, con el fin de observar cómo varía el frente de llama. El código utiliza un filtro de medias para promediar las imágenes capturadas por la cámara ICCD, un filtro de paso alto para que intensidades por debajo de cierto valor tomen el valor de cero, que para este caso, corresponde a energía que se encuentre por debajo del 40 % de la energía máxima. Para mayor detalle del código desarrollado por el Grupo GASURE, ver Anexo 5.

### 3.3.2.3 Mediciones intensidad acústica

El sonómetro utilizado en los experimentos se muestra en la Figura 34. Éste es marca Quest Technologies modelo SP-DL-1-1/3 y permite el almacenamiento de los datos en tercios de octava. Cuenta con un preamplificador y un micrófono marca Brüel & Kjaer modelo BK4936.



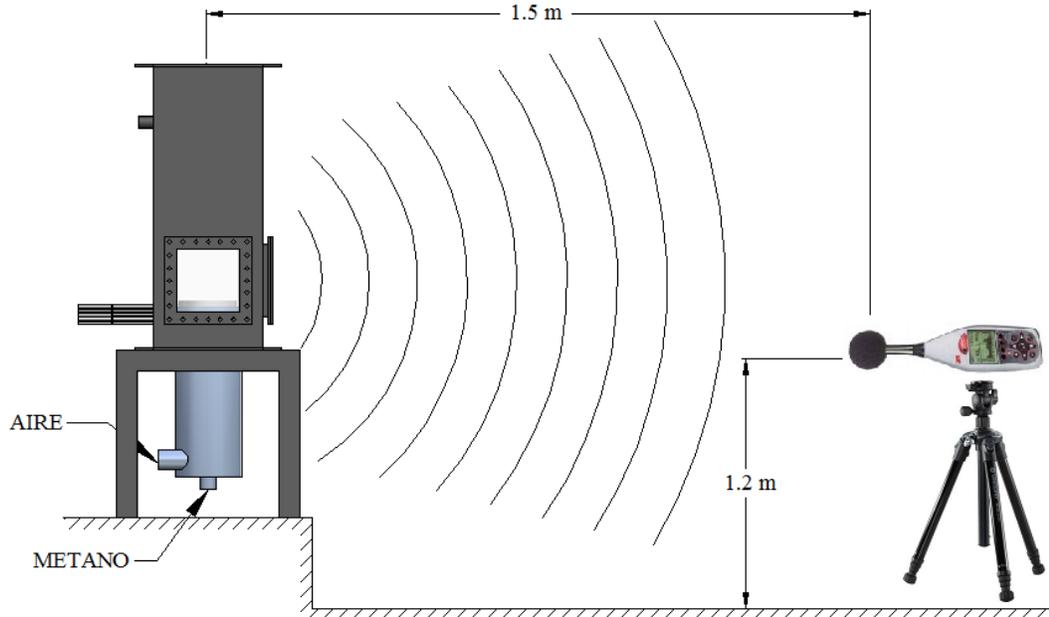
**Figura 34. Sonómetro SoundPro modelo SP-DL-1-1/3 con micrófono BK.**

Las características del micrófono se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5. Características del micrófono.**

Característica	BK4936
Precisión	Clase 1
Polarización	Electret
Diámetro (in)	1/2
Respuesta característica	Free-Field
Respuesta de frecuencia	8 Hz a 20 kHz
Sensibilidad (dBV)	-28
Sensibilidad (mV)	40
Ruido dB (1 kHz tercio de octava)	0
Ruido dBA	22
Ruido dBC	31
Ruido dBZ	35
Ruido dBF	40
Rango mínimo (recomendado)	27
Pico dB	142
Capacitancia nominal (pF)	12

Las mediciones de ruido se realizan siguiendo la Resolución Número 627 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia de 2006. Esta resolución indica que el nivel de ruido emitido debe capturarse a 1.5 m de la fuente generadora de ruido y 1.2 m del piso. El esquema del montaje se muestra en la Figura 35.



**Figura 35. Esquema del montaje experimental para la medición de la acústica.**

Este experimento toma como base los resultados obtenidos de la prueba de estabilidad en donde se determinan las condiciones bajo las cuales se genera el fenómeno termo-acústico y para estos se aplica el siguiente procedimiento:

1. Ajustar los flujos de aire y combustible bajo los cuales se presenta el fenómeno termo-acústico.
2. Encender el quemador.
3. Esperar a que el quemador llegue al estado estable mediante el monitoreo del perfil de temperatura al interior del medio poroso.
4. Realizar las mediciones con el sonómetro durante 5 minutos<sup>3</sup>.

La metodología anteriormente descrita sólo aplica para el caso de llamas confinadas, ya que en las llamas libres no se presenta este fenómeno. Adicionalmente, se realizan mediciones cambiando la sección de salida de la cámara de combustión con el fin de analizar cómo el fenómeno termo-acústico es afectado por el cambio de sección.

<sup>3</sup> De acuerdo a la Resolución Número 627 las mediciones deben realizarse durante 15 minutos, sin embargo debido a los costos en combustible que esto implica, las mediciones se realizaron con una duración de 5 minutos.

El diseño de experimentos de estas dos últimas fases se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6. Diseño de experimentos #2.**

Potencia específica (kW/m <sup>2</sup> )	Tipo atmósfera	Variabes respuesta
260		
325		Morfología de llama
390	Confinada	
455		Intensidad acústica (si aplica)
520		

### 3.3.3 Determinación de las condiciones de recirculación

Uno de los aspectos más importantes de este trabajo es mostrar si la recirculación de los gases de combustión puede afectar, ya sea positiva o negativamente, la morfología de la llama. Para ello, se abordarán diferentes análisis en los que se incluye el punto de vista numérico y experimental.

Numéricamente, se analizará si existen corrientes de gases que recirculan de acuerdo a los vectores de velocidad arrojados por los resultados de las simulaciones. Adicionalmente, se cuantificará el factor de recirculación mediante el uso del código REFACT desarrollado por el Grupo GASURE en el marco de la tesis de maestría “Cálculo numérico del factor de recirculación en hornos de combustión sin llama” [84].

Experimentalmente, se medirá la concentración de CO<sub>2</sub> cerca de la zona de reacción y posteriormente se comparará con el valor estequiométrico esperado para la relación de equivalencia respectiva. En este criterio se establece que si el valor esperado de CO<sub>2</sub> en humos secos, es considerablemente mayor al medido (sin corregir con O<sub>2</sub> de referencia), entonces se confirma que existe recirculación de los gases de combustión. Para lo anterior, se hará uso del software CombuGas desarrollado por el Grupo GASURE, una aplicación para computador que permite obtener las principales propiedades de combustión de aquellos combustibles a los que es posible conocer su composición volumétrica o su fórmula empírica general, y permite determinar un diagrama, en este caso, para el metano. El diagrama se muestra en el Anexo 6. A partir de este diagrama, si se conoce la relación CO/CO<sub>2</sub> (ya que son medidos experimentalmente) y la tasa de aireación (n), es posible determinar el % CO<sub>2</sub> ideal (eje del lado derecho), el cual será comparado con el medido experimentalmente.

Adicionalmente, se comparará la altura del frente de llama para una condición en atmosfera libre y otra confinada, en donde se establecerá que hay efectos de recirculación de gases de combustión si el frente de llama confinado se desplaza aguas abajo con respecto al frente de llama de la condición libre.

# Resultados

# 4

En este capítulo se presenta el análisis de resultados de la revisión teórica, de las simulaciones numéricas y experimentales, relacionados con los parámetros característicos de un medio poroso confinado, tales como el rango de operación, los perfiles de temperatura al interior del medio poroso, las emisiones contaminantes, la morfología de llama y fenómenos de inestabilidades que pueden presentarse en la operación con este tipo de quemadores.

El rango de estabilidad se aborda desde los tres aspectos, es decir, teórico, numérico y experimental con el fin de validar parámetros que se utilizan internacionalmente para determinar la estabilidad de los medios porosos, validar modelos numéricos y, por su puesto, analizar experimentalmente los fenómenos que no puedan ser capturados adecuadamente por los parámetros teóricos y las simulaciones numéricas.

Los perfiles de temperatura ayudan a explicar los comportamientos presentados por las emisiones contaminantes y la morfología de llama, por lo cual es importante resaltar que los análisis en este tipo de combustión deben realizarse con la evaluación no sólo de una sino diferentes variables, ya que estas se complementan las unas con las otras.

Adicionalmente, se presenta el análisis de los resultados del diagnóstico óptico de la combustión, el cual muestra sus ventajas con respecto a otras tecnologías en el análisis de la combustión, especialmente por su alta precisión.

Se encontró también que la combustión estabilizada sobre la superficie de un medio poroso confinado varía con respecto a uno no confinado, más por los efectos del régimen de transferencia de calor que por los efectos de la recirculación de gases de combustión. Adicionalmente, se encontró que para la condición confinada se presentan fenómenos termo-acústicos, lo cual no sucede en el modo no confinado. Este fenómeno puede atenuarse o mitigarse si se modifica el campo del flujo, que en este caso se hizo cambiando la sección de salida del quemador.

Finalmente, se hacen comparaciones entre los resultados obtenidos a partir de los diferentes aspectos evaluados, para luego seguir con el capítulo de conclusiones.

#### 4.1 Análisis del número de Peclet

El número de Peclet ( $Pe$ ), como se mencionó en la sección 2.5 es un número adimensional que compara la transferencia de calor por convección con la transferencia de calor por conducción. En el estudio de los medios porosos este número sirve para determinar si una llama se estabiliza o no sobre la superficie de un medio poroso.

En este trabajo se hizo un análisis de acuerdo a Arrieta [85] en donde se compara el número de Peclet de acuerdo a las propiedades del medio poroso y las propiedades térmicas de la premezcla fría, es decir, antes de entrar al medio poroso, de acuerdo a la potencia específica y relación de equivalencia. La selección de las propiedades térmicas de la premezcla fría, para el cálculo del  $Pe$ , se definió con base a cálculos en los que se evidencia que cuando se toman las propiedades térmicas de la premezcla precalentada, no se predice de la mejor manera los resultados experimentales o numéricos, ya que de acuerdo a esos resultados se generan retrollamas en puntos de medición que son estables.

También se determina el Peclet crítico ( $Pe_{cr}$ ), que en este caso, se calcula con la velocidad de deflagración laminar del combustible y la misma geometría del medio poroso. En la Ec 31 y Ec 32 se muestran las expresiones del  $Pe$  y  $Pe_{cr}$ , respectivamente.

$$Pe = \frac{Vd_c}{D_T} \quad \text{Ec 31}$$

$$Pe_{cr} = \frac{S_L d_c}{D_T} \quad \text{Ec 32}$$

El criterio de estabilidad de acuerdo a este análisis se determina si  $Pe > Pe_{cr}$ , de lo contrario se generará propagación al interior del medio poroso, es decir, ocurrirá el fenómeno de la retrollama. Para establecer el mapa de estabilidad de acuerdo a este criterio se generó la Figura 36 en la que se muestra el  $Pe$  y  $Pe_{cr}$  en función de la relación de equivalencia. Se puede observar que el  $Pe_{cr}$  se cruza en un punto con las curvas de los  $Pe$  a diferentes potencias específicas, y es en este punto en donde se establece el límite crítico de estabilidad de la llama, es decir, los puntos que se encuentren por encima de la curva del  $Pe_{cr}$  son estables, mientras que los que están por debajo, serán susceptibles a las retrollamas.

Como se observa en la Figura 36 a medida que aumenta la potencia específica, el rango de estabilidad sobre la superficie se incrementa debido a que para una relación de equivalencia dada,  $S_L$  es constante, mientras que la velocidad del flujo incrementa al aumentar la potencia específica a la misma relación de equivalencia, evitando así el fenómeno de la retrollama. Por ejemplo, para una potencia específica de 390 kW/m<sup>2</sup> las llamas se estabilizan en la superficie del medio poroso si la relación de equivalencia es incrementada hasta  $\phi=0.8$ , pero si  $\phi>0.8$  ocurrirá el fenómeno de retrollama.

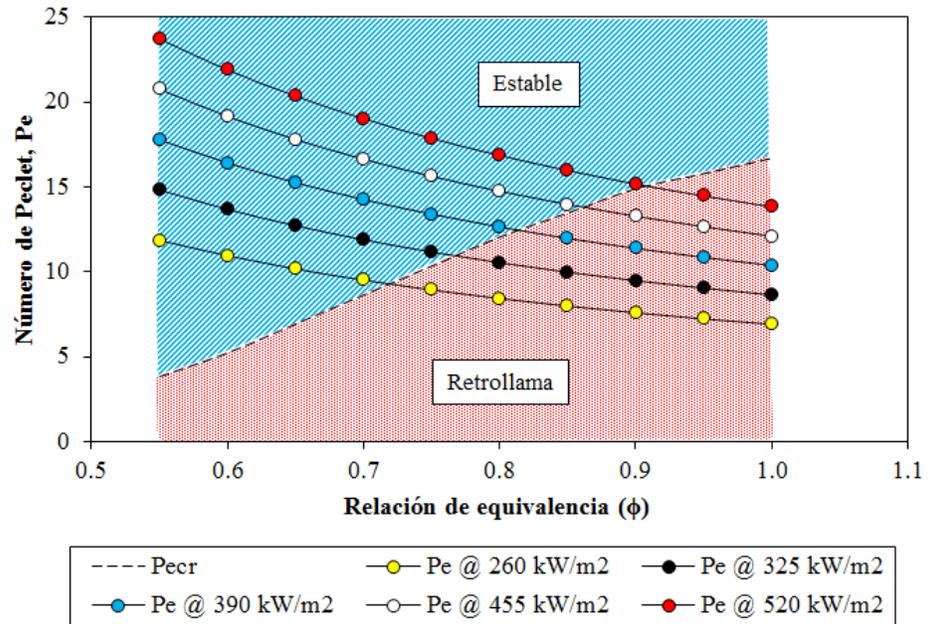


Figura 36. Rango de operación según número de Peclet.

Si bien el  $Pe$  puede ayudar a determinar si la llama se estabiliza sobre la superficie o no, éste es insuficiente para crear un mapa de estabilidad completo, debido a que éste no permite determinar la extinción de llama. Por lo anterior, se hace necesario el uso de otras herramientas para determinar este efecto, aunque es buen punto de partida para tener una buena aproximación al fenómeno. Con los resultados anteriores, el mapa de estabilidad para el rango estudiado, queda como se muestra en la Figura 37.

Asimismo, el número de Peclet no tiene en cuenta factores como el efecto de la recirculación dentro de la cámara de combustión la cual puede afectar o favorecer la estabilidad.

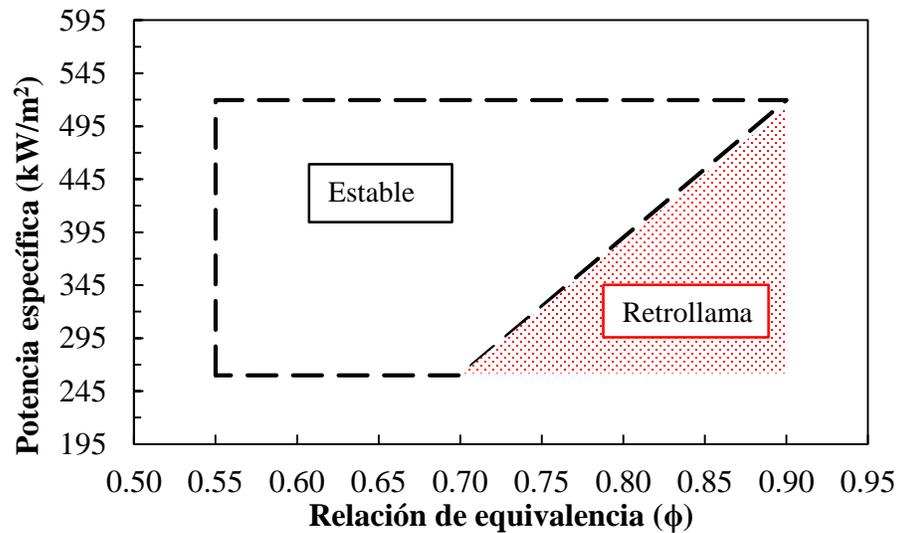
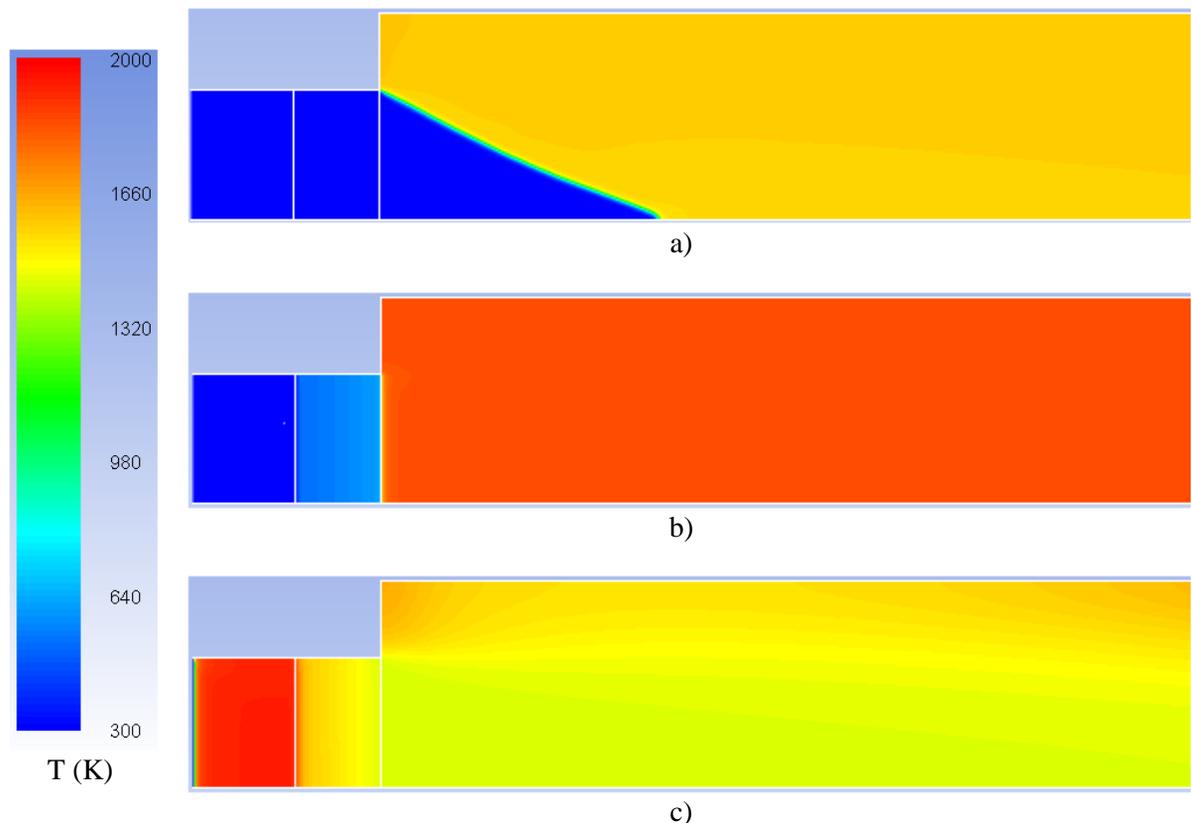


Figura 37. Mapa de estabilidad con base al número de Peclet.

## 4.2 Resultados de simulaciones numéricas

### 4.2.1 Rango de operación y morfología de llama

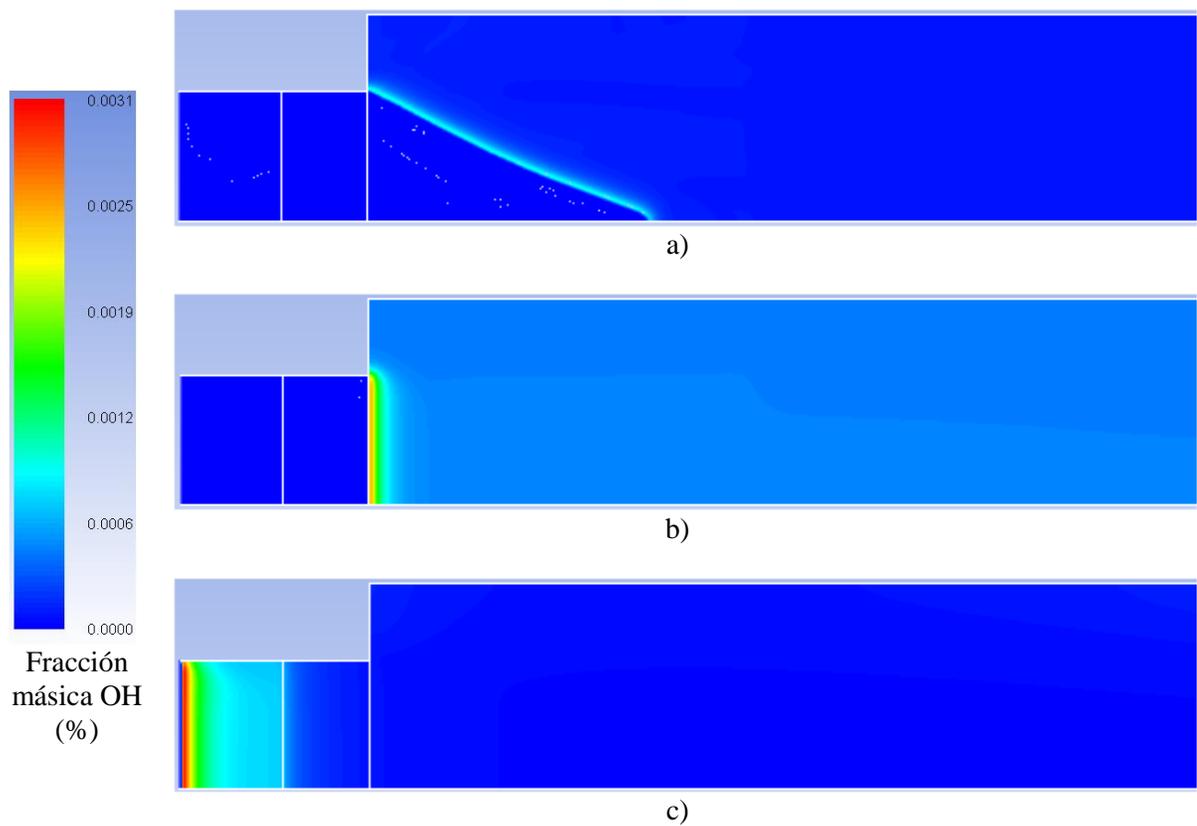
Para hablar acerca del rango de estabilidad numérico, primero se debe analizar si los resultados obtenidos son posibles de obtener en la realidad. Por lo anterior, antes de presentar el mapa de estabilidad se muestra lo que se considera como una llama estable, una llama desprendida y el fenómeno de la retrollama. Una llama desprendida es aquella en la que el contorno de temperatura muestra una lejanía considerable de frente de llama con respecto a la superficie del medio poroso, como se muestra en la Figura 38 a); se entiende por llama estable aquella que está sobre la superficie del medio poroso como se muestra en la Figura 38 b), sin embargo ésta puede estar un poco desprendida de la superficie del medio poroso, pero se considera estable; finalmente una retrollama es aquella en la que se puede observar que la máxima temperatura se encuentra ya sea al interior del medio poroso o aguas arriba del mismo (mezclador) como se muestra en la Figura 38 c).



**Figura 38. Estabilidad de las llamas mediante simulación numérica (contorno de temperatura): a) Desprendimiento ( $260 \text{ kW/m}^2$ ,  $\phi=0.55$ ), b) Estable ( $260 \text{ kW/m}^2$ ,  $\phi=0.7$ ), c) Retrollama ( $390 \text{ kW/m}^2$ ,  $\phi=0.8$ ).**

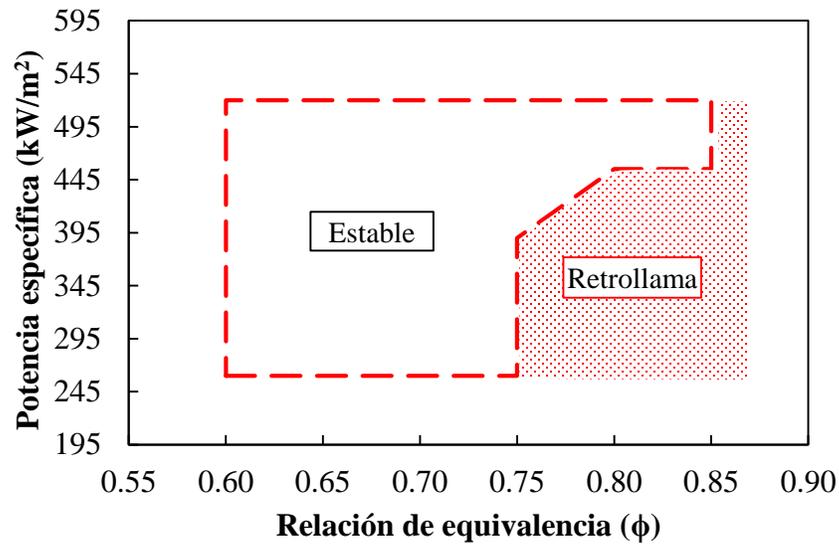
En la Figura 39 se muestra la morfología de varias llamas a diferentes condiciones, pero bajo la misma escala. Se observa que a la Figura 39 a) tiene una intensidad menor y a su vez el frente de llama se encuentra muy alejado de la superficie del medio poroso, mientras que la Figura 39 b) muestra una llama que se encuentra estabilizada sobre la superficie del medio poroso y finalmente

la Figura 39 c) muestra el fenómeno de la retrollama en donde la zona de reacción se estabiliza aguas arriba de la ubicación del medio poroso.



**Figura 39. Estabilidad de las llamas mediante simulación numérica (contorno de OH): a) Desprendimiento (260 kW/m<sup>2</sup>,  $\phi=0.55$ ), b) Estable (260 kW/m<sup>2</sup>,  $\phi=0.7$ ), c) Retrollama (390 kW/m<sup>2</sup>,  $\phi=0.8$ ).**

Con base a los criterios anteriores, el mapa de estabilidad de las simulaciones se presenta en la Figura 40.



**Figura 40. Mapa de estabilidad de las simulaciones numéricas.**

Cabe resaltar que en las simulaciones numéricas no se obtuvo el fenómeno de inestabilidad termo-acústica, debido a que el modelo de combustión utilizado fue el modelo laminar y en este no se consideran fluctuaciones en el campo de flujo, lo cual sí ocurre cuando aparece el fenómeno termo-acústico. Por la razón anterior, se deja como propuesta para un trabajo futuro el determinar numéricamente los fenómenos termo-acústicos mejorando el modelo utilizado en este trabajo.

Para determinar la morfología de la llama en las simulaciones numéricas se trazaron de 35 líneas axiales como se muestra en la Figura 41, a las que se les determinó la máxima fracción másica del radical OH. Los resultados de la morfología de la llama de las simulaciones se muestran en la Figura 42 en donde se ve que el efecto de aumentar la relación de equivalencia, disminuye la separación entre el frente de llama y la superficie del medio poroso. Este mismo efecto se da cuando se disminuye la potencia específica para una relación de equivalencia constante.

Lo anterior, se puede explicar por el hecho de que la velocidad de deflagración laminar permanece constante si sólo se varía la potencia específica, pero que cambia si se modifica la relación de equivalencia. Para el caso de los hidrocarburos, el punto máximo de  $S_L$  se encuentra cercano a la relación estequiométrica y por esto al aumentar la relación de equivalencia, la llama está más cerca de la superficie del medio poroso.

Se puede observar también que con el modelo se pudo obtener el fenómeno de desprendimiento como puede verse para el caso de  $\phi=0.55$  y  $P_{Tesp}=260$  kW/m<sup>2</sup>, sin embargo no se obtuvo el fenómeno de extinción de llama, lo cual da un indicio de que el modelo de la simulación numérica debe mejorarse para predecir con mayor precisión este comportamiento. Adicionalmente, el perfil de la altura del frente de llama para  $\phi=0.55$  y  $P_{Tesp}=260$  kW/m<sup>2</sup> es muy similar al que se obtiene con quemadores de un solo puerto, lo cual no aplicaría en este caso porque se tiene una gran cantidad de agujeros por donde se descarga la premezcla. Además, como se mostrará en la sección 4.3.1 las alturas del frente de llama obtenidas no eran de tal orden de magnitud.

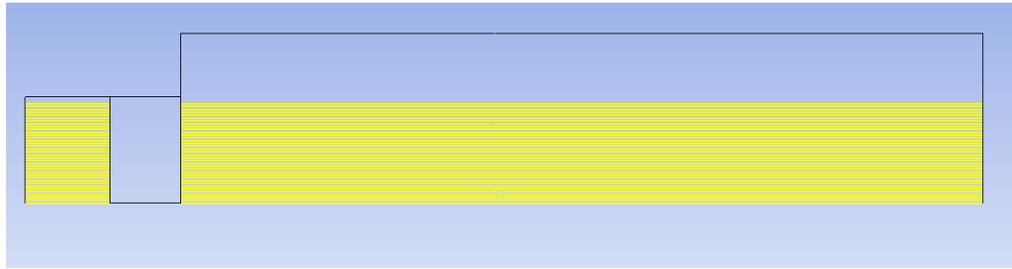


Figura 41. Líneas para determinar la posición de la máxima fracción del radical OH.

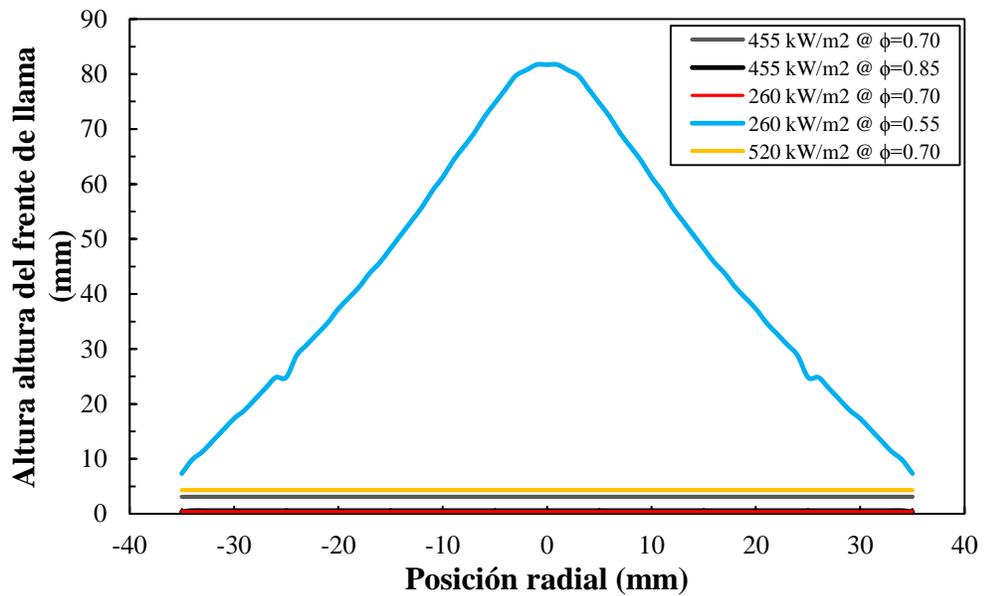
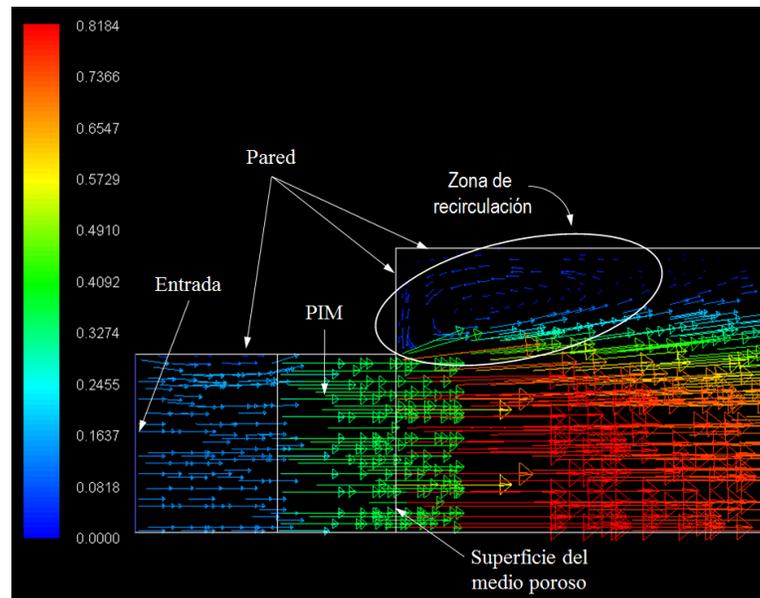


Figura 42. Altura del frente de llama simulado con respecto a la superficie del medio poroso.

Uno de los aspectos más importantes es que se capturó el efecto de pequeñas zonas de recirculación al interior de la cámara de combustión. Lo anterior, se muestra en la Figura 43 en donde se ilustran los vectores de velocidad dentro de la cámara de combustión. Puede verse que existe una pequeña zona de recirculación inmediatamente después de la superficie del honeycomb, indicando que los productos de combustión pueden estar diluyéndose con la premezcla.



**Figura 43. Vectores de velocidad en m/s. Condición: 260 kW/m<sup>2</sup>,  $\phi=0.70$ .**

Para explicar lo anterior, se tomará como base la teoría de Lewis-Von Elbe [86], la cual se ilustra en la Figura 44. La llama se establece en un punto P1 en el que se cumple que existe una igualdad entre la velocidad de un hilo de corriente de la premezcla aire-combustible y la velocidad local de deflagración. En este punto, denominado punto de anclaje, se cumple que  $s_L = U \cos(\alpha)$ , el cual determina la estabilidad de la llama siendo  $U$  la velocidad de la premezcla de gases. En la figura se muestran los diferentes puntos de anclaje de la llama para diferentes condiciones de estabilidad.

En esta teoría los factores que inciden en la estabilidad de la llama son los siguientes:

- El campo local de velocidad.
- El efecto pared.
- La difusión de la atmósfera que rodea el chorro.

En particular, cuando una llama de premezcla que se propaga por tubo y se descarga al ambiente, experimenta el efecto de esta en los siguientes fenómenos:

- El efecto pared es modificado.
- La velocidad de deflagración local varía significativamente debido al efecto de difusión de la atmósfera que rodea la descarga.

La superposición del efecto pared, anteriormente mencionada, y el efecto de la difusión de la atmósfera que rodea el chorro de premezcla, son la base para estudiar la estabilidad de la llama.

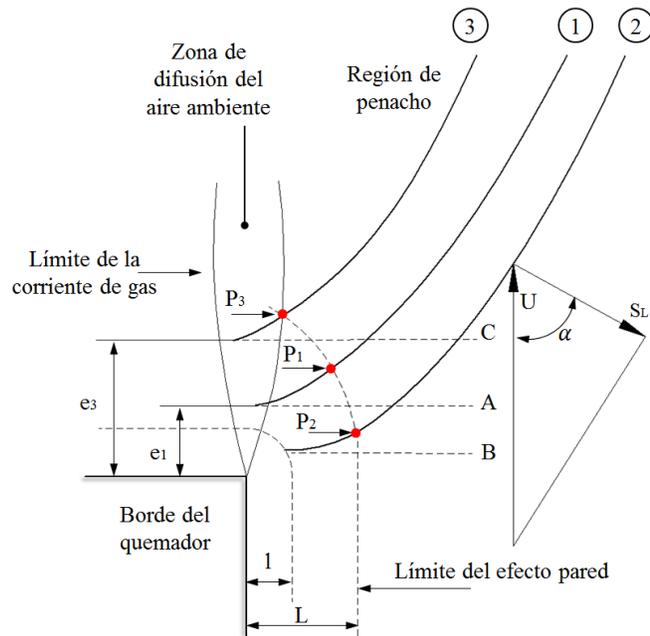


Figura 44. Puntos de anclaje para diferentes condiciones de estabilidad de llama. Adaptada de [86].

Sin embargo, el caso anterior corresponde a una llama de perfil cónico que difiere al caso en estudio, en el que se tiene una llama plana. Así entonces, el diagrama de estabilización queda como se muestra en la Figura 45. La llama se estabiliza en el punto P1 en donde la velocidad de deflagración laminar es igual a la velocidad del flujo a lo largo de toda la llama, sin embargo al confinar la llama los efectos de la atmósfera sobre el frente de llama son mayores debido a la presencia de corrientes de recirculación, haciendo que el espacio entre el punto de anclaje ( $e$ ) y la descarga de la premezcla se aumente ( $P_3$ ). Por esta razón, los gases de combustión tienen una mayor área por la cual pueden diluirse en la zona de reacción haciendo que  $S_L$  disminuya.

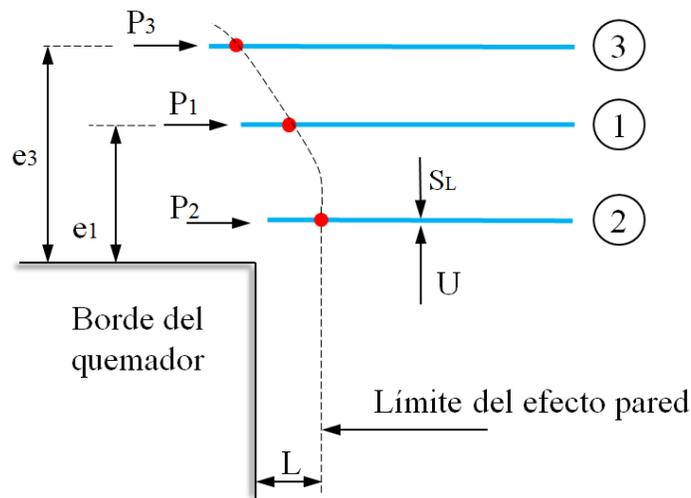


Figura 45. Puntos de anclaje para diferentes condiciones de estabilidad de llama. Elaboración propia.

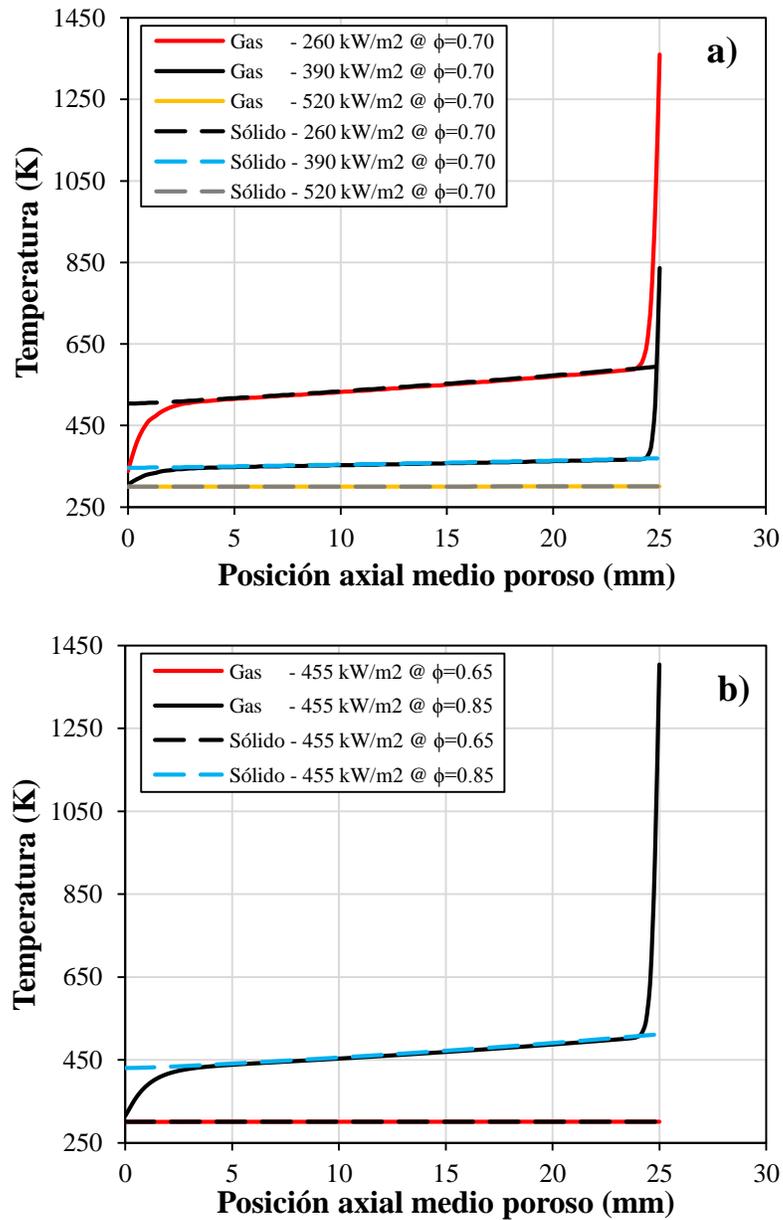
Este fenómeno (recirculación) fue detectado visualmente en todas las simulaciones numéricas. Posteriormente, se hizo uso del software REFACT con el fin de cuantificar el factor de recirculación (ver Anexo 7). Para ello, se tomaron 2 puntos con el fin de comparar el efecto de la relación de equivalencia y el efecto de la potencia específica.

Al analizar los resultados se encontró que al aumentar la potencia específica desde 260 kW/m<sup>2</sup> hasta 520 kW/m<sup>2</sup> (para  $\phi=0.70$ ), el factor de recirculación se disminuye de 0.0596 a 0.0181. Este resultado demuestra que los efectos de la recirculación son cada vez menores cuando se aumenta la potencia específica, pero la relación de equivalencia permanece constante. Por otro lado, cuando se fija la potencia específica y disminuye la relación de equivalencia, se tiene como resultado una reducción del factor de recirculación, así por ejemplo, para 260 kW/m<sup>2</sup>, al pasar de  $\phi=0.70$  a  $\phi=0.55$ , el factor de recirculación cae de 0.0596 a 0.00425.

Otro de los hallazgos en el trabajo es la importancia que tiene la radiación en el modelo, debido a que cuando se despreciaba este modo de transferencia de calor, el fenómeno de la retrollama se generaba en parejas de  $P_{T_{esp}}/\phi$ , en las que experimentalmente no se daba el fenómeno. La UDF implementada en el modelo permitió mejorar considerablemente los resultados, especialmente en la región de retrollamas, ya que al incluir este término fuente en la ecuación de la energía, la temperatura de la superficie del medio poroso disminuye y, como consecuencia, se obtienen zonas estables. Por otro lado, es de anotar que la radiación sólo fue considerada en la superficie del medio poroso y no en todo el dominio de la simulación lo cual hace que el modelo siga siendo una simplificación. Lo anterior, se debe a que en *ANSYS-Fluent* no es compatible el modelo de no equilibrio en la zona porosa y los modelos de radiación que tiene por defecto el software.

#### 4.2.2 Perfil de temperatura de la fase sólida y gaseosa

El perfil de temperatura al interior del medio poroso de las simulaciones numéricas se muestra en la Figura 46. Se puede ver que al aumentar la potencia específica, la temperatura tanto de la premezcla como del sólido disminuye a causa del alejamiento de la zona de reacción con respecto a la superficie del medio poroso, disminuyendo así el flujo de calor hacia este. En la Figura 46 a) se muestra el efecto de la potencia específica, mientras que en la Figura 46 b) el efecto de la relación de equivalencia. En ambas figuras se observa que el sólido y gas tienen aproximadamente la misma temperatura, en donde el gas alcanza rápidamente la temperatura del sólido. La razón de este comportamiento es que el honeycomb tiene una gran área de transferencia de calor en cada canal lo cual permite que el gas pueda calentarse rápidamente. Sin embargo, este efecto es altamente influenciado por el coeficiente convectivo de transferencia de calor, para el cual existen diferentes algoritmos de cálculo, pero que en este trabajo se usó uno que corresponde a la geometría del honeycomb que podría no ser el más preciso.

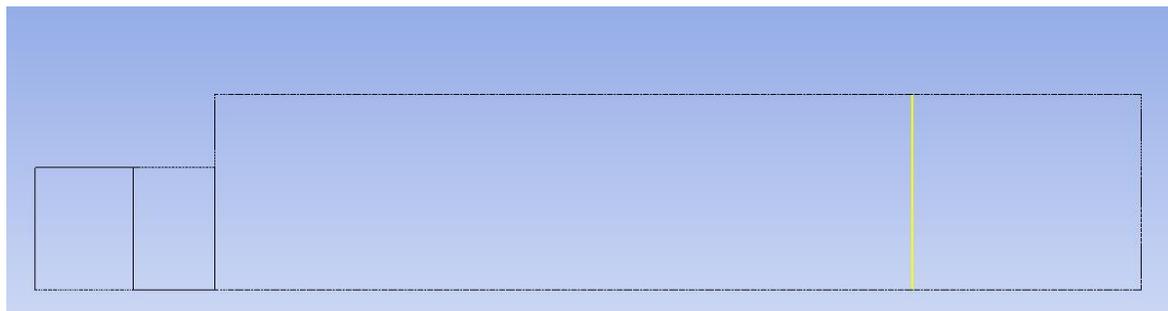


**Figura 46.** Perfil de temperatura numérico al interior del medio poroso.

Adicional a lo anterior, se debe tener en cuenta que la llama esta confinada, lo cual hace que el gradiente de temperatura de la llama a la atmosfera se disminuya, de tal forma que el honeycomb puede adquirir mayor temperatura en comparación con una llama no confinada, tal como se mostrará en la sección 4.3.1.

### 4.2.3 Emisiones contaminantes

Para reportar las emisiones contaminantes de las simulaciones numéricas se trazó una línea a 7 cm con respecto de la salida del quemador, como se muestra en la Figura 47, dado que allí es donde se tiene ubicado el punto de medición para tomar la muestra de gases del quemador de prueba y servirá para posteriores comparaciones.



**Figura 47. Línea para determinar las emisiones contaminantes.**

En esta línea se tomaron las fracciones molares del  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{O}_2$ , éste último con el fin de calcular las emisiones a una misma referencia. También se determinó la fracción molar del  $\text{H}_2\text{O}$  con el fin de calcular las emisiones en base seca. Los resultados se muestran en la Figura 48 en donde no se reportan las emisiones de  $\text{NO}_x$  ya que el mecanismo cinético no incluye esta especie.

Los resultados muestran que se presenta combustión incompleta, ya que se reportan cantidades de  $\text{CO}$  de hasta 81 ppm. Adicionalmente, la tendencia que se muestra es que al aumentar la potencia específica, las emisiones de  $\text{CO}$  incrementan en un 7.7 % al pasar de  $260 \text{ kW/m}^2$  a  $520 \text{ kW/m}^2$  para  $\phi=0.70$ , como se muestra en la Figura 48 b). Por otro lado, al fijar la potencia específica y aumentar la relación de equivalencia se observa que las emisiones de  $\text{CO}$  también incrementan. Para el caso de la Figura 48 d) el incremento es del 196 % cuando se pasa de  $\phi=0.65$  a  $\phi=0.70$  @  $455 \text{ kW/m}^2$ . Se observa también para ambos casos que el  $\text{CH}_4$  se consume completamente.

Por lo tanto, podría decirse que la relación de equivalencia tiene mayor efecto sobre las emisiones contaminantes en comparación con la variación de la potencia específica. Los comportamientos anteriores pueden explicarse desde el punto de vista de que el frente de llama está más alejado de la superficie del quemador haciendo que el tiempo de residencia de los gases sea menor en comparación con las bajas potencias específicas; por otra parte, al aumentar la relación de equivalencia se incrementa la cantidad de combustible y como consecuencia mayor probabilidad de que al haber combustión incompleta, se de en mayor proporción.

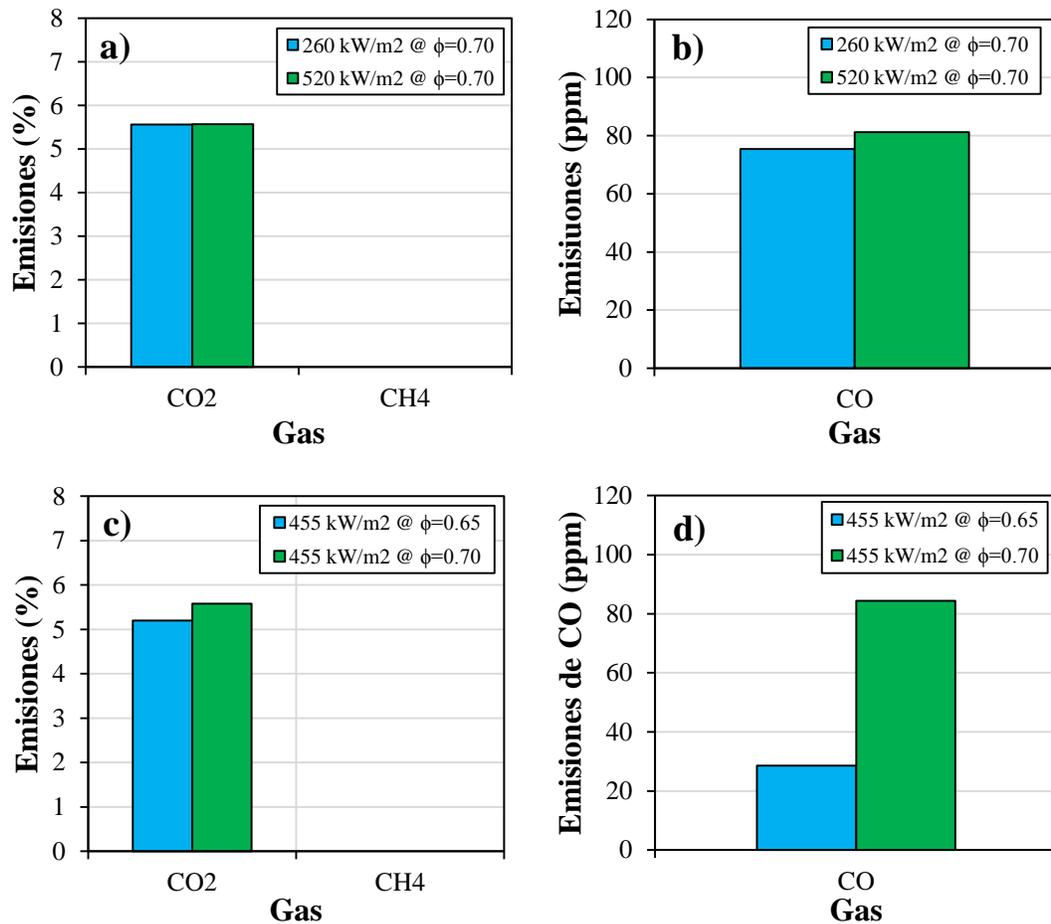


Figura 48. Emisiones contaminantes de las simulaciones numéricas: a-b) Efecto de la potencia específica, c-d) Efecto de la relación de equivalencia.

### 4.3 Resultados experimentales

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos de la fase experimental del trabajo y se comparan con los resultados numéricos. En primer lugar, se presentan los resultados de la estabilidad de llama o rango de operación del quemador, seguido de las emisiones contaminantes y del perfil de temperatura obtenido al interior del medio poroso, que ayuda a explicar el porqué de ciertos comportamientos obtenidos de las emisiones.

#### 4.3.1 Estabilidad y morfología de llama

El primer resultado de las mediciones experimentales fue determinar el mapa de estabilidad en donde se obtuvo un fenómeno de inestabilidad adicional y que es indeseado en la operación de este tipo de quemadores, como lo es el fenómeno termo-acústico. En la Figura 49 a) se muestra el rango de operación obtenido experimentalmente. Los marcadores circulares (●) negros indican puntos medidos experimentalmente, mientras que los amarillos indican la aparición del fenómeno termo-acústico. La zona de color azul corresponde a la región en la cual hay extinción de llama, es decir, donde se enciende el quemador, pero la velocidad del flujo es mayor a  $S_L$  y la llama no es capaz de

sostenerse y se apaga; una zona roja que representa la zona del fenómeno de la retrollama, en donde a diferencia de la extinción de llama,  $S_L$  es mayor a la velocidad del flujo y en este caso la llama se propaga a través de los canales del medio poroso; una zona blanca en donde se tienen llamas estables, algunas de las cuales están un poco desprendidas debido a que se encuentran, ya sea en el límite de desprendimiento o debido a que la velocidad del flujo es mayor cuando aumenta la potencia específica, sin embargo las llamas no se extinguen permaneciendo sobre la superficie del medio poroso y los perfiles de temperatura al interior del mismo permanecen constantes en el tiempo; finalmente, se tiene una zona de color verde que corresponde a la zona en donde aparece el fenómeno termo-acústico, caracterizado por tener llamas estables, pero que adicionalmente generan un sonido intenso, debido al acople de la tasa de liberación de calor con el campo de presión acústica al interior del quemador.

Los resultados muestran que este tipo de medios porosos confinados son susceptibles a entrar en la región de fenómenos termo-acústicos si no se tiene un buen control del sistema. Una de las maneras de atenuar estos efectos es cambiando la aerodinámica del sistema, sin embargo esto requiere en algunos casos de mayor instrumentación en los sistemas, en donde de acuerdo a las fluctuaciones de la presión se modifica campo del flujo. Otra de las formas de amortiguar este efecto es cambiando la sección de salida de tal manera que el campo de flujo se modifique y no exista acople entre el campo acústico y las tasas de liberación de calor. Cabe anotar que el fenómeno termo-acústico no se presenta cuando la llama no está confinada.

Adicionalmente, se puede ver en la Figura 49 b) que hay una muy buena aproximación de los resultados numéricos con respecto a los experimentales, sin embargo, las simulaciones numéricas no captan la presencia de fenómenos termo-acústicos debido a la selección del modelo laminar, el cual para lograr predecir el fenómeno termo-acústico debe cambiarse a un modelo de turbulencia, de tal forma que se tengan en cuenta las fluctuaciones de las diferentes propiedades del flujo.

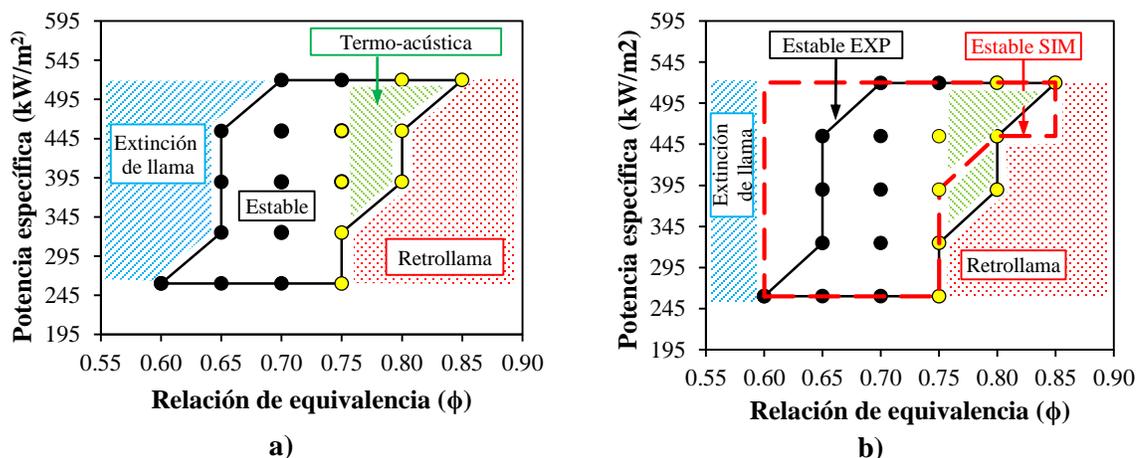


Figura 49. Rango de estabilidad: a) Experimental, b) Comparación de los resultados experimentales con los numéricos.

No obstante se logra una buena aproximación con las simulaciones en el rango de estabilidad, las simulaciones numéricas no capturan el efecto de la extinción de llama, lo cual se debe simplificaciones realizadas en el modelo, como por ejemplo, asumir que las paredes son adiabáticas, lo cual no es cierto como puede observarse en la imagen termográfica de la Figura 50 y en el perfil de temperatura a lo largo de la línea P1, mostrada en la Figura 51.

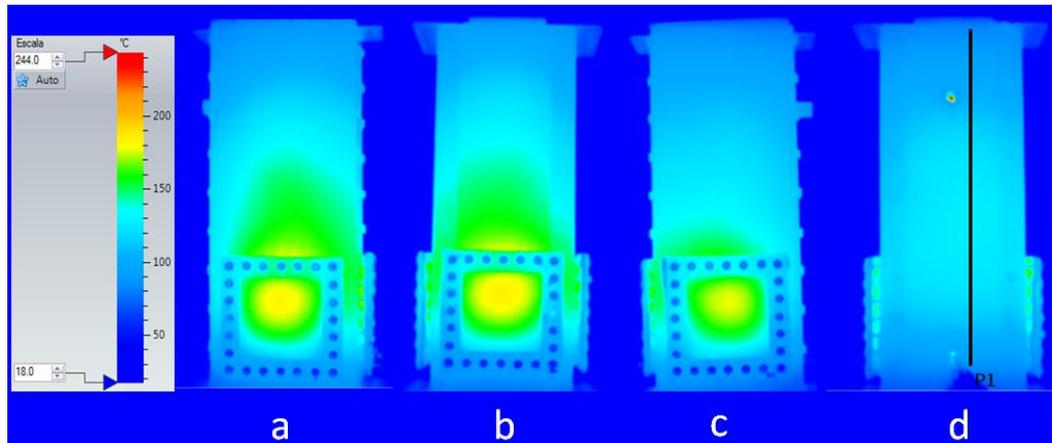


Figura 50. Termografía del quemador operando a una potencia específica de 260 kW/m<sup>2</sup> y  $\phi=0.70$ : a) Vista lateral izquierda, b) Vista frontal, c) Vista lateral derecha, d) vista trasera.



Figura 51. Histograma de temperatura a lo largo de la línea P1 de la Figura 50 d).

#### 4.3.1.1 Fenómeno termo-acústico

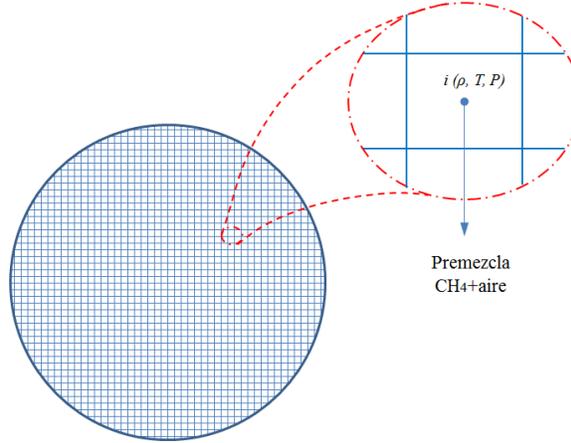
Para analizar teóricamente el por qué la tasa de liberación varía con las fluctuaciones de la presión, en la Figura 52 se muestra un esquema del honeycomb en el que se toma uno de sus agujeros a través del cual pasa la premezcla de aire/combustible, y que se encuentra a una presión  $P$ , una temperatura  $T$  y una densidad  $\rho$ , en el punto  $i$ . Asumiendo un mecanismo de reacción de un paso, la tasa de progreso global de la reacción puede expresarse de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\dot{q} = k[Fuel]^a[O_2]^b \quad \text{Ec 33}$$

Donde:

$$k = A_0 T^n \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T}\right) \quad \text{Ec 34}$$

En las ecuaciones anteriores,  $\dot{q}$  es la tasa global de progreso de la reacción,  $[Fuel]$  es la concentración del combustible,  $[O_2]$  es la concentración del  $O_2$ ,  $a$  y  $b$  son constantes que dependen del tipo de combustible,  $k$  es la constante de velocidad de la reacción,  $A_0$  es el coeficiente pre-exponencial,  $n$  es el exponente de la temperatura,  $E_a$  es la energía de activación,  $R_u$  es la constante universal de gases y  $T$  es la temperatura de la premezcla.



**Figura 52. Esquema de honeycomb.**

Para el caso del metano, la tasa de progreso global de la reacción es:

$$\begin{aligned} \dot{q} &= A_0 T^n \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T}\right) \left[\frac{P_{CH_4}}{R_u T}\right]^a \left[\frac{P_{O_2}}{R_u T}\right]^b \\ &= A_0 T^n \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T}\right) \left[\frac{x_{CH_4} P_i}{R_u T}\right]^a \left[\frac{x_{O_2} P_i}{R_u T}\right]^b \end{aligned} \quad \text{Ec 35}$$

Donde  $P_i$ ,  $P_{CH_4}$  y  $P_{O_2}$  son las presiones total y parciales del metano y del oxígeno, respectivamente. De acuerdo a la expresión anterior, si se presentan fluctuaciones de la presión entonces la concentración tanto del oxígeno como del metano también fluctuarán y por ende se tendrán oscilaciones de la tasa de liberación de calor. Adicionalmente, si se genera más energía acústica de la que es disipada entonces se generará el fenómeno termo-acústico tal como se presentó en la sección 2.7.3.

La razón por la cual este fenómeno se genera en relaciones de equivalencia más cercanas al estequiométrico es debido a que se presentan las mayores fluctuaciones de la tasa de liberación de calor. Para apoyar esta afirmación se toma la Ec 20 y Ec 35 que corresponde al criterio de la generación del fenómeno termo-acústico y la tasa de liberación de calor (o tasa de progreso global), respectivamente.

$$\frac{\gamma - 1}{\rho c^2} \cdot \frac{1}{T} \int_V \int_T p' \dot{q}' dV dt > \int_A \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dA + \int_V D dV$$

Si se aumenta la concentración del combustible, lo cual puede hacerse al ajustar la relación combustible/aire (incrementando  $\phi$ ), y si adicionalmente se presentan fluctuaciones en el campo de

presión, entonces  $\dot{q}'$  aumenta, siendo mayor en relaciones de equivalencia más altas y por lo tanto el término de generación de la energía acústica se incrementa.

#### 4.3.1.2 Comparación de rango de operación del quemador confinado vs quemador libre

Otro de los aspectos evaluados fue comparar el rango de estabilidad de la llama confinada y no confinada. Para analizar este aspecto se tomará como volumen de control el medio poroso en condiciones confinada y libre, como se muestra en la Figura 53. Para este análisis se desprecia el calor por transferido por convección de la llama al medio poroso debido a que las líneas de corriente van en sentido contrario al flux de calor. Al realizar los balances de energía se tiene lo siguiente:

- Llama libre:

$$\dot{Q}_{entra} = \dot{Q}_{sale}$$

$$\dot{Q}_{rad} (llama-sólido) + \dot{Q}_{cond} (premezcla-h) = \dot{Q}_{rad} (alrededores) + \dot{Q}_{conv} (premezcla)$$

$$\begin{aligned} \sigma \varepsilon_{llama} A_{llama} (T_{ad}^4 - T_{s,h}^4) + \frac{k}{L} A (T_{prem} - T_{u,g}) \\ = \sigma \varepsilon_h A (T_{ad}^4 - T_{alr}^4) + hA (T_{prom,h} - T_{u,g}) \end{aligned} \quad \text{Ec 36}$$

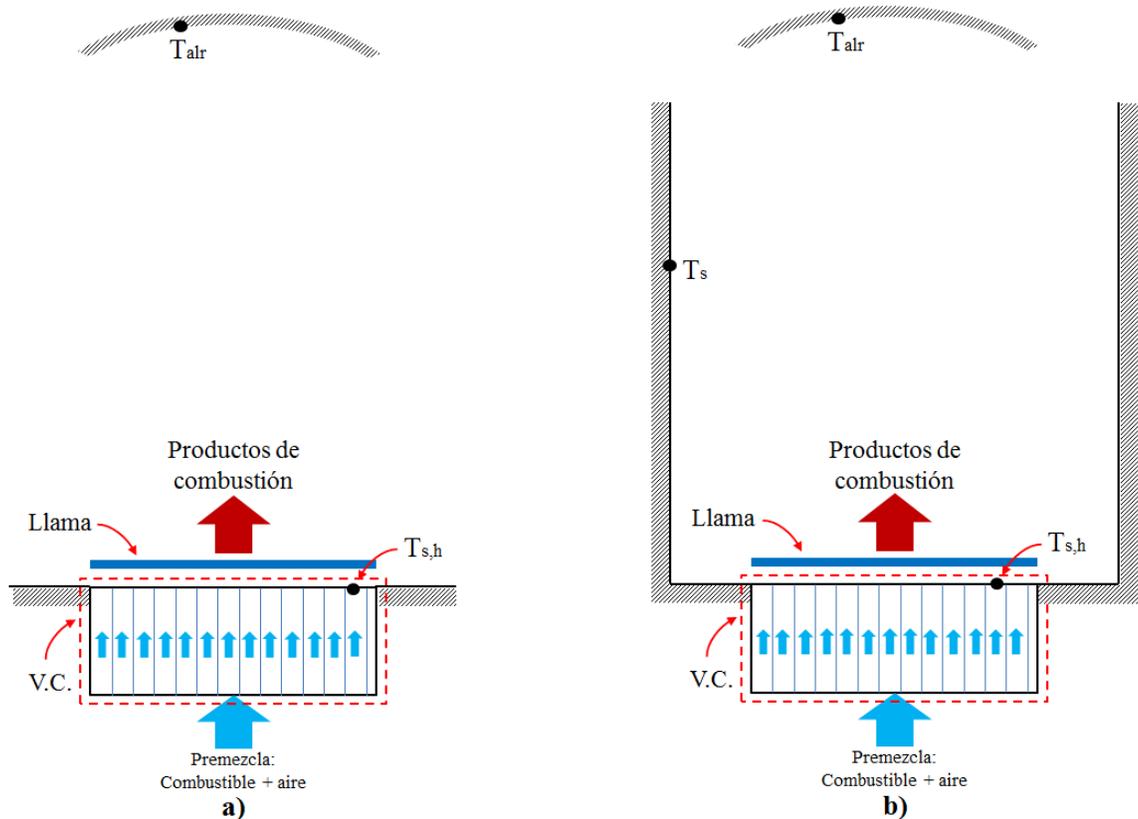
- Llama confinada:

$$\dot{Q}_{entra} = \dot{Q}_{sale}$$

$$\dot{Q}_{rad} (llama-h) + \dot{Q}_{rad} (paredes-h) + \dot{Q}_{cond} (premezcla-h) = \dot{Q}_{rad} (h-alr) + \dot{Q}_{conv} (h-premezcla)$$

$$\begin{aligned} \sigma \varepsilon_{llama} A_{llama} (T_{ad}^4 - T_{s,h}^4) + \sigma \varepsilon_{pared} A_{pared} (T_s^4 - T_{s,h}^4) + \frac{k}{L} A (T_{prem} - T_{u,g}) \\ = \sigma \varepsilon_h A (T_{ad}^4 - T_{alr}^4) + hA (T_{prom,h} - T_{u,g}) \end{aligned} \quad \text{Ec 37}$$

En las ecuaciones anteriores  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann,  $\varepsilon$  es la emisividad,  $A$  es el área,  $T_{ad}$  es la temperatura de llama adiabática,  $k$  es la conductividad térmica de la premezcla,  $T_{alr}$  es la temperatura de los alrededores,  $h$  es el coeficiente convectivo de transferencia de calor,  $T_s$  es la temperatura de la pared,  $T_{s,h}$  es la temperatura de la superficie del medio poroso,  $T_{prom,h}$  es la temperatura promedio del medio poroso,  $T_{u,g}$  es la temperatura de los gases sin quemar al interior del medio poroso,  $T_{prem}$  es la temperatura de la premezcla entre la superficie del honeycomb y el frente de llama y  $L$ , en este caso, es la separación del frente de llama con respecto a la superficie del medio poroso.

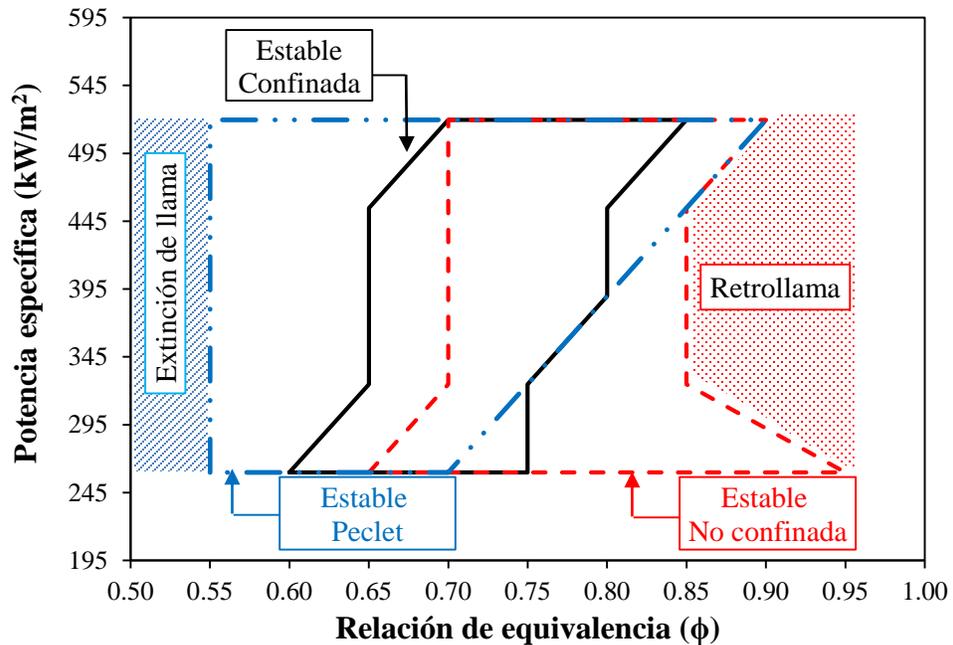


**Figura 53. Configuraciones: a) Esquema llama libre, b) Esquema llama confinada. V.C.: volumen de control.**

Al comparar la Ec 36 y Ec 37 se puede concluir que el medio poroso confinado se calienta en mayor proporción en comparación cuando está en atmósfera libre, debido a que si bien no se sabe si  $T_s$  es mayor o menor a  $T_{s,h}$ , la energía que llega (o sale dependiendo del valor real de estas temperaturas) por radiación de las paredes es menor en la condición confinada, ya que el gradiente de temperatura es menor con respecto a la atmósfera libre. Lo anterior, permite establecer que cuando la llama se confina la velocidad de deflagración es mayor que la velocidad de la premezcla favoreciendo el fenómeno de la retollama. Por el contrario, en atmósfera libre la llama siempre transferirá calor a los alrededores que se encuentran a una temperatura menor y adicionalmente el medio poroso no recibe energía de paredes a mayor temperatura de tal manera que se calienta menos, dando mayor posibilidad de generar llamas estables o incluso hacer que las llamas tiendan a desprenderse a causa del mayor flux de calor que se da hacia los alrededores en comparación de la llama confinada.

Adicionalmente, si bien es cierto que existen corrientes de recirculación que afectan la morfología de la llama tal como se mostró en la sección 4.3.2, estos efectos son pequeños en comparación con el régimen de transferencia de calor. Esto puede verse en el rango de operación de la llama confinada y no confinada que se muestra en la Figura 54. Según estos resultados y del análisis precedente, se concluye que el confinamiento amplía el rango de estabilidad desde el punto de vista del desprendimiento (se pueden tener condiciones de premezcla más pobres), pero se hace más sensible a la retollama a medida que la premezcla se vuelve más rica. Sin embargo,

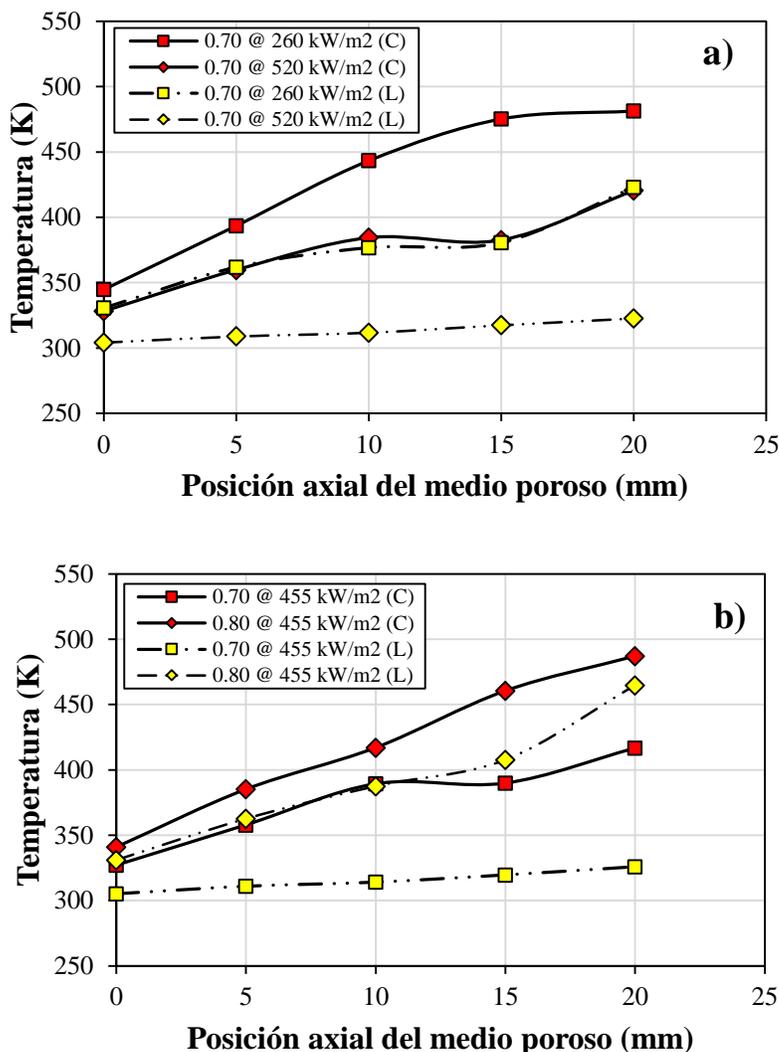
globalmente el rango de estabilidad se reduce en comparación de un medio poroso con combustión en la superficie no confinada.



**Figura 54. Comparación del rango de estabilidad para una llama confinada y no confinada estabilizada sobre la superficie de un medio poroso tipo honeycomb.**

Adicionalmente, se puede observar que el rango de operación teórico (de acuerdo al Pecelet) se ajusta de mejor manera al caso confinado que a la llama libre, lo cual da señales de que el número de Pecelet debe redefinirse y considerar otros factores como lo es la radiación térmica, ya que posiblemente esta sea la razón por la cual no se ajuste a los resultados experimentales de la llama libre, o considerar la temperatura de la atmósfera en la cual se da la combustión porque como se mostró en las secciones anteriores, el sumidero tiene un gran impacto sobre el perfil de temperatura del medio poroso y por ende en la estabilidad.

En la Figura 55, se presenta el perfil de temperatura al interior del medio poroso cuando se tiene una llama libre y una llama confinada, y su efecto ante las variaciones de la potencia específica y la relación de equivalencia. Se observa que para todos los casos los perfiles de temperatura de la llama libre siempre son menores a los de las llamas confinadas, lo cual corrobora la aseveración de que cuando la llama se confina esta transfiere mayor energía al medio poroso.



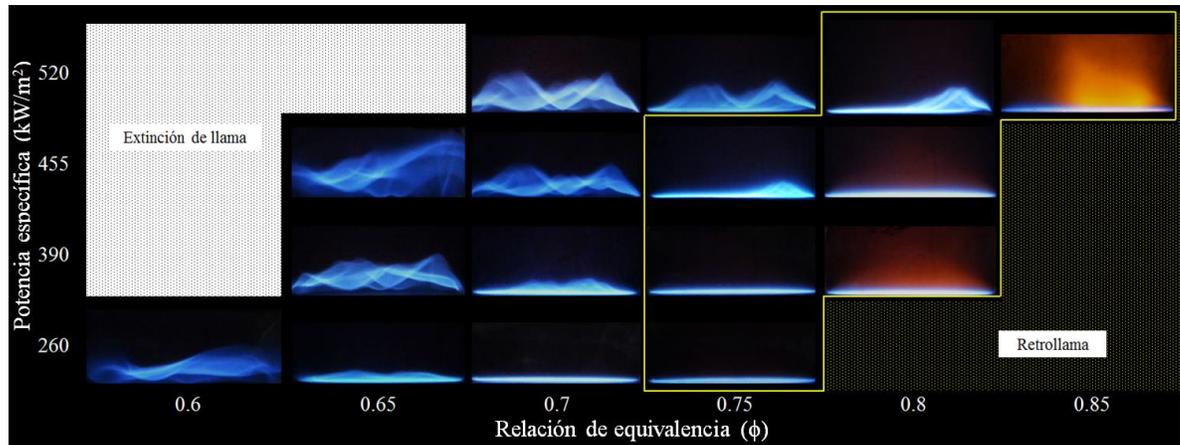
**Figura 55. Perfil de temperatura al interior del medio poroso: a) Efecto de la potencia específica, b) Efecto de la relación de equivalencia. C: Confinada, L: Libre.**

En la Figura 56 se muestra la morfología de las llamas confinadas en donde puede verse que a medida que se incrementa la potencia específica o se disminuye la relación de equivalencia las llamas tienden a desprenderse de la superficie del quemador, pero éstas no se extinguen y tienen una condición “estable” que de acuerdo a reportes en la literatura no es segura debido a la formación del  $N_2O$ . A la fecha no se ha llegado a un consenso acerca de los mecanismos de formación su formación, sin embargo, en general se dice que la emisión de  $N_2O$  se produce principalmente a bajas temperaturas (727 a 1027 °C) [87].

El  $N_2O$  es uno de los gases de efecto invernadero de larga vida ( $CO_2$ ,  $CH_4$  y  $N_2O$ ) y su potencial de calentamiento global calculado sobre una escala de tiempo de 100 años es 300 veces mayor que el  $CO_2$ , es decir, el  $N_2O$  tiene un efecto mayor sobre el efecto invernadero que el  $CO_2$  [88]. Por las razones anteriores, se puede decir que la zona de estabilidad o zona óptima de combustión se hace

cada vez más estrecha si se tienen en cuenta tanto los criterios ambientales como de operación segura del sistema.

Adicionalmente, se observa un color rojizo en las llamas cercanas al límite crítico de retrollama debido a que la llama está más cerca del medio poroso permitiendo que éste se caliente a tal punto que el honeycomb comienza tomar un color rojizo, como se muestra para la condición de una potencia específica de  $520 \text{ kW/m}^2$  y  $\phi=0.85$ . Esto indica que la llama está próxima a la retrollama y que debe tenerse cuidado en la operación del sistema.



**Figura 56. Morfología de llamas confinadas. La línea de color amarillo indica la presencia del fenómeno termo-acústico.**

En cuanto al efecto termo-acústico se puede observar que éste se presenta cuando las llamas están cerca de la superficie del medio poroso, ya que como se mostró en la Figura 49 en ninguna condición de relación de equivalencia baja ( $\phi < 0.75$ ) y diferentes potencias específicas se obtuvo el fenómeno. Para realizar este análisis se detectó el frente de llama utilizando la técnica OH-PLIF con el fin de observar la morfología del frente de llama y determinar la altura o espacio muerto entre la superficie del medio poroso y el frente de llama. En la Figura 57 y Figura 58 se ilustran algunos resultados del procesamiento de imágenes en los cuales se muestra una fotografía, junto con el contorno de radicales OH y finalmente el perfil de la altura del frente de llama con respecto a la superficie del medio poroso. Estos resultados muestran que para  $\phi=0.7$  y  $520 \text{ kW/m}^2$  la altura en función del radio es irregular, pero para  $\phi=0.7$  y  $260 \text{ kW/m}^2$  las fluctuaciones no son significativas, lo cual se debe básicamente a que al aumentar la potencia específica, se aumenta la velocidad del flujo llevando la llama hacia la región de desprendimiento.

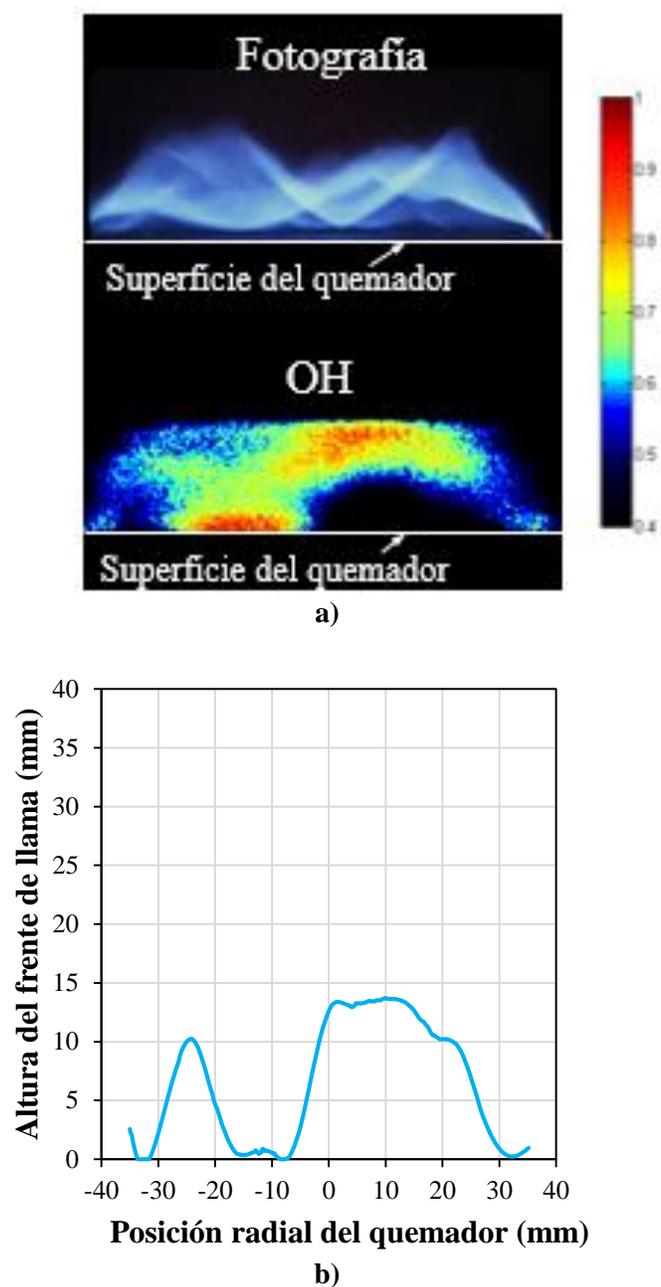
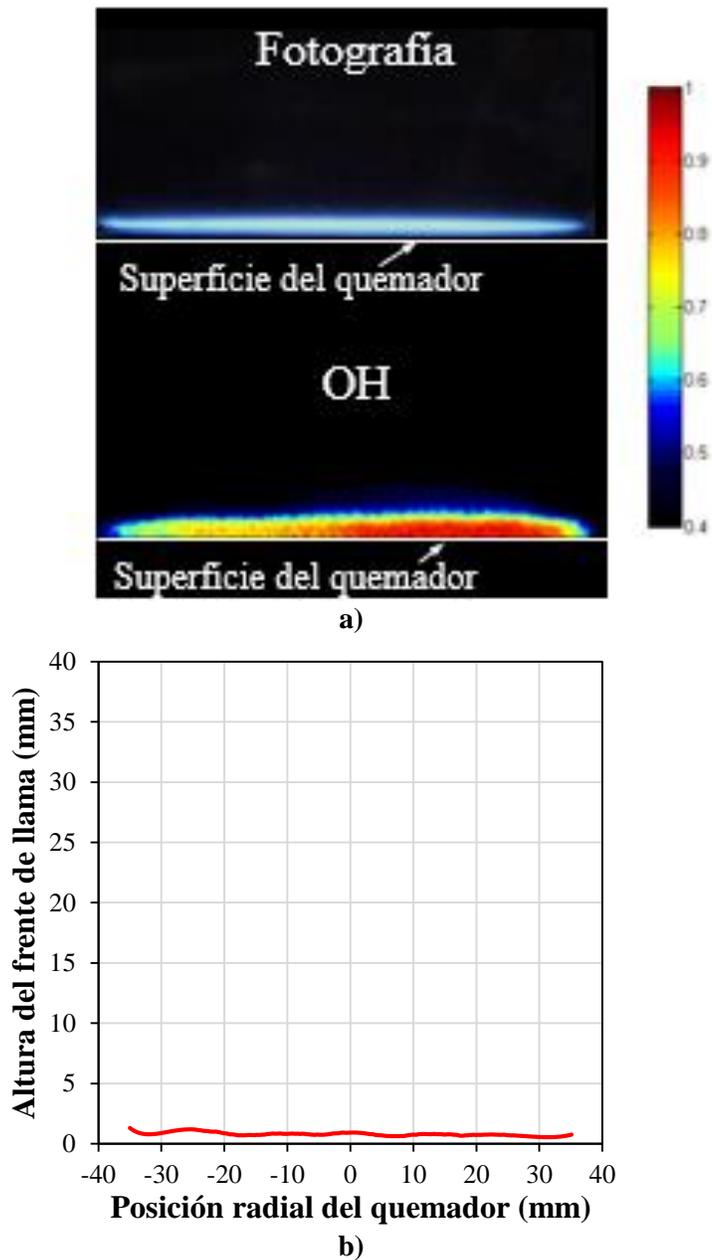


Figura 57. Procesamiento de imagen de llama desprendida y confinada ( $520 \text{ kW/m}^2$ ,  $\phi=0.70$ ): a) Fotografía e imagen OH-PLIF, b) Perfil de la altura del frente de llama con respecto a la superficie del medio poroso.



**Figura 58.** Procesamiento de imagen de llama estable y confinada ( $260 \text{ kW/m}^2$ ,  $\phi=0.70$ ): a) Fotografía e imagen OH-PLIF, b) Perfil de la altura del frente de llama con respecto a la superficie del medio poroso.

En la Figura 59 se muestra la comparación de la altura del frente de llama con el fin de observar su comportamiento frente a variaciones de la potencia específica y la relación de equivalencia. Se observa que a pesar de que a una potencia específica de  $260 \text{ kW/m}^2$  el espacio muerto entre el medio poroso y el frente de llama es casi idéntico para  $\phi=0.70$  y  $\phi=0.75$ , se puede concluir que no basta con que la morfología de la llama sea casi idéntica para generar el fenómeno termo-acústico, siendo importante un estudio más profundo acerca de la energía acústica.

Asimismo, puede verse que modificar la relación de equivalencia dejando constante la potencia específica (o viceversa) tiene un efecto importante en la altura del frente de llama con respecto a la superficie del medio poroso. Por ejemplo, si se determina la altura máxima del frente de llama en cada una de las condiciones que se muestran en la Figura 59 a) y luego éstas se comparan entre sí, se encuentra que la diferencia máxima que puede obtenerse es de aproximadamente el 73 %. Por otro lado, si se hace este mismo análisis para el efecto de la potencia específica, Figura 59 b), la disminución en la altura máxima puede llegar a ser del 92 %. Sin embargo, puede notarse que en órdenes de magnitud la altura del frente de llama visualmente se ve más afectada por el efecto de la potencia específica que de la relación de equivalencia para el rango de estudio.

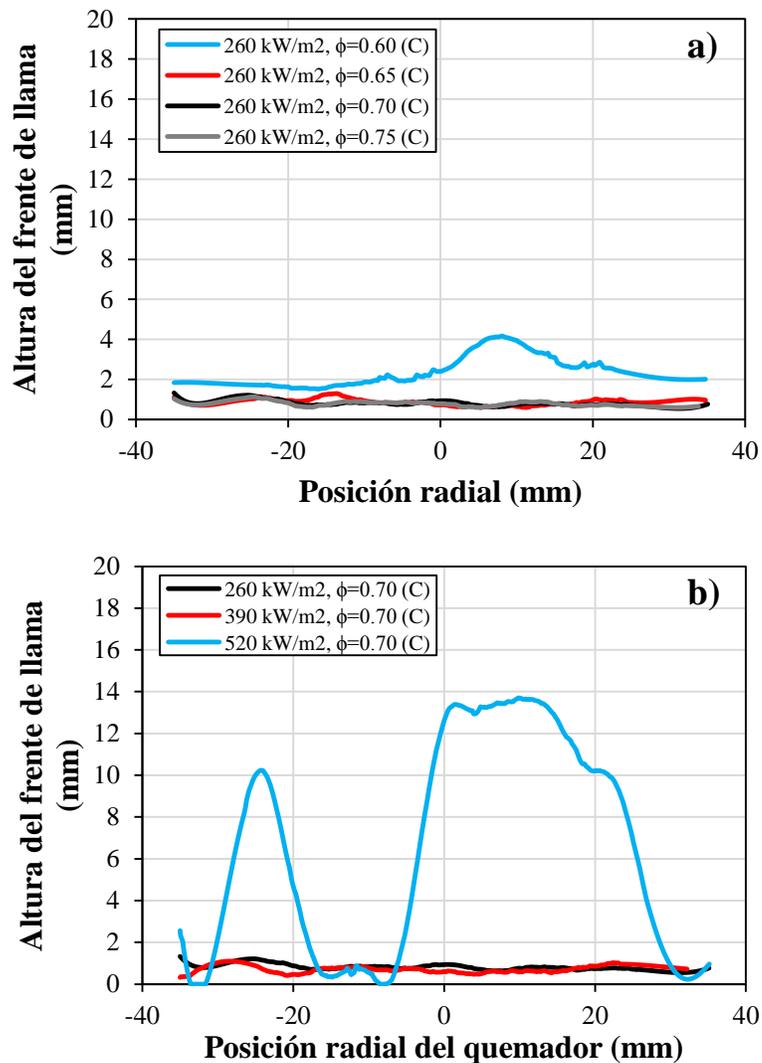


Figura 59. Altura del frente de llama con respecto a la superficie del quemador: a) Efecto de la relación de equivalencia, b) Efecto de la potencia específica. (C): llama confinada.

### 4.3.2 Efecto de la recirculación en llamas confinadas

Las corrientes de recirculación de gases pueden hacer que una fracción de los gases vayan al frente de llama y se mezcle con los gases de premezcla, disminuyendo la velocidad de deflagración tal como se presentó en la sección 2.7.1. Para abordar este aspecto, se realizaron análisis a partir de dos perspectivas, que permiten corroborar la presencia de corrientes de recirculación de gases utilizando la cámara de sección cuadrada de lado 12 cm.

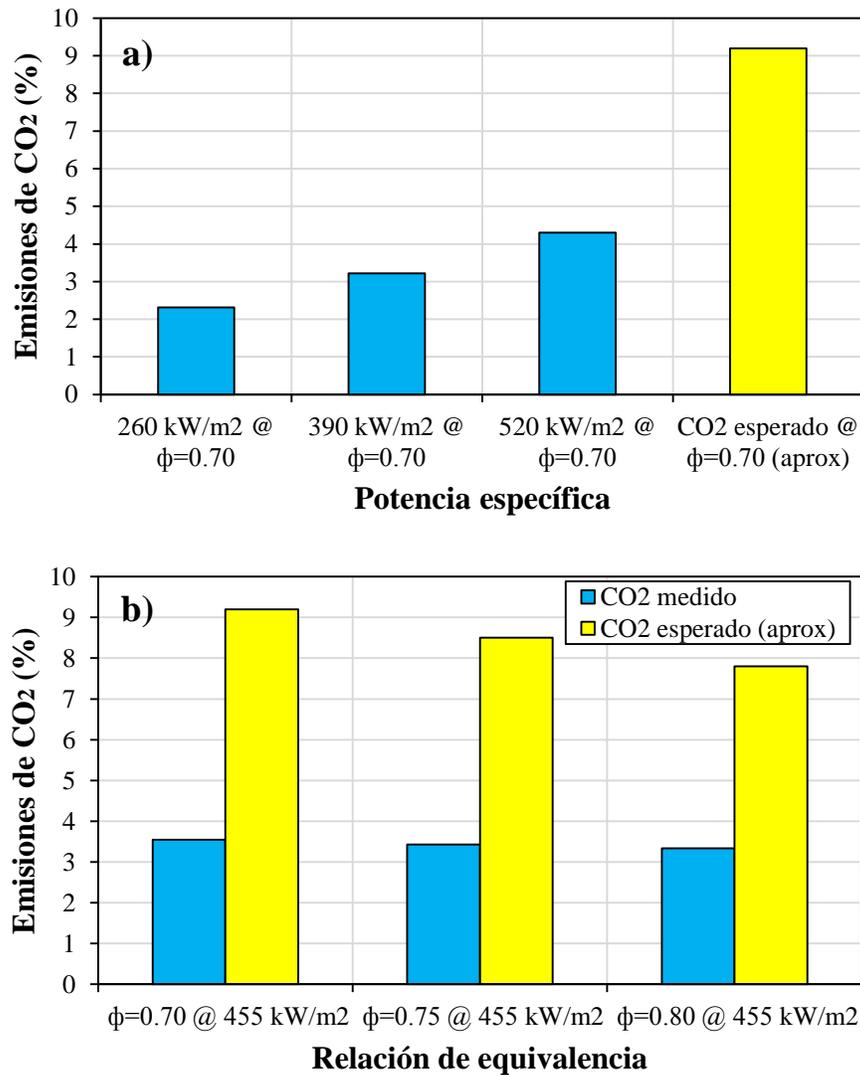
El primer análisis fue evaluar el porcentaje de CO<sub>2</sub> (en volumen) en la cámara de combustión a una posición cercana a la zona de reacción, sin correcciones y en base seca. Estas emisiones fueron tomadas aproximadamente a 4 cm por encima de la superficie del medio poroso y se compararon con los valores que teóricamente deberían registrarse, para relaciones de equivalencia entre  $\phi=0.7$  y  $\phi=0.8$ , si no se presentara recirculación de gases, indicando que el CO<sub>2</sub> no está diluido, de acuerdo a la teoría de equilibrio químico (CombuGas).

En la Figura 60 a) y Figura 60 b) se puede ver que el porcentaje de CO<sub>2</sub> (en volumen) dentro de la cámara de combustión está por debajo del valor de CO<sub>2</sub> teórico a su correspondiente relación de equivalencia, lo cual es una señal de que las corrientes de recirculación son generadas como resultado del confinamiento. Adicionalmente, en la Figura 60 a) se presenta el porcentaje de CO<sub>2</sub> (en volumen) en función de la potencia específica, en donde a medida que aumenta la potencia específica, la concentración de CO<sub>2</sub> es mayor, indicando que a mayor potencia específica, menor es el efecto de la recirculación de gases en la combustión. Asumiendo que la teoría de Craya-Curtet [10] pudiera aplicarse a llamas de premezcla y teniendo en cuenta que la tasa de aireación es  $n = \dot{m}_a / (\dot{m}_f m_{a,stoich})$ , que el impulso es  $I = \dot{m}v$ , que el flujo másico de los productos de la combustión  $\dot{m}_h = \dot{m}_g + \dot{m}_a$ , donde  $\dot{m}_a$  y  $\dot{m}_g$  son el flujo másico de aire y gas, respectivamente,  $m_{a,stoich}$  es la relación de masa estequiométrica de aire y  $v$  es la velocidad del gas, es posible escribir el parámetro de Craya-Curtet ( $m = \frac{I_g}{I_h} + \frac{I_a}{2I_h} - \frac{1}{2}$ ) de la siguiente manera:

$$m = \frac{1}{\rho_g A_i (1 + m_{a,stoich} n)^2 \rho_h A_s} + \frac{m_{a,stoich}^2 n^2}{\rho_a A_i (1 + m_{a,stoich} n)^2 \rho_h A_s} - \frac{1}{2} \quad \text{Ec 38}$$

En la expresión anterior  $\rho_g$ ,  $\rho_a$  y  $\rho_h$  son las densidades del combustible, el aire y gases de combustión, respectivamente,  $A_i$  es el área transversal de un poro y  $A_s$  es el área transversal de la cámara de combustión. Al incrementar la potencia específica, la temperatura del medio poroso disminuye, de manera que la temperatura de la premezcla también disminuye, entonces  $\rho_g$  y  $\rho_a$  aumentan, mientras que la temperatura de lama adiabática disminuye por lo que  $\rho_h$  aumenta. Teniendo en cuenta que el factor de recirculación es proporcional al parámetro de Craya-Curtet y que  $\rho_g$ ,  $\rho_a$  y  $\rho_h$  aumentan cuando la potencia específica es mayor, entonces  $m$  disminuye, lo que implica que el factor de recirculación disminuye.

El análisis anterior del CO<sub>2</sub> esperado también se realizó para observar el efecto de la relación de equivalencia a potencia específica constante (Figura 60 b), encontrando que también se evidencian diferencias entre los valores medidos y los esperados, corroborando así la existencia de las corrientes de recirculación.

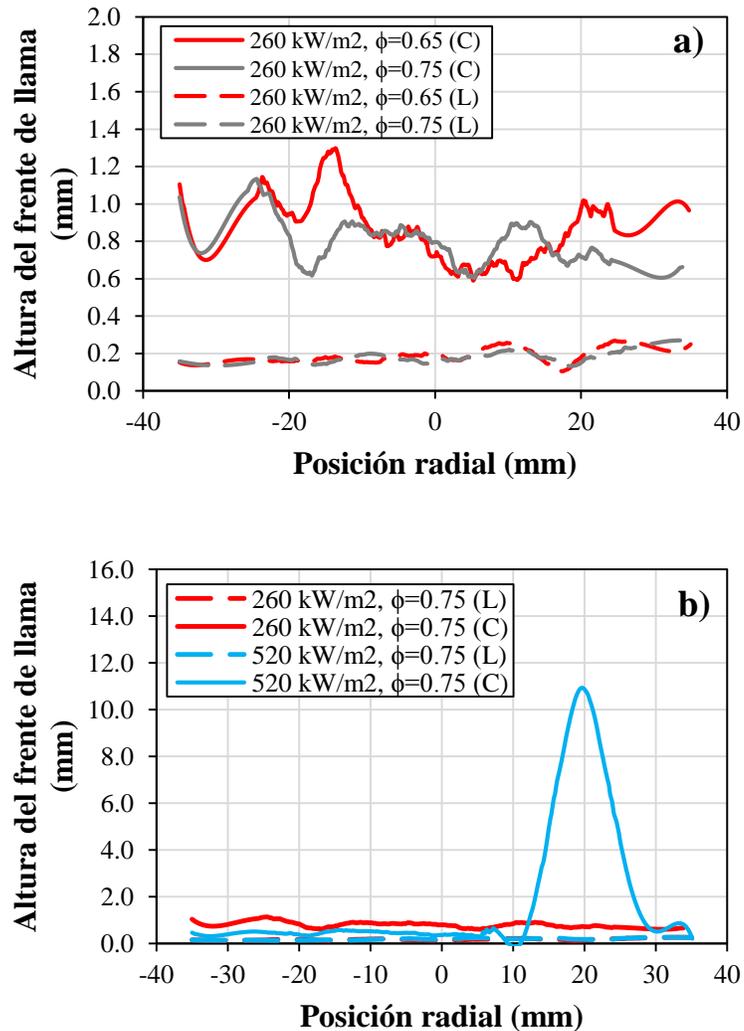


**Figura 60. Comparación de las emisiones de CO<sub>2</sub> con respecto al valor esperado: a) Efecto de la potencia específica, b) Efecto de la relación de equivalencia.**

El segundo aspecto evaluado para verificar la presencia de las corrientes de recirculación fue la comparación de la altura del frente de llama confinada versus llama libre. Para ello, se tomaron puntos representativos de ambas condiciones como se muestra en la Figura 61. Los resultados muestran que al confinar la llama se incrementa la altura del frente de llama con respecto a la superficie del quemador, lo cual da una evidencia de que las corrientes de recirculación afectan la combustión, ya que los gases quemados se diluyen con los gases de la premezcla en el espacio entre el frente de llama y la superficie del medio poroso (zona muerta) disminuyendo  $S_L$  (sección 2.7.1) y como consecuencia el frente de llama se equilibra en una zona más alta como se muestra en la Figura 61 a). Este efecto es más apreciable en la Figura 61 b) en donde se evalúa la variación de la potencia específica para una relación de equivalencia constante.

También se puede observar un fenómeno interesante y es que para la condición 260 kW/m<sup>2</sup> y  $\phi=0.75$  en llama confinada se produjo el fenómeno termo-acústico, pero la llama está más lejana de

la superficie del quemador en comparación con la llama libre y es muy similar a  $\phi=0.65$ , lo cual indica que la altura del frente de llama no es por si sola un indicio de que se presentará inestabilidades termo-acústicas, sino que deben evaluarse otros parámetros como lo la energía acústica generada y su tasa de disipación para poder establecer condiciones más precisas de la generación de este fenómeno.



**Figura 61. Comparación de la altura del frente de llama con respecto a la superficie del medio poroso para una llama confinada y una llama libre. (C): Confinada, (L): Libre.**

Si se compara la altura máxima del frente de llama entre una llama confinada y una libre se encuentra que, por ejemplo, para 260 kW/m² y  $\phi=0.65$  hay un aumento del 382 % al pasar de una llama libre a una confinada, debido a que bajo estas condiciones de operación se generan corrientes de recirculación de los productos de combustión y que por difusión molecular se mezclan en la zona muerta con la premezcla  $\text{CH}_4/\text{aire}$  que está ingresando a la cámara de combustión, diluyéndola y como consecuencia, la velocidad de deflagración laminar disminuye, lográndose el equilibrio en una zona más lejana a la superficie del quemador.

Otro de los análisis relacionados con la recirculación es cómo esta varía si se utiliza un medio poroso estructurado comparado a un ducto sin medio poroso. Para analizar este aspecto se toma como base un caso práctico en donde se tiene una premezcla con un determinado flujo de impulso  $I_s$  el cual es descargado a través de un ducto y se comparará con el impulso de descargado a través del medio poroso  $I_m$ .

En la expresión de la se muestra cómo se define el impulso.

$$I_g = \dot{m}_g V_g \quad \text{Ec 39}$$

Donde  $I_g$  es el impulso del gas,  $\dot{m}_g$  es el flujo másico del gas y  $V_g$  es la velocidad del gas.

Este análisis se realizará teniendo en cuenta que el área transversal y la velocidad de un canal del medio poroso es igual a:

$$A_p = \frac{A_T \gamma}{N} \quad \text{Ec 40}$$

$$V_{g,m} = \frac{V_{g,s}}{\gamma} \quad \text{Ec 41}$$

Siendo  $A_p$  es área de la sección transversal de un canal del medio poroso,  $A_T$  el área total de la sección transversal del ducto,  $N$  el número de canales del medio poroso,  $V_{g,s}$  es la velocidad de la premezcla cuando se tiene un ducto y  $V_{g,m}$  es la velocidad dentro de un canal del medio poroso.

Impulso para un ducto en términos del área de su sección transversal, la densidad ( $\rho$ ) y la velocidad:

$$I_s = (\rho V_{g,s} A_T) V_{g,s}$$

$$I_s = \rho A_T V_{g,s}^2 \quad \text{Ec 42}$$

De la misma manera, se expresa el impulso para un canal de un medio poroso:

$$I_m = (\rho V_{g,m} A_p) V_{g,m} = \rho \left( \frac{A_T \gamma}{N} \right) V_{g,m}^2 = \rho \frac{A_T \gamma}{N} \left( \frac{V_{g,s}}{\gamma} \right)^2$$

$$I_m = \rho \frac{A_T V_{g,s}^2}{N \gamma} \quad \text{Ec 43}$$

Al dividir Ec 42 y Ec 43 se tiene:

$$\frac{I_s}{I_m} = \frac{\rho A_T V_{g,s}^2}{\rho \frac{A_T V_{g,s}^2}{N \gamma}}$$

$$\frac{I_s}{I_m} = N \gamma \quad \text{Ec 44}$$

En la Ec 44,  $N$  puede escribirse en términos de parámetros geométricos del medio poroso de acuerdo a la siguiente expresión:

$$N = CPSI \times A_T \quad \text{Ec 45}$$

Así, la Ec 44 se convierte en:

$$\frac{I_s}{I_m} = CPSI \times A_T \times \gamma \quad \text{Ec 46}$$

La Ec 44 y Ec 46 permiten concluir a partir de parámetros geométricos de un medio poroso estructurado (generalmente suministrados por el fabricante), que a mayor cantidad de poros (CPSI) o una baja porosidad, los impulsos en la salida del medio poroso son menores con respecto a una descarga a través de un ducto. Esto se debe a que si bien la velocidad del flujo se incrementa dentro de cada poro, el flujo másico total se distribuye en cada poro, lo cual tiene un gran efecto en los impulsos

### 4.3.3 Emisiones de gases y perfiles de temperatura

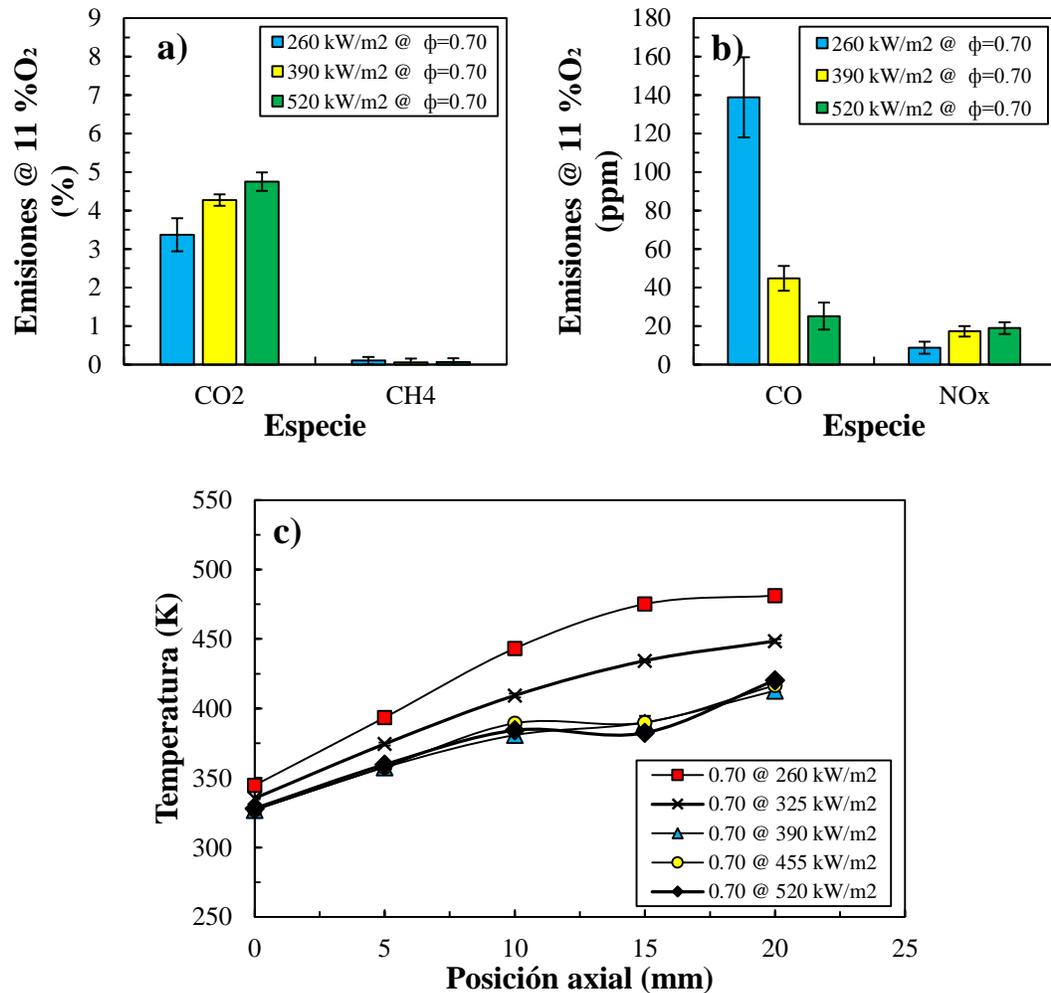
Las emisiones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ , y  $\text{NO}_x$  se muestran en la Figura 62, las cuales fueron corregidas con un oxígeno de referencia del 11 %. En la Figura 62 a) y Figura 62 b) se muestra el efecto que tiene la potencia específica, donde las variaciones del  $\text{CO}_2$  no son considerables, pero sí las de  $\text{CO}$ , el cual muestra un comportamiento interesante, ya que se obtiene una disminución de aproximadamente el 82 % al pasar de una potencia de  $260 \text{ kW/m}^2$  a  $520 \text{ kW/m}^2$ . Este resultado fue reportado anteriormente por Arrieta y Amell [89] quienes atribuyen este comportamiento a que si el medio poroso está a mayor temperatura quiere decir que la llama se encuentra más “fría”, evitando que se dé la oxidación del  $\text{CO}$  en  $\text{CO}_2$  ( $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ ), ya que en temperaturas por debajo de  $1100 \text{ K}$  se detiene la reacción  $\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{O}$ , desfavoreciendo la producción de radicales  $\text{OH}$ .

Esta explicación tiene coherencia con los resultados obtenidos del perfil de temperatura del medio poroso de la Figura 62 c) donde la posición cero (0) corresponde a la entrada de la premezcla aire/metano. En la figura se observa que las mayores temperaturas del medio poroso se obtienen en bajas potencias específicas. Es importante destacar que el máximo error obtenido en las mediciones del perfil de temperatura fue de  $\pm 9 \text{ K}$  y por lo que las barras de error no se aprecian en los gráficos.

Para comprender mejor este fenómeno basta con usar el concepto de la primera ley de la termodinámica la cual postula que “la energía no se crea, ni se destruye, sólo se transforma” por consiguiente si la llama sufre una pérdida de energía, que es capturada por el medio poroso (o las paredes) aumentando su temperatura. Esto ocurre debido a que en potencias específicas bajas (menor velocidad del flujo) la llama está más cerca del material poroso y por lo tanto éste puede aumentar más su temperatura; caso contrario sucede cuando se aumenta la velocidad del flujo (mayor potencia específica) en donde para la misma relación de equivalencia, la llama se aleja de la superficie del medio poroso y por ende éste se calienta en menor proporción.

Otro de los resultados experimentales obtenidos de gran interés, es a que partir de cierta potencia específica el medio poroso no se calienta considerablemente cuando se fija la relación de equivalencia, ya que a pesar de aumentar la potencia específica, la temperatura del medio poroso no presenta cambios significativos tal como se observa en la Figura 62 c).

Si se tiene en cuenta el análisis anterior, la tendencia del aumento de los  $\text{NO}_x$  al aumentar la potencia específica es comprensible partiendo del hecho de que si el medio poroso tiene temperaturas más bajas cuando el quemador opera en altas potencias específicas, entonces la temperatura de la llama es mayor y por ende se favorece la formación de estas especies contaminantes. El incremento de las emisiones de  $\text{NO}_x$  al pasar de una potencia específica de  $260 \text{ kW/m}^2$  a  $520 \text{ kW/m}^2$  para  $\phi=0.70$  es del 118 %. Finalmente, es de resaltar que el metano es totalmente consumido ya que sus valores son cercanos a cero.



**Figura 62. Efecto de la potencia específica: a-b) Emisiones contaminantes, c) Perfil de temperatura.**

Asimismo, al dejar constante la potencia específica y aumentar la relación de equivalencia, las emisiones de CO también disminuyen, como puede observarse en la Figura 63 b), lo cual se debe a que al aumentar la relación de equivalencia también incrementa la temperatura de llama favoreciendo la oxidación del CO. La disminución al pasar de  $\phi=0.70$  a  $\phi=0.80$  es de aproximadamente el 62 %. Con respecto a las emisiones de  $\text{NO}_x$  se puede observar que estas aumentan, debido que como se mencionó anteriormente, la temperatura de llama incrementa favoreciendo la formación del  $\text{NO}_x$  que, en este caso, al pasar de  $\phi=0.70$  a  $\phi=0.80$  se incrementa aproximadamente un 143 %.

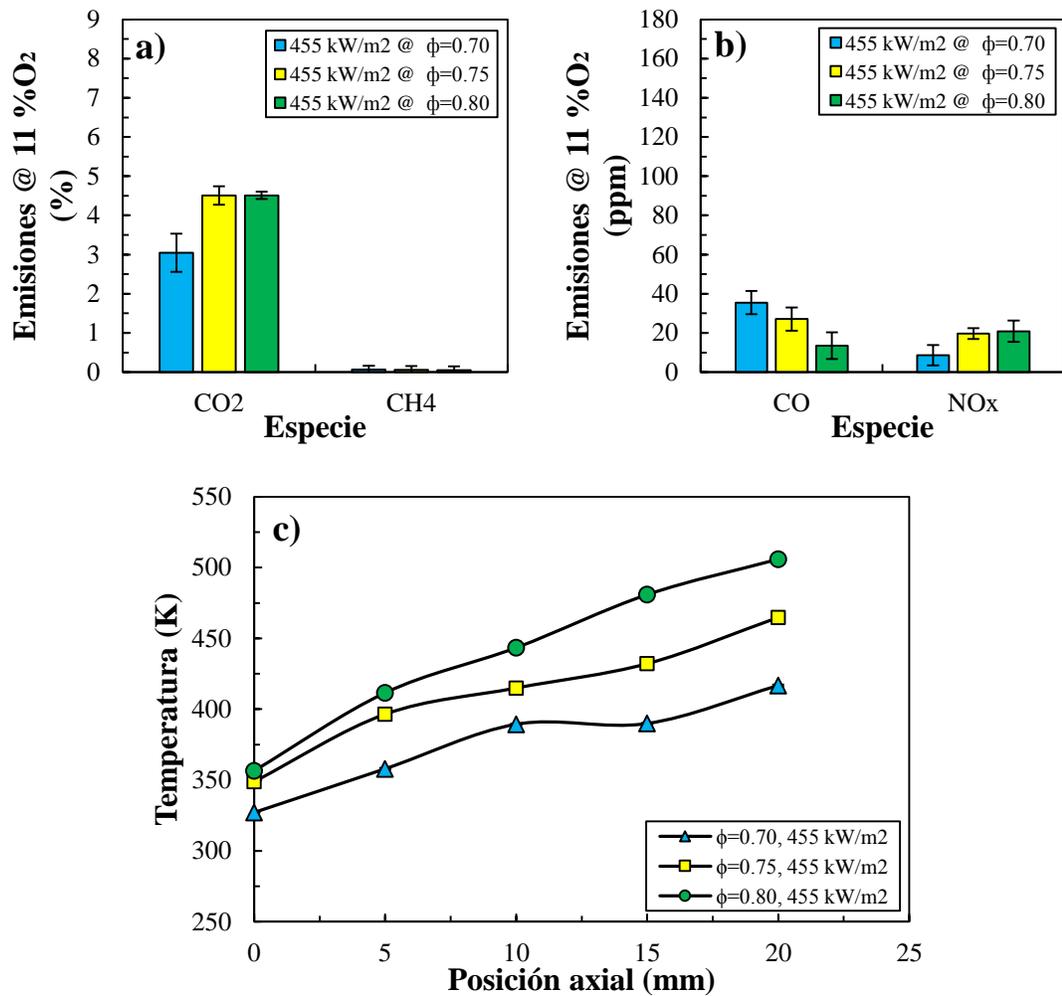


Figura 63. Efecto de la relación de equivalencia: a-b) Emisiones contaminantes, b) Perfil de temperatura.

También se realizaron mediciones de gases de combustión en una zona cercana a la llama con el fin de determinar si las emisiones de gases son alteradas considerablemente con respecto al punto de medición cercano a la salida del quemador. En la Figura 64 se muestran los valores de las emisiones contaminantes tomadas a 5 cm de la superficie del medio poroso. Los resultados muestran que las diferencias son considerables en comparación con los resultados anteriores, lo cual indica que la oxidación del CO continúa a lo largo de la cámara de combustión. Sin embargo, las tendencias de los efectos ya sea de la relación de equivalencia o la potencia específica se conservan y tienen origen en las explicaciones ya mencionadas.

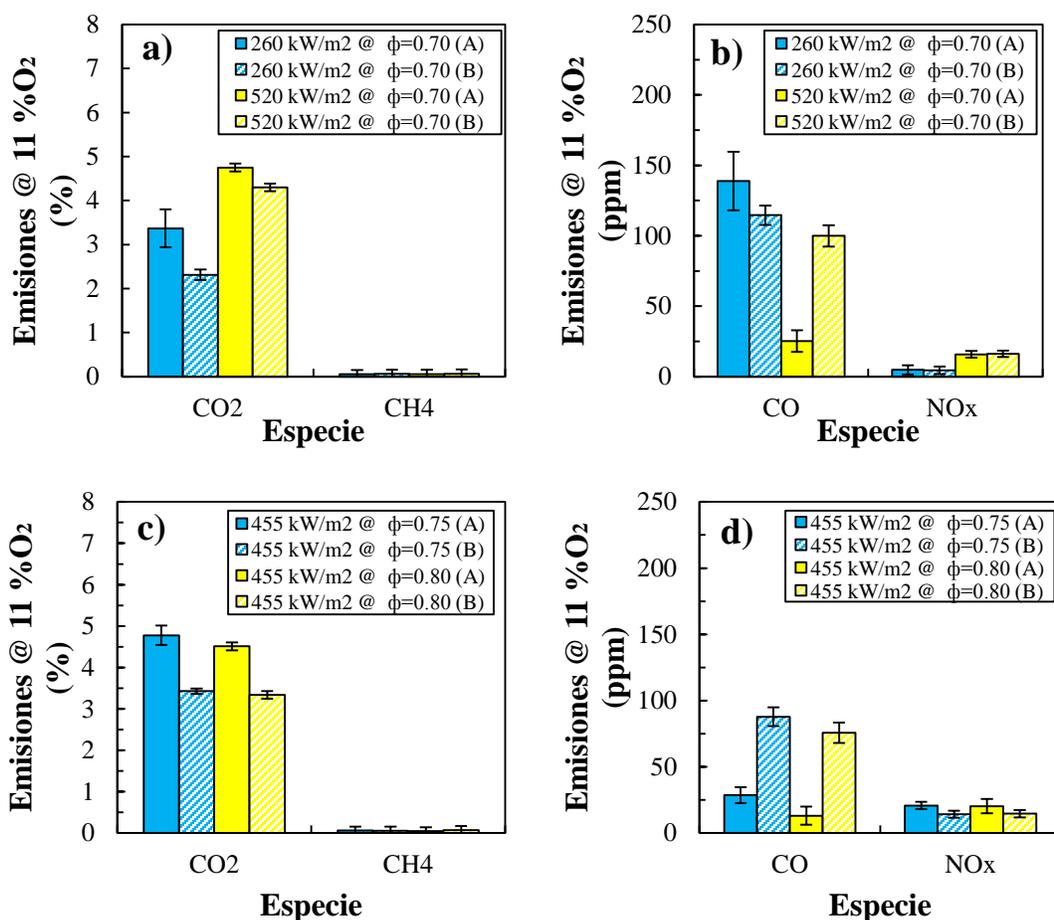


Figura 64. Variación de las emisiones contaminantes con respecto a la altura de la superficie del medio poroso: a-b) Efecto en la potencia específica, c-d) Efecto de la relación de equivalencia. A: punto de medición ubicado a 7 cm por debajo de la salida de la cámara de combustión, B: punto de medición a 5 cm de la superficie del medio poroso.

#### 4.3.3.1 Comparación de las emisiones contaminantes para una llama libre y una confinada, estabilizada sobre la superficie del medio poroso

En la Figura 65 se muestra la comparación de las emisiones contaminantes para una llama libre y una llama confinada. Los resultados muestran que las tendencias de la llama libre son iguales a la llama confinada. Teniendo en cuenta el análisis realizado en la sección 4.3.1.2 y 4.3.2, la tendencia del aumento de los NO<sub>x</sub> al aumentar la potencia específica es comprensible partiendo del hecho de que si el medio poroso tiene temperaturas más bajas cuando el quemador opera en altas potencias específicas, entonces la temperatura de la llama es mayor y por ende se favorece la formación de estas especies contaminantes, ya que la recirculación de los gases no afectan considerablemente la zona de reacción.

Lo anterior, es una evidencia más de que el régimen de transferencia de calor prima sobre el de la recirculación de gases, ya que en una llama libre con premezcla precalentada (sin medio poroso), la temperatura de llama es mayor y en consecuencia los NO<sub>x</sub> deben ser mayores con respecto a la condición confinada, que por efecto de la recirculación de gases disminuyen la temperatura de

llama. Sin embargo, el resultado reportado en la Figura 65 muestra lo contrario, ya que el efecto de la recirculación de gases no es significativo en la reducción de la temperatura de la llama y por ende, prevalece el calentamiento del medio poroso como consecuencia de la disminución del calor disipación a la atmósfera en el sistema confinado.

Se observa también que las emisiones de CO son menores para la llama libre cuando se fija la relación de equivalencia. Esto se debe a que al confinar la llama en una cámara de combustión se generan corrientes de recirculación, que se diluyen con los gases de premezcla generando combustión incompleta, lo cual se puede evidenciar también con las emisiones del CO<sub>2</sub> en la Figura 65 a) y Figura 65 c), en donde debido a la combustión incompleta las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyen, pero las de CO aumentan.

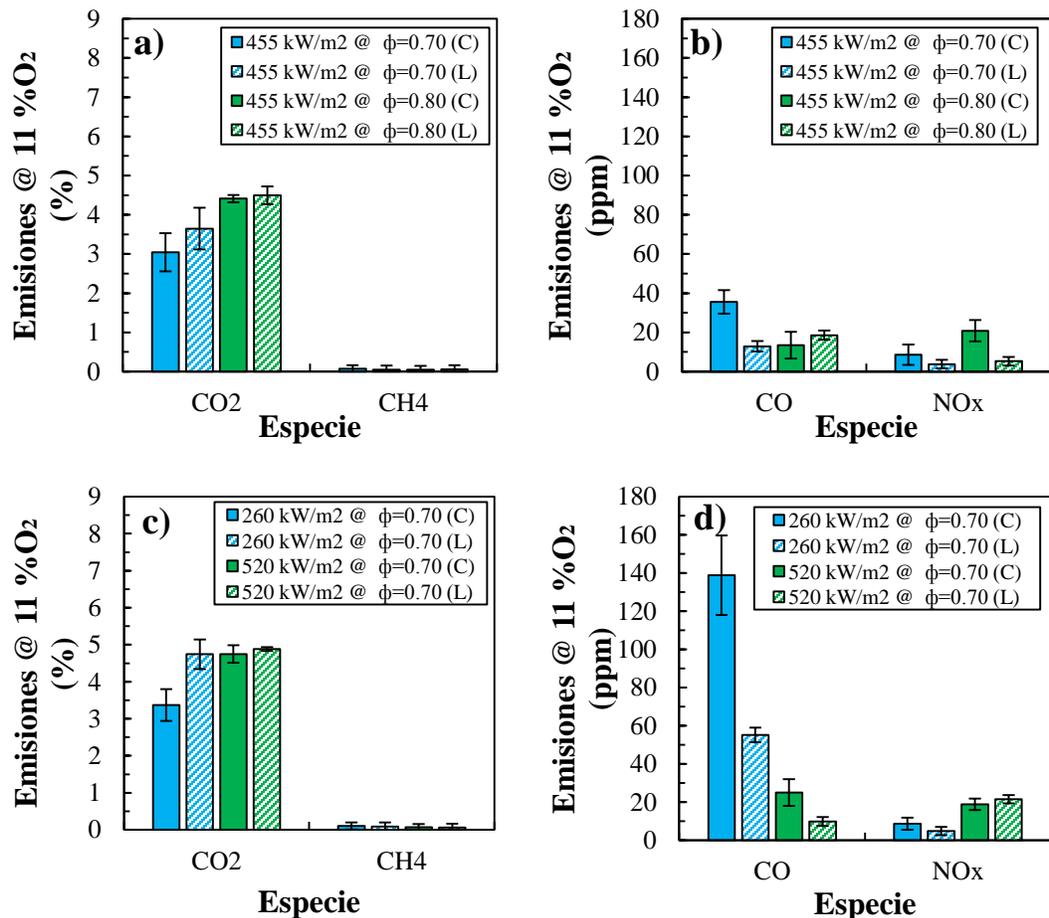
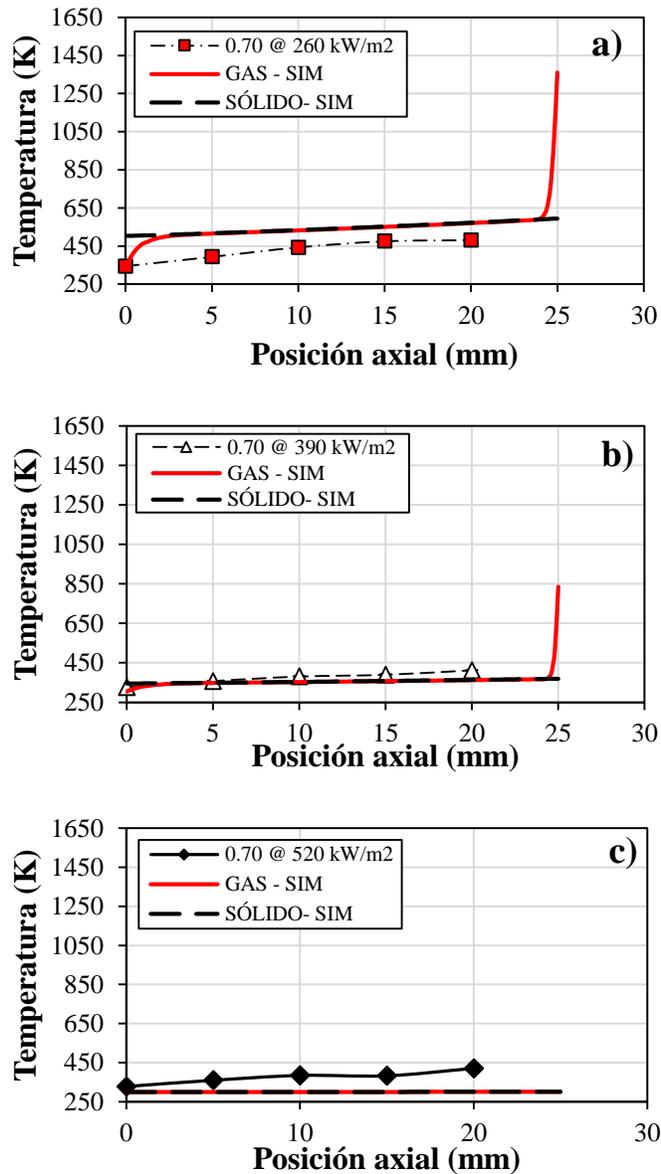


Figura 65. Comparación de emisiones contaminantes para una llama libre y confinada: a-b) Efecto de la relación de equivalencia, c-d) Efecto de la potencia específica. (C): Confinada, (L): Libre.

#### 4.3.3.2 Comparación del perfil de temperatura numérico y experimental

En la Figura 66 se muestra la comparación de los perfiles de temperatura experimentales y numéricos para algunos de los puntos de medición al interior del medio poroso.



**Figura 66. Comparación perfil de temperatura experimental y numérico.**

Lo primero que se observa es que el modelo no predice con una muy buena exactitud, pero si con buenas aproximaciones a los resultados experimentales lo cual es una señal del por qué el modelo logra capturar con buena aproximación el resultado de la estabilidad en la sección anterior. Como segundo aspecto, puede verse que en algunos casos como el de la Figura 66 b) en donde los resultados numéricos tienen una buena predicción con respecto a los resultados experimentales, sin embargo en los casos de las Figura 66 a) y c) se muestra que se subestima y sobreestima, respectivamente, el perfil de temperatura.

Una de las razones a las cuales se atribuye este comportamiento, es el considerar las paredes adiabáticas, que si bien es una simplificación del modelo para bajar el costo computacional tiene grandes impactos sobre los resultados obtenidos, como también el sólo considerar la radiación en la

superficie del medio poroso, que si bien puede ser despreciable por las propiedades emisivas del material, pueden tener un efecto importante en los resultados finales.

#### 4.3.3.3 Comparación de las emisiones contaminantes experimental y numérica

En la Figura 67 se muestra la comparación para algunos puntos de medición y simulaciones. Lo que se puede observar es que las simulaciones no capturan ni las tendencias, ni los valores aproximados de las mediciones experimentales. Lo anterior, se debe a que el mecanismo cinético utilizado es un mecanismo simplificado que fue seleccionado teniendo en cuenta el costo computacional, pero como se observa en la figura se sacrifica precisión porque no se tienen en cuenta especies que están presentes en el proceso de reacción, como por ejemplo los NOx.

Estos resultados dan señales también del porqué la morfología de la llama presenta comportamientos diferentes entre los resultados numéricos y experimentales, tal como se mostró en las secciones 4.2.1 y 4.3.1. Adicional a lo anterior, se debe tener en cuenta que sólo se asumió radiación térmica en la superficie del medio poroso y no en las paredes, lo cual también afecta el proceso de combustión y por lo tanto el resultado final de las emisiones contaminantes.

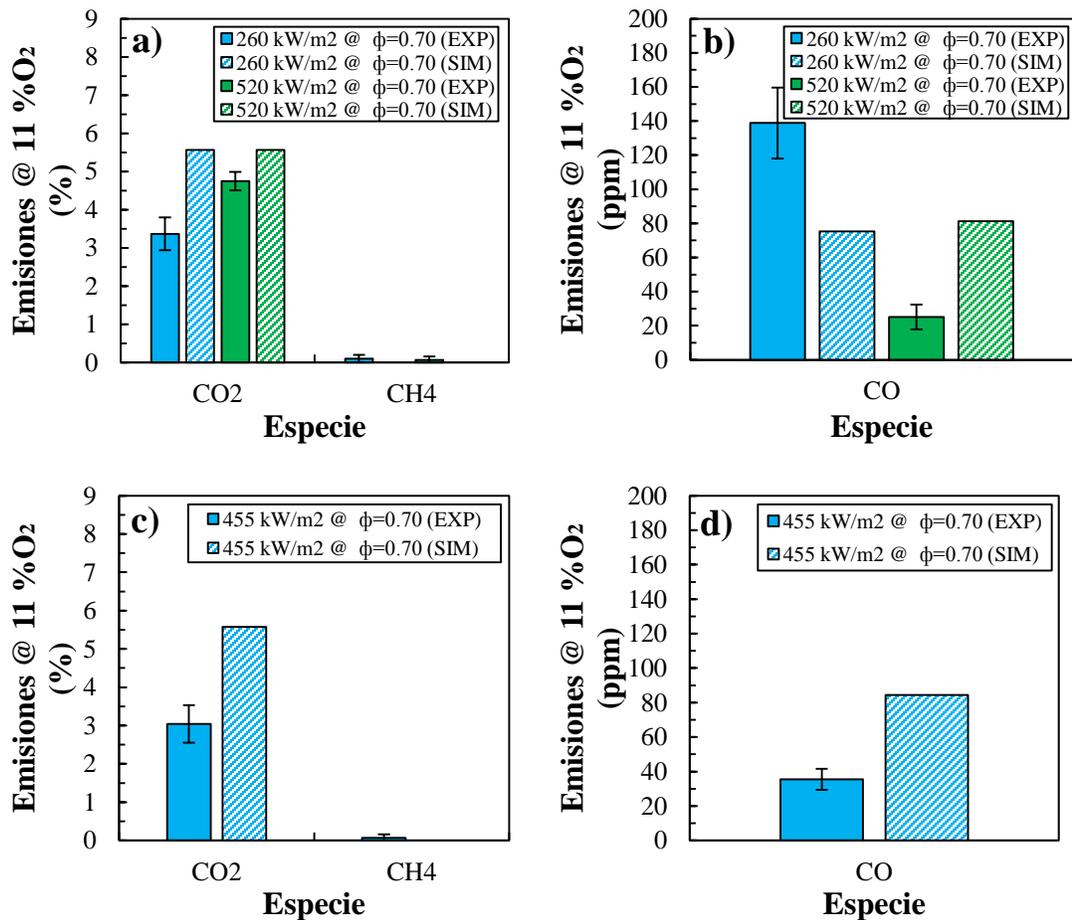


Figura 67. Comparación de las emisiones contaminantes numérica y experimentalmente: a-b) Relación de equivalencia constante, c-d) Potencia específica constante.

#### 4.3.4 Intensidad del sonido

Se realizaron mediciones de la intensidad del sonido para diferentes condiciones de operación del quemador con el fin de analizar el efecto de modificar la potencia específica y la relación de equivalencia. Para ello, en la Figura 68 se muestra la intensidad del sonido en función de la frecuencia, captada por el sonómetro. Se observa que las mayores intensidades de sonido se logran a frecuencias entre 400 Hz y 1250 Hz. Sin embargo, con el fin de determinar el efecto que tienen los parámetros anteriormente mencionados, se determinó la frecuencia natural de las ondas para un cuarto de tubo. Para esto se estimó la velocidad del sonido de acuerdo a la temperatura de gases dentro de la cámara de combustión. Estos valores se encuentran entre 518 m/s y 598 m/s, los cuales dan como resultado frecuencias naturales entre 807 Hz y 882 Hz. Teniendo en cuenta lo anterior si se analiza la frecuencia de 800 Hz de la Figura 68 (frecuencia más cercana a los valores estimados) se puede observar que al aumentar la relación de equivalencia para una potencia específica constante, el nivel de ruido aumenta, mientras que al aumentar la potencia específica fijando la relación de equivalencia, el nivel de ruido disminuye.

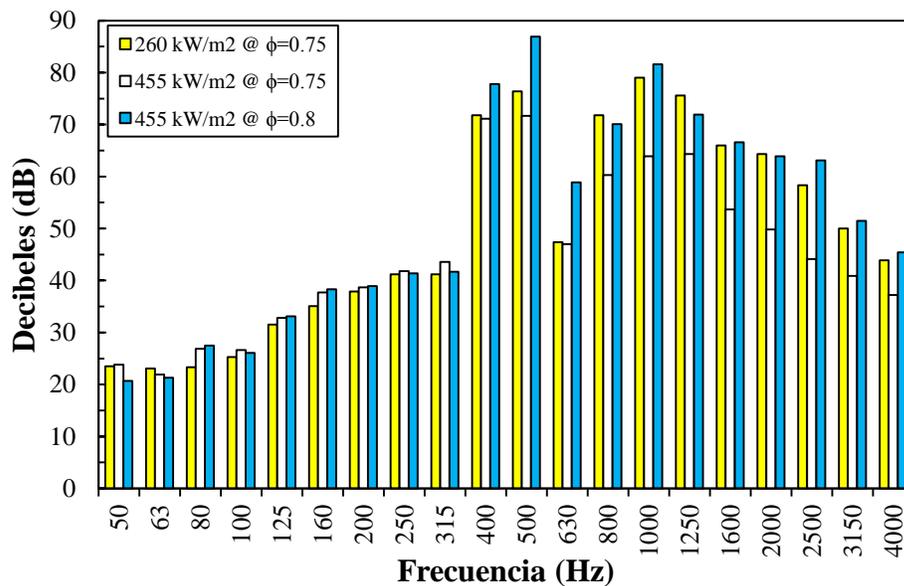


Figura 68. Intensidad del sonido en función de la frecuencia.

Como se explicó anteriormente, el fenómeno se da debido a que el campo de presión y la tasa de liberación de calor están en fase y además, la energía acústica generada es mayor que la disipada. Sin embargo, el fenómeno se atenúa ya sea disminuyendo la relación de equivalencia o aumentando la potencia específica, lo cual da indicios de que las llamas cercanas a la superficie del quemador tienen una relación muy estrecha con la generación de este fenómeno, pero se deja como recomendación para trabajos futuros profundizar acerca de esta posible dependencia, ya que en condiciones de combustible/aire más pobre no se presentó la inestabilidad.

Asimismo, los resultados anteriores, indican que a mayores tasas de liberación de calor con fluctuaciones en el campo de flujo, es mayor la probabilidad de que se presente el fenómeno termoacústico. Esto se debe a que, en relaciones de equivalencia cercanas a la estequiométrica, hay una mayor tasa de liberación de calor y si además se presentan fluctuaciones en el campo de flujo, las condiciones para que el fenómeno de inestabilidad aparezca son mayores.

Por otra parte, también se hizo un análisis del efecto que se tiene el cambio de sección de salida de la cámara de combustión de 12 cm x 12 cm (S1) a 6 cm x 6 cm (S2), sobre el fenómeno termoacústico. La Figura 69 muestra los resultados de la intensidad del sonido para la misma condición de relación de equivalencia y potencia específica, pero con secciones de salida de cámara de combustión diferentes. Los resultados muestran que al obstruir la sección de salida de los gases de combustión, la intensidad del sonido generado disminuye, especialmente en la región de interés que corresponde a 800 Hz. El cambio de sección tiene un efecto muy importante sobre la aerodinámica del flujo, y es tal que el rango de operación del quemador se modifica, como se muestra en la Figura 70, en donde ya no hay una región determinada en las que se da el fenómeno termo-acústico, sino condiciones puntuales (marcadores amarillos). Lo anterior se debe a que al cambiar la sección de salida del quemador, se modifica la aerodinámica al interior de la cámara de combustión y por ende se favorece la no generación del fenómeno.

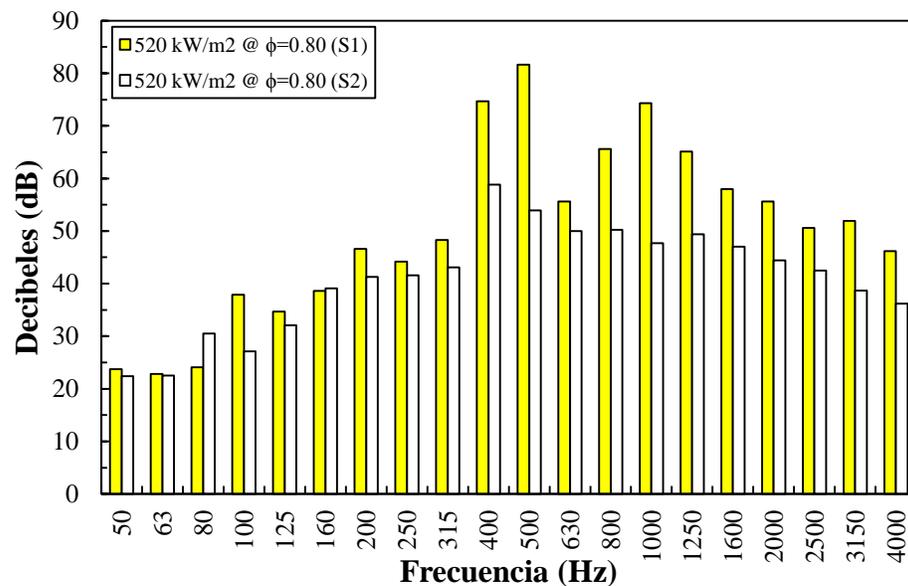


Figura 69. Comparación del nivel del sonido para secciones de salida de la cámara de combustión diferentes.

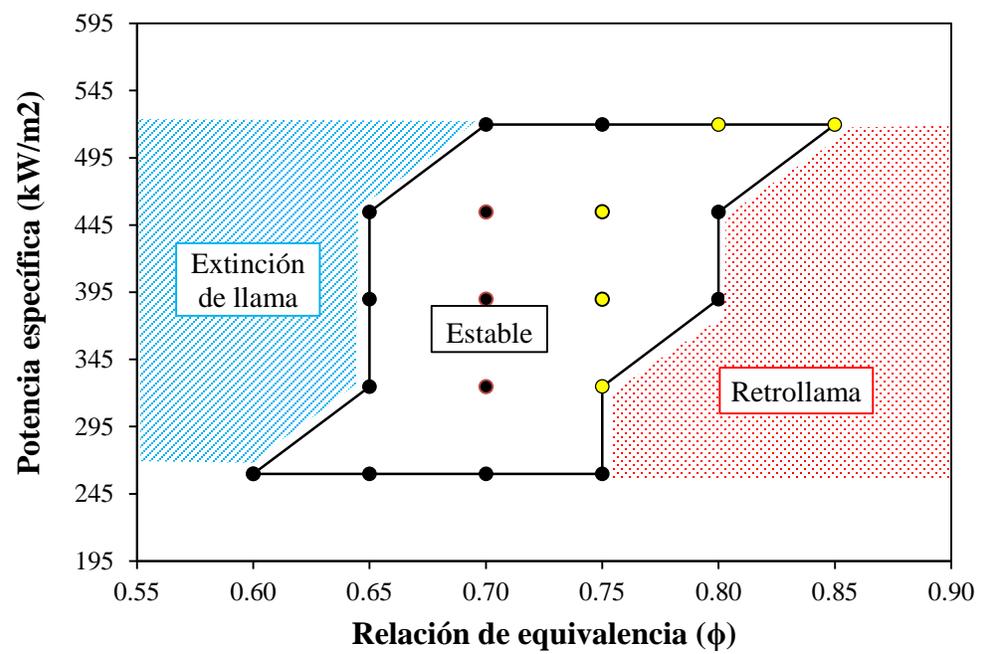


Figura 70. Rango de operación con una sección de salida de 6 cm x 6 cm. Marcadores amarillos: fenómeno termo-acústico.

# Conclusiones

En el presente trabajo se analizó el comportamiento de la combustión estabilizada en la superficie de un medio poroso confinado. Para ello se hicieron análisis teóricos, numéricos y experimentales que permitieron encontrar fenómenos interesantes. De todos los resultados de este trabajo se puede concluir lo siguiente:

- El análisis teórico del número de Peclet sirve como un parámetro inicial en la evaluación de los sistemas de combustión con medios porosos. Sin embargo, éste por sí sólo no permite determinar el rango de operación de un quemador que utilice medios porosos con combustión en la superficie.
- El modelo implementado en las simulaciones numéricas permitió dar una mayor aproximación al rango de estabilidad que la evaluación del número de Peclet. Sin embargo, el modelo no predice con exactitud todos los fenómenos encontrados experimentalmente, como por ejemplo, la generación del fenómeno termo-acústico por lo cual es un aspecto que puede mejorarse del modelo.
- El modelo utilizado en las simulaciones numéricas logra capturar llamas estables, desprendimientos y retrollamas, dando una buena aproximación al rango de operación del sistema con respecto a los resultados experimentales.
- Si bien con las suposiciones planteadas en el modelo se logra capturar muchas de los fenómenos de estabilidad, no permite evaluarlos todos. Por ejemplo, no se captura la extinción de llama, sin embargo, teniendo en cuenta que para determinar el rango de operación fueron necesarias 15 simulaciones numéricas, las suposiciones planteadas fueron acertadas si se tiene en cuenta que los resultados obtenidos de las simulaciones con respecto a la estabilidad y perfiles de temperatura del medio poroso son aproximados a los experimentales y además se reduce considerablemente el tiempo computacional.
- Los resultados numéricos de la morfología de la llama confinada muestran que mientras éstas son estables son totalmente planas, dejando un espacio muerto entre el frente de llama y la superficie del quemador, y cuando están desprendidas toman la forma de un quemador bunsen, es decir, un frente de llama plano, pero con morfología cónica, lo cual experimentalmente no se presenta y por el contrario cuando se desprende el frente de llama es muy irregular.
- Las simulaciones numéricas permiten establecer que al aumentar la relación de equivalencia con potencia específica constante, el espacio muerto entre el frente de llama y la superficie del medio poroso disminuye. Esto mismo ocurre cuando se fija la relación de equivalencia y se disminuye la potencia específica.
- Se lograron predecir numéricamente los perfiles de temperatura al interior del medio poroso, aunque en comparación con los resultados experimentales en algunos casos se sobreestima y en otros se subestima la temperatura con respecto a los resultados experimentales.
- El rango de operación de una llama libre difiere de una llama confinada.

- El confinamiento de la llama induce corrientes de recirculación de gases de combustión que afectan el rango de estabilidad. La presencia de las corrientes de recirculación de gases fue demostrada, primero, por el menor porcentaje de  $\text{CO}_2$  en la cámara de combustión con respecto a la condición de equilibrio químico de los productos de la combustión sin recirculación; y segundo, por el cambio de la altura del frente de llama con respecto a la superficie del honeycomb utilizando la técnica OH-PLIF.
- La técnica OH-PLIF permite determinar con gran exactitud la ubicación del frente de llama, ya que se pueden tener relaciones de pixeles/mm entre 9-10 lo cual brinda la posibilidad de una gran precisión.
- Los efectos de las corrientes de recirculación de gases sobre la zona de reacción son menores en comparación con el efecto del régimen de transferencia de calor, tanto desde el punto de vista de emisiones, como del rango de estabilidad de una llama confinada respecto a una llama no confinada. Además, las simulaciones numéricas muestran que la zona de mayor recirculación de gases de combustión se encuentra por encima del frente de llama y además son muy pequeñas, de tal forma que si bien puede afectarlo, no es comparable al efecto del régimen de transferencia de calor.
- El perfil de temperatura del medio poroso de una llama libre es menor al de una llama confinada, favoreciendo el flux hacia el medio poroso. Sin embargo, a partir de cierta potencia específica el honeycomb deja de calentarse y toma valores muy similares, lo cual para el caso de  $\phi=0.70$  se da a partir de  $390 \text{ kW/m}^2$ .
- Se analizó experimentalmente la morfología de la llama mediante el uso de la técnica OH-PLIF y de un código de post-procesamiento de imágenes que permite observar dónde está ubicado el frente de llama. Este análisis permitió establecer que si bien el fenómeno acústico se da cuando las llamas están cercanas a la superficie del quemador, esto no es condición única para que se genere el fenómeno, ya que otras llamas a aproximadamente la misma altura con respecto a la superficie del medio poroso no presentaron la inestabilidad. Adicionalmente, este análisis mostró cómo aumenta la altura del frente de llama al aumentar la potencia específica o disminuir la relación de equivalencia.
- Las emisiones de CO son mayores a bajas potencias específicas cuando la relación de equivalencia es constante. A temperaturas por debajo de  $1100 \text{ K}$ , se desfavorece la formación del radical OH, que es la principal especie para la oxidación del CO.
- Se encontró que cuando la potencia específica es constante y se incrementa la relación de equivalencia, las emisiones de CO disminuyen.
- Las emisiones de  $\text{NO}_x$  son menores a bajas potencias específicas, mientras la relación de equivalencia es constante. Sin embargo, cuando la potencia específica permanece constante y se incrementa la relación de equivalencia, el  $\text{NO}_x$  incrementa.
- El incremento de las emisiones de  $\text{NO}_x$  al pasar de una potencia específica de  $260 \text{ kW/m}^2$  a  $520 \text{ kW/m}^2$  es de aproximadamente el 27 % para  $\phi=0.70$ .
- Para la potencia específica de  $260 \text{ kW/m}^2$  y variación de la relación de equivalencia desde  $\phi=0.65$  hasta  $\phi=0.75$ , la altura del frente de llama (o espacio muerto), con respecto a la superficie del medio poroso es radialmente uniforme. Para parejas de potencia

específica/relación de equivalencia de  $260 \text{ kW/m}^2/\phi=0.60$  y  $520 \text{ kW/m}^2/\phi=0.75$ , la distribución radial de la altura del frente de llama no es uniforme.

- La ocurrencia de inestabilidades termo-acústicas disminuyen la región segura y operación estable de la llama estabilizada en la superficie del medio poroso. El área de estabilidad sin extinción de llama, inestabilidades termo-acústico y retrollama, sólo es posible entre relaciones de equivalencia de  $\phi=0.6$  a  $\phi=0.75$  y potencias específicas dentro de los siguientes rangos:  $260 \text{ kW/m}^2$  a  $320 \text{ kW/m}^2$ ,  $320 \text{ kW/m}^2$  a  $445 \text{ kW/m}^2$  y  $445 \text{ kW/m}^2$  a  $520 \text{ kW/m}^2$ .
- El fenómeno termo-acústico se genera en relaciones de equivalencia más cercanas a la estequiométrica. Sin embargo, si las condiciones de flujo se modifican puede darse que el fenómeno desaparezca como fue el caso de pasar de  $455 \text{ kW/m}^2$  a  $520 \text{ kW/m}^2$  en  $\phi=0.75$ , en donde para el primero se daba el fenómeno termo-acústico, pero en el segundo desaparece.
- Otra de las maneras de afectar el campo acústico es cambiando el área de la sección de salida del quemador. Esto hace que el fenómeno se mitigue o desaparezca por completo, como por ejemplo, para  $260 \text{ kW/m}^2$  @  $\phi=0.75$  al disminuir la sección de salida del quemador de  $12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$  a  $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ , el fenómeno desapareció.
- El confinamiento amplía el rango de estabilidad desde el punto de vista del desprendimiento (se pueden tener relaciones de equivalencia más pobres), pero se es más sensible a la retrollama a medida que la premezcla se vuelve más rica. Sin embargo, el rango de estabilidad se reduce en comparación de un medio poroso con combustión en la superficie no confinada.
- La presencia de inestabilidades acústicas reduce el rango de operación de la combustión en modo superficie y la zona de reacción confinada.
- Un sistema de combustión en medio poroso en modo superficie en atmósfera libre, tiene mayor rango de estabilidad en comparación con el mismo sistema en condiciones confinadas.
- Las simulaciones numéricas no lograron capturar con precisión las tendencias de las emisiones contaminantes debido a las simplificaciones del modelo, tal como la utilización de un mecanismo cinético simplificado, asumir que las paredes son adiabáticas o el no considerar radiación de las paredes. Éste último debido a que en *ANSYS-Fluent* no es posible acoplar los modelos de radiación con el modelo de no-equilibrio del medio poroso.

# Recomendaciones para trabajos futuros

- Realizar un estudio más profundo acerca del fenómeno termo-acústico. Este estudio puede abordarse desde dos puntos de vista. El primero desde el análisis numérico de tal manera que se logre capturar el fenómeno en el rango de operación del quemador y el segundo el punto de vista experimental mediante el uso de sensores de presión con alta sensibilidad que permitan capturar las fluctuaciones dentro de la cámara de combustión y se pueda caracterizar en mayor detalle este fenómeno. Todo lo anterior partiendo de las bases teóricas de este fenómeno.
- Implementar otras UDF's en las simulaciones numéricas que permitan evaluar la radiación en todo el dominio para evaluar el rango de operación del equipo y si este tiene o no una gran influencia con respecto a los en los resultados experimentales. Adicionalmente, no asumir paredes adiabáticas y por el contrario analizar cómo la cantidad de calor que se pierde por las paredes puede afectar alguno de los parámetros característicos del medio poroso.
- Implementar técnicas de diagnóstico óptico para caracterizar la acústica mediante cámaras de alta velocidad que permitan observar cómo es el comportamiento en este tipo de quemadores.
- Realizar un estudio acerca de qué otros factores pueden influir en la variación de la tasa de liberación de calor.
- Realizar un estudio del régimen de transferencia de calor de tal manera que se pueda establecer el modo en que se transfiere el calor al honeycomb y las fronteras del sistema desde la llama de tal manera que se pueda generar un modelo.
- Evaluar diferentes cambios de geometrías de la sección transversal para analizar la atenuación o incremento de las inestabilidades acústicas.

# Bibliografía

- [1] International Energy Agency. Key World Energy Statistics 2015.
- [2] Trimis D, Durst F. Combustion in a Porous Medium-Advances and Applications Combustion in a Porous Medium- Advances and Applications. *Combust Sci Technol* 1996;121:153–68.
- [3] Mujeebu MA, Abdullah MZ, Bakar MZA, Mohamad AA, Muhad RMN, Abdullah MK. Combustion in porous media and its applications – A comprehensive survey. *J Environ Manage* 2009;90:2287–312.
- [4] Vafai K. Handbook of Porous Media, Second Edition. Second edi. CRC Press. Taylor & Francis Group; 2005.
- [5] Noordally E, Przybylski JM, Witton JJ. Porous media combustors for clean gas turbine engines. 2004.
- [6] Bakry A, Al-Salaymeh A, Al-Muhtaseb AH, Abu-Jrai A, Trimis D. Adiabatic premixed combustion in a gaseous fuel porous inert media under high pressure and temperature: Novel flame stabilization technique. *Fuel* 2011;90:647–58. doi:10.1016/j.fuel.2010.09.050.
- [7] Bakry A, Al-Salaymeh A, Al-Muhtaseb AH, Abu-Jrai A, Trimis D. Adiabatic premixed combustion in a gaseous fuel porous inert media under high pressure and temperature: Novel flame stabilization technique. *Fuel* 2011;90:647–58. doi:10.1016/j.fuel.2010.09.050.
- [8] El-Mahallawy F, Habik SE-D. Fundamentals and Technology of Combustion. Elsevier; 2002. doi:10.1016/B978-008044106-1/50006-1.
- [9] Magnussen BF. Prediction of characteristics of enclosed turbulent jet flames. *Proc Combust Inst* 1973;14:553–65.
- [10] Curtet R. Confined jets and recirculation phenomena with cold air. *Combust Flame* 1958;2:383–411.
- [11] Oyediran A, Darling D, Radhakrishnan K. Review of Combustion-acoustic Instabilities. 31st Jt. Propuls. Conf. Exhib., San Diego, CA: 1995, p. 16.
- [12] Sanmiguel JE, Mehta S a. (Raj), Moore RG. An Experimental Study of Controlled Gas-Phase Combustion in Porous Media for Enhanced Recovery of Oil and Gas. *J Energy Resour Technol* 2003;125:64. doi:10.1115/1.1510522.
- [13] Bedoya C, Habisreuther P, Zarzalis N, Prathap C, Ebrahimi H. Experimental Study on the Influence of Pressure on the Flame Stabilization in Porous Inert Media (PIM). Vol. 2 Combust. Fuels Emiss. Parts A B, ASME; 2012, p. 143. doi:10.1115/GT2012-68234.
- [14] Nakamura Y, Itaya Y, Miyoshi K, Hasatani M. Mechanism of methane-air combustion on

- the surface of a porous ceramic plate. *J Chem Eng JAPAN* 1993;26:205–11. doi:10.1252/jcej.26.205.
- [15] Bouma P., de Goeij LP. Premixed combustion on ceramic foam burners. *Combust Flame* 1999;119:133–43. doi:10.1016/S0010-2180(99)00050-4.
- [16] Addamane SR, Hajilou M, Belmont EL. Experimental and analytical study of a porous media reformer with passive air entrainment. *Int J Hydrogen Energy* 2016;41:12738–46. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.05.035.
- [17] Zheng XF, Feng Y, Jia MS. Experimental Investigation of Methane/Air Penetration Combustion and Flame Stability Characteristics on Porous Wall Surface. *Adv Mater Res* 2013;732–733:190–3. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.732-733.190.
- [18] García Vergara AM. Implementación de una técnica de diagnóstico láser para la evaluación de un mezclador con aplicación en quemadores de alta eficiencia. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica, 2016.
- [19] Mayinger F, Feldmann O, editors. *Optical Measurements: Techniques and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2001. doi:10.1007/978-3-642-56443-7.
- [20] Jonsson M. *Short-Pulse Photofragmentation and Fluorescence-based Diagnostics – Development and Applications*. Lund University, 2015.
- [21] Johansson O, Bood J, Li B, Ehn A, Li ZS, Sun ZW, et al. Photofragmentation laser-induced fluorescence imaging in premixed flames. *Combust Flame* 2011;158:1908–19. doi:10.1016/j.combustflame.2011.02.021.
- [22] Tropea C, Yarin AL, Foss JF. *Springer handbook of experimental fluid mechanics*. Springer Science+Business Media; 2007.
- [23] Speight JG. *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes*. Elsevier; 2011. doi:10.1016/B978-0-7506-8632-7.10010-6.
- [24] Stavropoulos P, Michalakou A, Skevis G, Couris S. Quantitative local equivalence ratio determination in laminar premixed methane–air flames by laser induced breakdown spectroscopy (LIBS). *Chem Phys Lett* 2005;404:309–14. doi:10.1016/j.cplett.2005.01.105.
- [25] Makmool U, Jugjai S, Tia S. Structures and performances of laminar impinging multiple premixed LPG–air flames. *Fuel* 2013;112:254–62. doi:10.1016/j.fuel.2013.05.028.
- [26] Makmool U, Jugjai S, Tia S. Visualization of Multiple Flame Interactions: Appearance Structure and Combustion of LPG-Air Premixed Laminar Flames. *J Clean Energy Technol* 2015;3:196–201. doi:10.7763/JOCET.2015.V3.194.
- [27] Makmool U, Jugjai S, Tia S. Structures and performances of laminar impinging multiple premixed LPG–air flames. *Fuel* 2013;112:254–62. doi:10.1016/j.fuel.2013.05.028.
- [28] Makmool U, Jugjai S, Tia S. Visualization of Multiple Flame Interactions: Appearance Structure and Combustion of LPG-Air Premixed Laminar Flames. *J Clean Energy Technol* 2015;3:196–201. doi:10.7763/JOCET.2015.V3.194.

- [29] Rallis CJ, Garforth AM. The determination of laminar burning velocity. *Prog Energy Combust Sci* 1980;6:303–29. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0360-1285\(80\)90008-8](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1285(80)90008-8).
- [30] Burbano HJ, Pareja J, Amell AA. Laminar burning velocities and flame stability analysis of H<sub>2</sub>/CO/air mixtures with dilution of N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. *Int J Hydrogen Energy* 2011;36:3232–42. doi:10.1016/j.ijhydene.2010.11.089.
- [31] Dunn-Rankin D, Cheng RK, Levinsky H. *Lean Premixed Burners*. *Lean Combust.*, 2008, p. 161–V.
- [32] Bosschaart KJ, de Goey LPH. Detailed analysis of the heat flux method for measuring burning velocities. *Combust Flame* 2003;132:170–80. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00433-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00433-9).
- [33] Arrieta González CE. Evaluación experimental de un quemador de combustión estabilizada en la superficie de un medio poroso utilizando gas natural y mezcla gas natural-syngas. Facultad de Ingeniería. Maestría en Ingeniería - Énfasis en Energética, Universidad de Antioquia, 2013, 2013.
- [34] Lieuwen T, McDonell V, Petersen E, Santavicca D. Fuel Flexibility Influences on Premixed Combustor Blowout, Flashback, Autoignition, and Stability. *J Eng Gas Turbines Power* 2008;130:11506.
- [35] Jarosinski J, Veyssiere B. *Combustion Phenomena: Selected Mechanisms of Flame Formation, Propagation and Extinction*. Taylor & Francis; 2009.
- [36] Shin Y, Kim Y. Numerical modeling for flame dynamics and combustion processes in a two-sectional porous burner with a detailed chemistry. *J Mech Sci Technol* 2015;28:4797–805. doi:10.1007/s12206-014-0747-5.
- [37] Kundu P, Kumar V, Mishra IM. Numerical modeling of turbulent flow through isotropic porous media. *Int J Heat Mass Transf* 2014;75:40–57. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.020.
- [38] Noordally E, Przybylski JM, Witton JJ. *Porous media combustors for clean gas turbine engines*. 2004.
- [39] Yarahmadi a., Nobari MRH, Hosseini R. A Numerical Investigation of Laminar and Turbulent Premixed Flames in Porous Media. *Combust Sci Technol* 2011;183:1164–83. doi:10.1080/00102202.2011.586007.
- [40] Mueller KT. Super-adiabatic combustion in porous media with catalytic enhancement for thermoelectric power conversion. Department of Mechanical, Materials and Aerospace Engineering in the College of Engineering and Computer Science. University of Central Florida, 2011.
- [41] Law CK. *Combustion Physics*. Cambridge University Press; 2006. doi:<http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511754517>.
- [42] JOO HI, DUNCAN K, CICCARELLI G. FLAME-QUENCHING PERFORMANCE OF CERAMIC FOAM. *Combust Sci Technol* 2006;178:1755–69.

- doi:10.1080/00102200600788692.
- [43] Nakamura Y, Itaya Y, Miyoshi K, Hasatani M. Mechanism of methane-air combustion on the surface of a porous ceramic plate. *J Chem Eng JAPAN* 1993;26:205–11. doi:10.1252/jcej.26.205.
- [44] Zheng XF, Feng Y, Jia MS. Experimental Investigation of Methane/Air Penetration Combustion and Flame Stability Characteristics on Porous Wall Surface. *Adv Mater Res* 2013;732–733:190–3. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.732-733.190.
- [45] Ziabasharhagh M, Mohammadi A. Numerical Simulation of Combustion in Porous Media. *Numer. Simul. - From Theory to Ind.*, 2012.
- [46] Lin B, Dai H, Wang C, Li Q, Wang K, Zheng Y. Combustion characteristics of low concentration coal mine methane in divergent porous media burner. *Int J Min Sci Technol* 2014;24:671–6. doi:10.1016/j.ijmst.2014.03.027.
- [47] Dai H, Lin B, Zhai C, Hong Y, Li Q. Subadiabatic combustion of premixed gas in ceramic foam burner. *Int J Heat Mass Transf* 2015;91:318–29. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.122.
- [48] Liu H, Dong S, Li B-W, Chen H-G. Parametric investigations of premixed methane–air combustion in two-section porous media by numerical simulation. *Fuel* 2010;89:1736–42. doi:10.1016/j.fuel.2009.06.001.
- [49] ANSYS Inc. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 17.0 2015:724–46.
- [50] Barra AJ, Ellzey JL. Heat recirculation and heat transfer in porous burners. *Combust Flame* 2004;137:230–41. doi:10.1016/j.combustflame.2004.02.007.
- [51] Yarahmadi a., Nobari MRH, Hosseini R. A Numerical Investigation of Laminar and Turbulent Premixed Flames in Porous Media. *Combust Sci Technol* 2011;183:1164–83. doi:10.1080/00102202.2011.586007.
- [52] Malico I, Pereira JCF. Numerical Study on the Influence of Radiative Properties in Porous Media Combustion. *J Heat Transfer* 2001;123:951. doi:10.1115/1.1389059.
- [53] du Plessis P, Montillet A, Comiti J, Legrand J. Pressure drop prediction for flow through high porosity metallic foams. *Chem Eng Sci* 1994;49:3545–53. doi:10.1016/0009-2509(94)00170-7.
- [54] Richardson JT, Peng Y, Remue D. Properties of ceramic foam catalyst supports: Pressure drop. *Appl Catal A Gen* 2000;204:19–32. doi:10.1016/S0926-860X(00)00508-1.
- [55] Moreira E a., Coury JR. The influence of structural parameters on the permeability of ceramic foams. *Brazilian J Chem Eng* 2004;21:23–33. doi:10.1590/S0104-66322004000100004.
- [56] ANSYS Inc. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 17.0 2015:724–46.
- [57] Diamantis DJ, Mastorakos E, Goussis D a. Simulations of premixed combustion in porous media. *Combust Theory Model* 2002;6:383–411. doi:10.1088/1364-7830/6/3/301.

- [58] El-Mahallawy F, Habik SE-D. *Fundamentals and Technology of Combustion*. Elsevier; 2002. doi:10.1016/B978-008044106-1/50006-1.
- [59] Thring MW, Newby MP. Combustion length of enclosed turbulent jet flames. *Proc Combust Inst* 1953.
- [60] Yahagi M, Hase K. A study on flame stabilization of a perforated porous plate burner. *Energy Technol Res Institute* n.d.
- [61] Le Cong T, Dagaut P. Experimental and Detailed Modeling Study of the Effect of Water Vapor on the Kinetics of Combustion of Hydrogen and Natural Gas, Impact on NO<sub>x</sub>. *Energy & Fuels* 2009;23:725–34. doi:10.1021/ef800832q.
- [62] Chan YL, Zhu MM, Zhang ZZ, Liu PF, Zhang DK. The Effect of CO<sub>2</sub> Dilution on the Laminar Burning Velocity of Premixed Methane/Air Flames. *Energy Procedia* 2015;75:3048–53. doi:10.1016/j.egypro.2015.07.621.
- [63] Wüning J, Wüning JG. Flameless oxidation to reduce thermal NO<sub>x</sub>-formation. *Prog Energy Combust Sci* 1997;23:81–94. doi:10.1016/S0360-1285(97)00006-3.
- [64] Kinsler LE, Frey AR, Coopens AB, Sanders JV. *Fundamentals of acoustics*. Wiley; 2000.
- [65] Ministerio De Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia. Resolución 627. 2006.
- [66] Rayleigh JWSB. *The Theory of Sound*. Macmillan and Company; 1894.
- [67] Candel S, Ducruix S, Durox D, Veynante D. *Active Control of Engine Dynamics: Combustion Dynamics: Analysis and Control – Modeling*. 2002.
- [68] Durox D, Schuller T, Noiray N, Birbaud AL, Candel S. Rayleigh criterion and acoustic energy balance in unconfined self-sustained oscillating flames. *Combust Flame* 2009;156:106–19. doi:10.1016/j.combustflame.2008.07.016.
- [69] Schuller T. Mécanismes de couplage dans les interactions acoustiques-combustion. *Energie électrique*. Ecole Centrale Paris, 2003.
- [70] Schuller T. Mécanismes de couplage dans les interactions acoustiques-combustion. *Energie électrique*. Ecole Centrale Paris, 2003.
- [71] Bedoya C, Habisreuther P, Zarzalis N, Prathap C, Ebrahimi H. Experimental Study on the Influence of Pressure on the Flame Stabilization in Porous Inert Media (PIM). Vol. 2 *Combust. Fuels Emiss. Parts A B*, ASME; 2012, p. 143. doi:10.1115/GT2012-68234.
- [72] Yu B, Kum S-M, Lee C-E, Lee S. An experimental study of heat transfer and pollutant emission characteristics at varying distances between the burner and the heat exchanger in a compact combustion system. *Energy* 2012;42:350–7.
- [73] Keramiotis C, Stelzner B, Trimis D, Founti M. Porous burners for low emission combustion: An experimental investigation. *Energy* 2012;45:213–9. doi:10.1016/j.energy.2011.12.006.
- [74] Powell RW, Ho CY, Liley PE. *Thermal conductivity of selected materials*. U.S. Dept. of

- Commerce, National Bureau of Standards; for sale by the Superintendent of Documents, U.S. Govt. Print. Off.; 1966.
- [75] Touloukian YS, Buyco EH. Thermophysical Properties of Matter: SPECIFIC HEAT Nonmetallic Solids. John Wiley & Sons Canada, Limited; 1970.
- [76] Smith GP, Golden DM, Frenklach M, Moriarty NW, Eiteneer B, Goldenberg M, et al. Gri-Mech 3.0. n.d.
- [77] Chemical-Kinetic Mechanisms for Combustion Applications, San Diego Mechanism web page, Mechanical and Aerospace Engineering (Combustion Research), University of California at San Diego (<http://combustion.ucsd.edu>) n.d.
- [78] Kazakov A, Frenklach M. Reduced Reaction Sets based on GRI-Mech 1.2: DMR19 n.d. <http://www.me.berkeley.edu/drm/>.
- [79] Ratna Kishore V, Ravi MR, Ray A. Adiabatic burning velocity and cellular flame characteristics of H<sub>2</sub>-CO-CO<sub>2</sub>-air mixtures. *Combust Flame* 2011;158:2149-64. doi:10.1016/j.combustflame.2011.03.018.
- [80] Sepúlveda C, Cadavid F, Amell AA. Development of a methodology for designing and characterizing honeycomb heat regenerators. *Dyna* 2010:200-8.
- [81] TESTO. Flue Gas Analysis in Industry. Practical guide for Emission and Process Measurements 2004:149.
- [82] Niessen WR. Combustion and incineration processes: applications in environmental engineering. CRC Press/Taylor & Francis; 2010.
- [83] Luque J, Crosley DR. LIFBASE: Database and Spectral Simulation Program (Version 2.1), SRI International Report MP, 1999.
- [84] Lezcano Benitez JC. Cálculo numérico del factor de recirculación en hornos de combustión sin llama. (Tesis de Maestría). Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. Medellín, Colombia, 2010.
- [85] Arrieta González CE. Comunicación personal 2016.
- [86] Lewis B, Von Elbe G. Combustion Flame and explosion gases. New York and London. Acad Press Inc 1961.
- [87] Deng L, Jin X, Zhang Y, Che D. Release of nitrogen oxides during combustion of model coals. *Fuel* 2016;175:217-24. doi:10.1016/j.fuel.2016.02.047.
- [88] Colorado A. Pollutant Emissions and Lean Blowoff Limits of Fuel Flexible Burners Operating on Gaseous Renewable and Fossil Fuels. (Doctoral thesis). University of California, Irvine, 2016.
- [89] Arrieta CE, Amell AA. Combustion analysis of an equimolar mixture of methane and syngas in a surface-stabilized combustion burner for household appliances. *Fuel* 2014;137:11-20. doi:10.1016/j.fuel.2014.07.079.

- [90] Pope SB. Computationally efficient implementation of combustion chemistry using in situ adaptive tabulation. *Combust Theory Model* 1997;1:41–63. doi:10.1088/1364-7830/1/1/006.

# Anexos

## **Contenido**

Anexo 1: UDF'S

Anexo 2: Algoritmo solucionador Pressure-Based

Anexo 3: Modelo de combustión laminar

Anexo 4: Tabulación adaptativa en sitio (ISAT)

Anexo 5: Código para procesamiento de imágenes

Anexo 6: Diagrama de combustión del metano

## Anexo 1: UDF'S

Para llevar a cabo las simulaciones numéricas fue necesaria la programación de diferentes UDF's para determinar la conductividad térmica y calor específico del PIM. Adicionalmente, se muestra la UDF utilizada para adicionar un término fuente a la ecuación de la energía el cual da cuenta de la radiación emitida por las últimas celdas del PIM cercanas a la llama.

- UDF para la variación de la conductividad térmica del PIM en función de la temperatura

```
#include "udf.h"

DEFINE_PROPERTY(my_TC, c, t)
{
    real TC;
    real temp;

    temp = C_T(c,t);/*Get centroid temperature*/

    TC=85.868-0.22972*temp+(2.607e-4)*(temp*temp)-(1.3607e-
7)*(temp*temp*temp)+(2.7092e-11)*(temp*temp*temp*temp);

    return TC; /*Return the TC value to Fluent Solver*/
}
```

- UDF para la variación del calor específico del PIM en función de la temperatura

```
#include "udf.h"

DEFINE_SPECIFIC_HEAT(my_cp, T, Tref, h, yi)
{
    real cp;

    cp=-40.92+4.024*T-0.0050048*(T*T)+0.0000028852*(T*T*T)-
0.00000000062488*(T*T*T*T);

    return cp; /*Return the CP value to Fluent Solver*/
}
```

- UDF para la adición del término fuente (radiación) a la ecuación de la energía

```
#include "udf.h"
```

```
DEFINE_SOURCE(Qrad, c, t, dS, eqn)
```

```
{
    real x[ND_ND]; /* this will hold the position vector */
    real coordenadaX;
    real source;

    C_CENTROID(x,c,t); /*Get centroid coordinate*/
    coordenadaX = x[0]; /*Set coordenadaX as the X-coordinate value*/

    if(coordenadaX >= 0.054583333)
    {
        source = -0.35* 3619.05* SIGMA_SBC * (pow(C_T(c,t),4.0) - pow(300,4.0));
        dS[eqn]= -4.0 *(0.35)* 3619.05 * SIGMA_SBC * pow(C_T(c,t),3.0);
    }
    else
    {
        source = 0.0;
        dS[eqn]= 0.0;
    }
    return source;
}
```

## Anexo 2: Algoritmo solucionador Pressure-Based

El solucionador Pressure-Based utiliza un algoritmo que pertenece a la clase de método conocida como el método de proyección, en cual la restricción de la conservación de masa del campo de velocidad es alcanzada resolviendo una ecuación de presión (o corrección de presión). Esta ecuación es derivada de las ecuaciones de continuidad y momentum de manera que el campo de velocidad, corregido por la presión, satisface la continuidad.

Dado que las ecuaciones de conservación son no lineales y acopladas unas a otras, el proceso de solución involucra iteraciones de manera que todo el conjunto de ecuaciones de conservación es resuelto repetidamente hasta lograr la convergencia.

En el algoritmo Pressure-Based existen dos tipos disponibles en *ANSYS-Fluent* que son el algoritmo segregado y el algoritmo acoplado.

En el algoritmo segregado las ecuaciones gobernantes para la solución de variables tales como velocidades, presión, temperatura, presión, etc., son resueltas una después de otra. Cada ecuación gobernante mientras es resuelta es desacoplada o segregada de las otras ecuaciones, de allí su nombre. El algoritmo segregado es eficiente en memoria, ya que las ecuaciones discretizadas sólo necesitan ser almacenados en la memoria de una en una. Sin embargo, la convergencia de la solución es relativamente lento, ya que las ecuaciones se resuelven de manera disociada.

1. Actualización de las propiedades del fluido (por ejemplo, densidad, viscosidad, calor específico), incluyendo la viscosidad turbulenta (difusividad), basada en la solución actual.
2. Resolver las ecuaciones de momentum, una tras otra, utilizando los valores actualizados recientemente de presión y los flux de masa en las caras.
3. Resolver la ecuación de corrección de presión utilizando el campo de velocidades recientemente obtenido y la masa de flujo.
4. Corregir flux de masa, presión y el campo de velocidad en las caras utilizando la corrección de presión obtenido en la Etapa 3.
5. Resolver las ecuaciones escalares, si las hay, tales como cantidades turbulentas, la energía, las especies y la intensidad de radiación utilizando los valores actuales de las variables de la solución.
6. Actualización de los términos fuente que surgen de las interacciones entre las diferentes fases.
7. Comprobar la convergencia de las ecuaciones.

A diferencia del algoritmo segregado, descrito anteriormente, el algoritmo acoplado resuelve un sistema acoplado de ecuaciones que comprende las ecuaciones de momentum y de continuidad. Por lo tanto, en el algoritmo acoplado los pasos 2 y 3 de la solución segregada se sustituyen por un solo paso en el que se resuelve el sistema acoplado de ecuaciones. Las ecuaciones restantes se resuelven de una manera desacoplada como en el algoritmo segregado.

En la Figura A2-1 y Figura A2-2 se muestran los diagramas de flujo para la solución de cada uno de los algoritmos mencionados anteriormente.

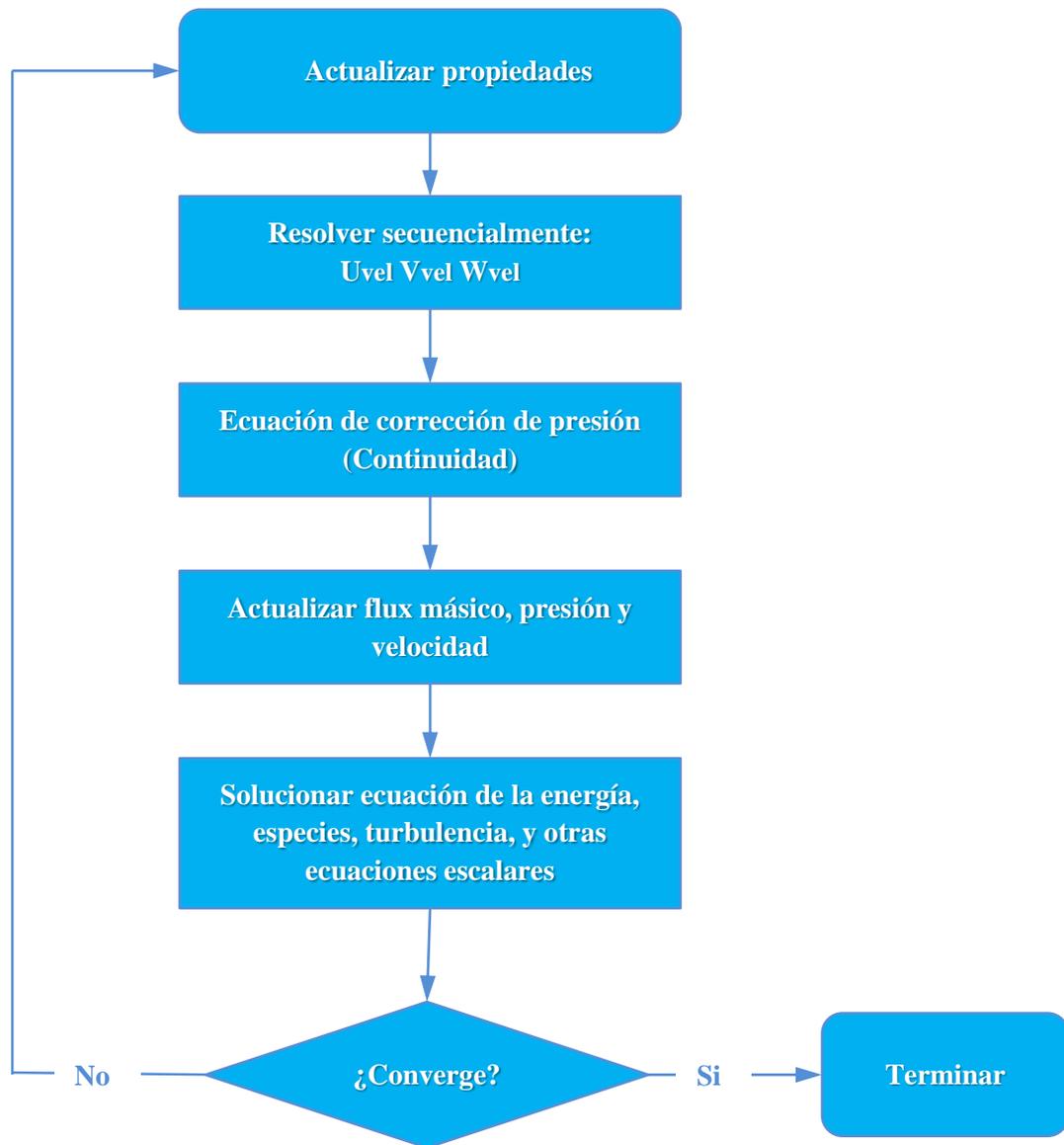


Figura A2 - 1. Esquema del método Pressure-Based Segregated.

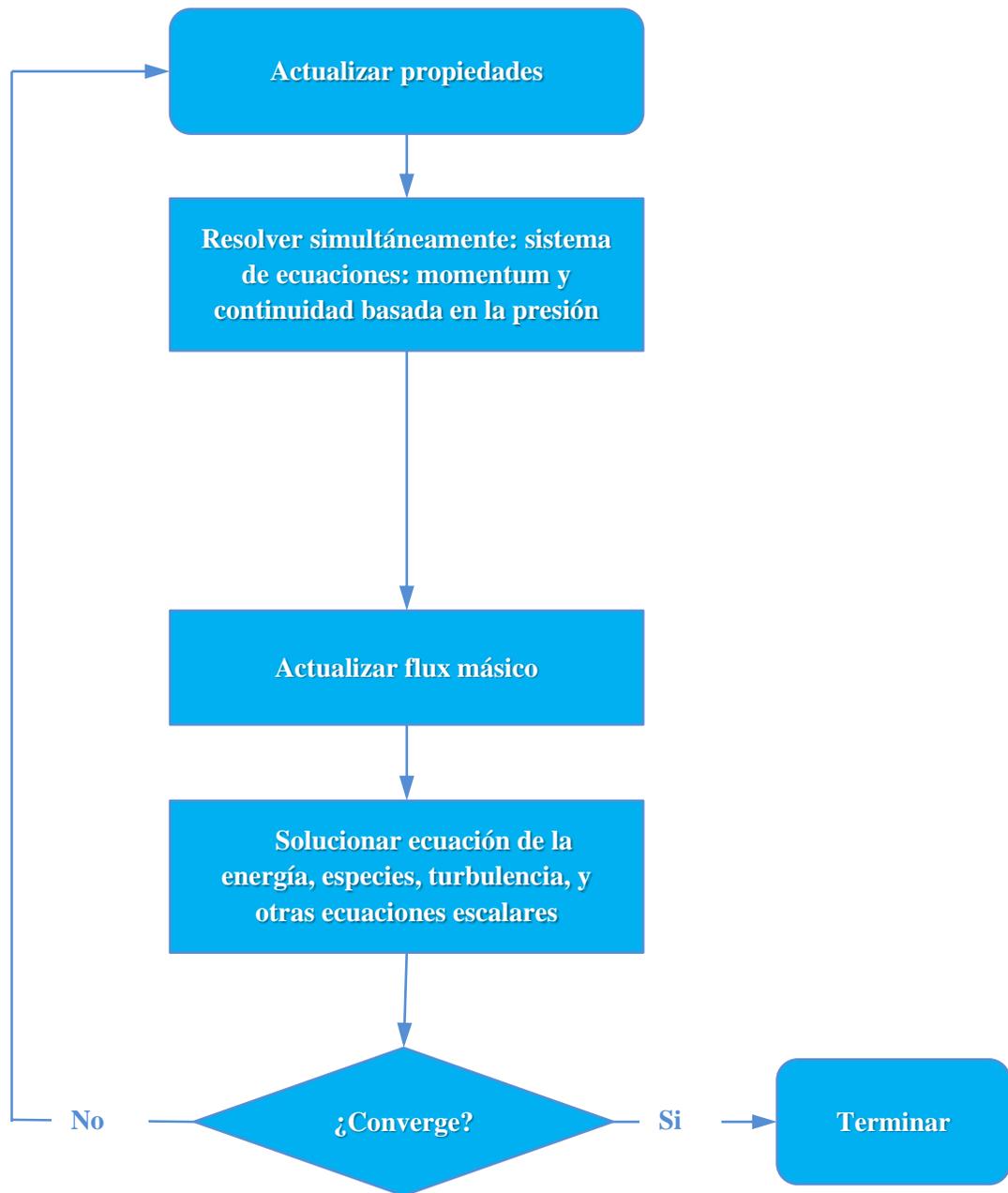


Figura A2 - 2. Esquema del algoritmo Pressure-Based Coupled.

### Anexo 3: Modelo de combustión laminar

La fuente neta de especies químicas  $i$  debida a la reacción  $R_i$  es calculada por medio de la suma de las fuentes de reacción de Arrhenius durante las  $N_R$  reacciones en las que la especie participa:

$$R_i = W_i \sum_{r=1}^{N_R} \hat{R}_{i,r} \quad \text{Ec 47}$$

Donde  $W_i$  es el peso molecular de la especie  $i$  y  $\hat{R}_{i,r}$  es la tasa molar de destrucción/creación en la forma Arrhenius de las especies en la reacción  $r$ . La reacción puede ocurrir en la fase continua y sólo entre especies en la fase continua

Un mecanismo reactivo compuesto por una o más reacciones puede ser escrito compactamente como:



Donde:

$N_R$ : Número de reacciones del mecanismo reactivo.

$v'_{kj}$ : Coeficientes estequiométricos molares de la especie  $k$  en los reactivos de la reacción  $r$ .

$v''_{kj}$ : Coeficientes estequiométricos molares de la especie  $k$  en los productos de la reacción  $r$ .

$\mathcal{M}_k$ : Símbolo químico que denota cada especie  $k$  (ej:  $O_2$ ,  $H_2$ , etc.).

$k_{f,r}$ : Constante de velocidad directa para la reacción  $r$ .

$k_{b,r}$ : Constante de velocidad reversa para la reacción  $r$ .

Para este mecanismo reactivo el término de generación o destrucción de la especie  $k$  es:

$$\dot{\omega}_k = W_k RR_k \quad \text{Ec 49}$$

$$RR_k = \frac{d[x_k]}{dt} = \sum_{j=1}^{N_R} (v''_{kj} - v'_{kj}) \left[ k_{fj} \prod_{k=1}^{N_S} [x_k]^{v'_{kj}} - k_{rj} \prod_{k=1}^{N_S} [x_k]^{v''_{kj}} \right] \quad \text{Ec 50}$$

Donde:

$W_k$ : Peso molecular de la especie  $k$

$k_{fj}$ : Constante de rapidez hacia adelante de la reacción  $j$

$k_{rj}$ : Constante de rapidez hacia atrás de la reacción  $j$

$[x_k]$ : Concentración molar de la especie  $k$ :  $[x_k] = (\rho Y_k)/W_k$

Las constantes de reacción se modelan utilizando la ley de Arrhenius:

$$k_{fj} = A_{fj} T^{\beta_j} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{Ec 51}$$

Donde  $A_{fj}$  es la constante preexponencial,  $\beta_j$  es el exponente de la temperatura y  $E_a$  la energía de activación. Las constantes de reacción  $k_{rj}$  son computadas a partir de  $k_{fj}$  y las constantes de equilibrio.

El acople de las  $RR_k$  para todas las especies del sistema resulta en un sistema de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (EDO) que puede ser solucionado utilizando diferentes algoritmos. Sin embargo, este proceso es el que mayor tiempo de cómputo requiere y por lo tanto se hace necesario utilizar una técnica de simulación que permita obtener los resultados de una manera más rápida. Para ello se hace uso de la técnica de tabulación adaptativa in situ (In Situ Adaptive Tabulation, ISAT) activando el solucionador de química dura (*Stiff Chemistry Solver*). Para mayor información de la tabulación ISAT ver Anexo 4.

## Anexo 4: Tabulación adaptativa en sitio (ISAT)

La tabulación adaptativa en sitio [90], es una técnica computacional en la cual los resultados de la integración del sistema EDO químico son tabulados en un árbol binario para su uso posterior. Utilizando esta técnica se pueden obtener ahorros importantes en el tiempo de ejecución de las simulaciones, con aceleraciones reportadas de hasta 1000 veces respecto a la integración directa.

En este método se define un estado termodinámico  $\psi$  para una presión de referencia  $P_0$ :

$$\psi = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_{NS}, T\}$$

De modo que para un tiempo y composición química inicial  $\psi(t_0) = \psi^0$ . El resultado de la integración del sistema EDO para  $\psi^0$  y un paso temporal fijo es llamado  $R$ , el mapeo de reacción:

$$R(\psi^0) = \psi(t_0 + \Delta t)$$

Sea  $q$  un punto del sistema con un estado termodinámico  $\psi^q$  determinado para el cual se desea conocer  $R(\psi^q)$ . Normalmente se debería proceder con la integración directa del sistema de ecuaciones diferenciales que describen la creación-destrucción de especies químicas. En el método ISAT, para el punto requerido ( $q$ ),  $R$  se calcula basado en resultados previos tabulados al efectuar una aproximación lineal:

$$R(\psi^q) \approx R^l(\psi^q) \equiv R(\psi^0) + \delta R^l$$

Donde:

$$\delta R^l = A(\psi^0) \delta \psi$$

$$\delta \psi = \psi^q - \psi^0$$

$A(\psi^0)$  es la matriz de gradientes definida como:

$$A_{ij}(\psi^0) \equiv \frac{\partial R_i(\psi^0)}{\partial \psi_j}$$

La matriz de gradientes  $A$  está relacionada con los coeficientes de sensibilidad de primer orden  $C$  con respecto a las condiciones iniciales:

$$A(\psi^0) = C(\psi^0, t_0 + \Delta t)$$

Donde:

$$C_{ij}(\psi^0, t) \equiv \frac{\partial \psi_i(t)}{\partial \psi_j^0}$$

Para poder evaluar el término  $C$ , el siguiente sistema lineal EDO es integrado implícitamente de  $t_0$  a  $t_0 + \Delta t$ :

$$\frac{d}{dt} C(\psi^0, t) = J(\psi(t)) C(\psi^0, t)$$

Donde  $J$  es el Jacobiano y la condición inicial es  $C(\psi^0, t_0) = I$ .

La aproximación lineal  $R^l$  será recuperada si el error local es menos que la tolerancia especificada  $\varepsilon_{tol}$ . Para poder evaluar esta tolerancia, cada punto de la tabulación tiene asociada una región de precisión definida por un elipsoide, llamado elipsoide de precisión (EOA, por sus siglas en inglés):

$$EOA \equiv \delta\psi^T \tilde{A}^T B^T B \tilde{A} \delta\psi \leq \varepsilon_{tol}^2$$

Donde  $B$  es una matriz opcional de escalado y  $\tilde{A}$  es una versión modificada de  $A$  que previene la existencia de ejes principales muy largos en el elipsoide. Si el error local es menor que la tolerancia pero fuera del elipsoide de precisión, entonces el elipsoide crece para envolver el nuevo punto  $q$ . De lo contrario una nueva entrada debe ser adicionada al árbol binario.

El pseudocódigo para el algoritmo ISAT se presenta a continuación:

```

Para cada punto q del que se desea conocer R:
¿ Esta dentro del elipsoide de precisión (EOA)?
    SI → recupere el resultado del árbol binario usando interpolación lineal (rápido)
    NO → efectue integración directa (lento) y compare con la interpolación
        obteniendo el error  $\varepsilon$ 
¿ Es el error  $\varepsilon$  menos que la tolerancia  $\varepsilon_{tol}$ ?
    SI → aumente el elipsoide de precisión (EOA).
    NO → adicione nueva entrada.
end
  
```

A diferencia del algoritmo estándar, esta librería ISAT renueva las entradas del árbol binario frecuentemente para minimizar el tiempo de búsqueda dentro del árbol, siguiendo una idea similar al método DOLFA (Database for On-Line Function Approximation)

## Anexo 5: Código para procesamiento de imágenes

```

clc
clear all
close all

% =====
% Code to process the OH-PLIF images
% =====

%-----
%Cortar imágenes
%Número de pixeles a borrar en cada dirección de la fotografía

Cut_up=0;
Cut_down=1024-1024;
Cut_left=0;
Cut_right=1024-905;

L_ED=803; % <<-----

%-----
disp('Select the four files in this order:')
disp('1. Background'),
disp('2. Energy Distribution '),
disp('3. Measurement')

[file_to_process,pathname]=uigetfile('*.SPE','Select the .SPE
file','MultiSelect','on');

for i=1:3
    objvar(i)=SpeReader(file_to_process{i}); %Reads the .SPE file

    [pathstr,fileName,ext]=fileparts(file_to_process{i});
    name{i}=fileName;
end

N_frames=objvar(3).NumberOfFrames; %Número de fotogramas en cada archivo
de medición

%Crea una matriz 4-D que contiene las imágenes
BackGround=read(objvar(1));
EnergyD=read(objvar(2));
Measure=read(objvar(3));

%-----Corte de fotogramas
[y1,x1]=size(Measure(:,:,1,1));

%Abajo
if Cut_down~=0
EnergyD(y1-Cut_down:y1, :, :, :)=[];

```

```

BackGround(y1-Cut_down:y1, :, :, :) = [ ];
Measure(y1-Cut_down:y1, :, :, :) = [ ];

end

%Arriba
if Cut_up~=0
EnergyD(1:Cut_up, :, :, :) = [ ];
BackGround(1:Cut_up, :, :, :) = [ ];
Measure(1:Cut_up, :, :, :) = [ ];
end

%Derecha
if Cut_right~=0
EnergyD(:, x1-Cut_right:x1, :, :) = [ ];
BackGround(:, x1-Cut_right:x1, :, :) = [ ];
Measure(:, x1-Cut_right:x1, :, :) = [ ];
end

%Izquierda
if Cut_left~=0
EnergyD(:, 1:Cut_left, :, :) = [ ];
BackGround(:, 1:Cut_left, :, :) = [ ];
Measure(:, 1:Cut_left, :, :) = [ ];
end

[y1, x1] = size(Measure(:, :, 1, 1));
%-----
% Promedio de imágenes

Avg_ED = mean(EnergyD, 4);
Avg_BG = mean(BackGround, 4);
Avg_M = mean(Measure, 4);

%-----
% Sustracción del fondo

ED_noBG = Avg_ED - Avg_BG; % Energía de Distribución sin fondo
M_noBG = Avg_M - Avg_BG; % Medición sin fondo

%-----
% Normalización
ED_noBG = medfilt2(ED_noBG, [5, 5], 'symmetric'); % Plano laser filtrado

Max_ED = max(max(ED_noBG));
N_ED_noBG = (ED_noBG ./ Max_ED); % Plano laser normalizado

Line_ED = N_ED_noBG(:, L_ED); % Línea de referencia
Line_ED = sgolayfilt(Line_ED, 2, 51);

% Criterio para la ubicación del plano laser donde la energía es mayor
% que X veces la más grande

```

```

X= 0.32; % <<-----

I=find(Line_ED > X);
a=I(1);
size(I);
b=I(ans(1))

N_ED_noBG(1:a,:)= 1.0;
N_ED_noBG(b:y1,:)= 1.0;

%-----

Line_ED=N_ED_noBG(:,L_ED);
Line_ED(a:b)=sgolayfilt(Line_ED(a:b),2,51);

for i=1:x1
for j=1:y1
M_noBG_N(j,i)=M_noBG(j,i)/Line_ED(j);
end
end

%-----
%Filtro 1 (Filtro de medias)

M_noBG_NF=medfilt2(M_noBG_N,[3,3],'symmetric');
M_noBG_NF=medfilt2(M_noBG_NF);

% Filtro 2 (Filtro de paso bajo)
Max_M=max(max(M_noBG_NF));
M_noBG_NF=(M_noBG_NF./Max_M);

minE=0.35; % <<-----

M_noBG_NF(M_noBG_NF < minE)= 0.0 ;

%-----

max_intensity=max(max(max(Avg_M)));
min_intensity=min(min(min(Avg_M)));
clims=[min_intensity max_intensity];
clims=[0 max_intensity];

load('axcmap')
filename=[pathname '/' 'M'];

imagesc( Avg_M,clims);
% image(Avg_M,'CDataMapping','scaled');
colorbar
axis image
axis off
print(filename,'-dpng')

```

```

filename=[pathname '/' 'M_noBG'];
figure
imagesc( M_noBG,clims);
% image(M_noBG,'CDataMapping','scaled');
colorbar
axis image
axis off
print(filename, '-dpng')

filename=[pathname '/' 'ED_Plano Láser'];
figure
imagesc( N_ED_noBG,[minE 1]);
% image(M_noBG_N,'CDataMapping','scaled');
colorbar
axis image
axis off
hold on
plot(L_ED,1:y1,'k','LineWidth',3)
print(filename, '-dpng')

pixy=1:size(Line_ED(:,1));
figure
plot(pixy,Line_ED,'k')
title('Perfil plano láser')
grid on

filename=[pathname '/' 'M_noBG_N'];
figure
imagesc( M_noBG_N,clims);
% image(M_noBG_N,'CDataMapping','scaled');
colorbar
axis image
axis off
print(filename, '-dpng')

filename=[pathname '/' 'M_noBG_N_F'];
figure
imagesc( M_noBG_NF,[minE 1]);
% image(M_noBG_N,'CDataMapping','scaled');
colorbar
colormap(axcmap)
axis image
axis off
print(filename, '-dpng')

%%
%-----
% Altura del frente de llama

R_pd=10; % Relación [pix/mm]

H=[ ];

```

```

V=[ ];
for i=1:x1
    [v h]=max(M_noBG_NF(:,i));
    H=[H; (b-h)/R_pd];
    V=[V; v];
end

pixx=(1:x1)/R_pd;

mV=max(V);
for i=1:x1
    if V(x1-i+1)< 0.4*mV % <-----
        H(x1-i+1)=[ ];
        pixx(x1-i+1)=[ ];
    end
end
H=sgolayfilt(H,4 ,201);

figure
plot(pixx,H,'r','LineWidth',2)
axis([0 120 0 20])

legend('Perfil *OH máximo','Location','Best')
xlabel('x [mm]')
ylabel('y [mm]')

t={'xmm' 'ymm '};

T = table(pixx',H,'VariableNames',t);
writetable(T,[name{3} '.txt'])

%{
-----
Desarrollador del código: Alex Mauricio García Vergara
Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía |
GASURE
Junio 2016
-----
%}

```

## Anexo 6: Diagrama de combustión del metano

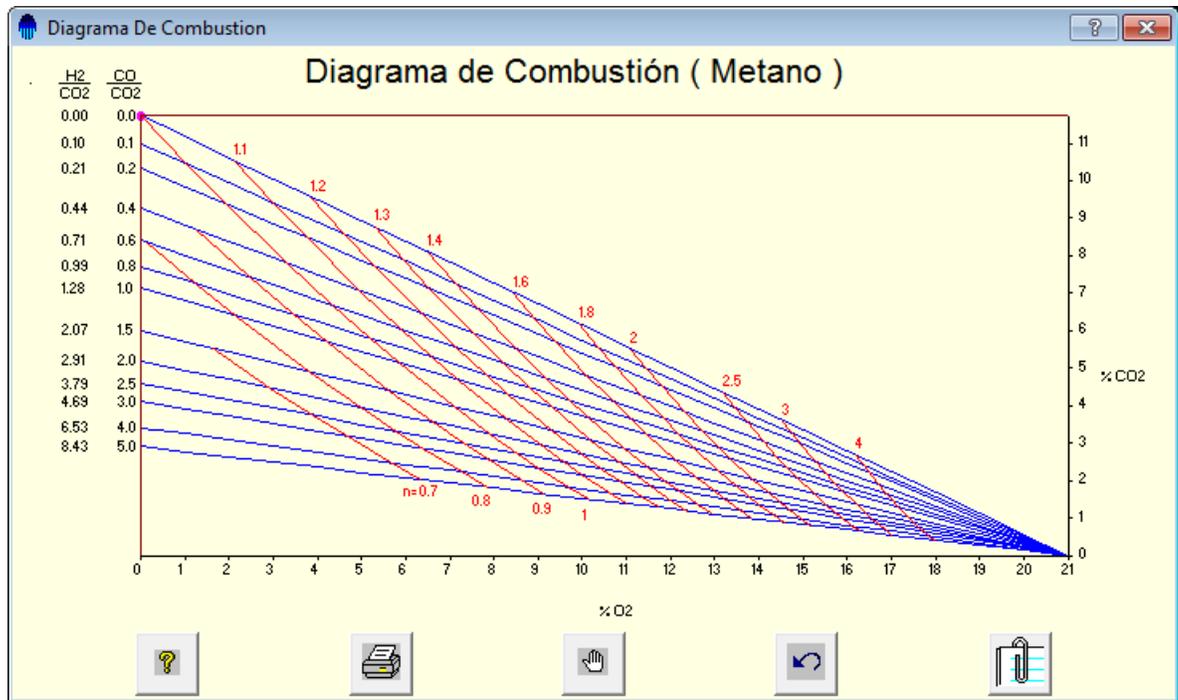


Figura A6 - 1. Diagrama de combustión del metano utilizando el software CombuGas desarrollado por el Grupo GASURE.

## Anexo 7: Diagrama de combustión del metano

En la Figura A7 - 1 se muestra uno de los resultados al utilizar el software REFACT, en donde no sólo se muestra el factor de recirculación, sino también la zona en la que se obtiene la mayor fracción de masa recirculada, que para este caso se da en la coordenada en  $x=7.43$  cm, es decir, 1.93 cm por encima de la superficie del medio poroso.

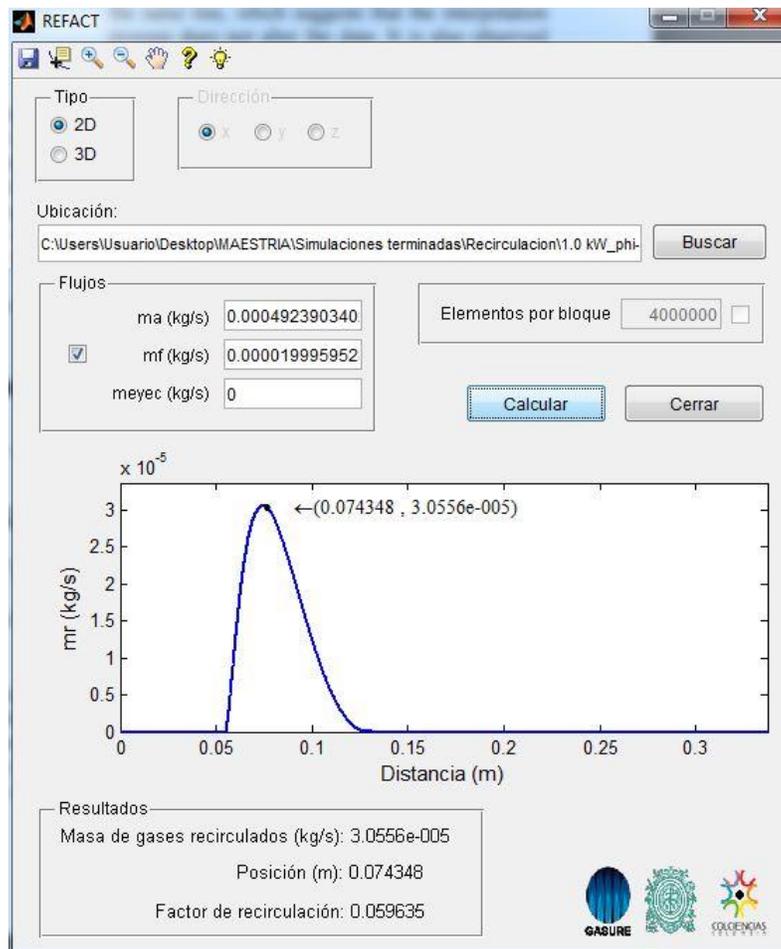


Figura A7 - 1. Resultados del uso del software REFACT.