

Análisis de la estabilidad de la combustión en un micro-combustor con paredes onduladas y aletas

Stability Analysis of Combustion in a Micro-Combustor with Wavy Walls and Fins

Luis Enrique Muro Teruel^{a1}, Francisco Antonio Godínez Rojano^{bc2}

^aUniversidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería
Avenida Universidad 3000, Coyoacán, 04510, México.

^bUniversidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería,
Avenida Universidad 3000, Coyoacán, 04510, México.

^cUniversidad Nacional Autónoma de México, Unidad de Investigación y Tecnología Aplicadas,
km. 10 PIIT, C. P. 66629, Apodaca Nuevo León, México.

¹lmuro0436@gmail.com; ²fgodinezr@iingen.unam.mx

Resumen

La creciente demanda de energía portable ha impulsado el desarrollo de los sistemas micro-termofotovoltaicos. En ellos, el diseño del combustor es crítico, pues sus dimensiones reducidas provocan pérdidas de calor que dificultan la ignición y sustentación de la flama. El amoníaco, combustible libre de carbono, es una alternativa prometedora, aunque su baja inflamabilidad limita su aplicación. Este trabajo analiza, mediante dinámica de fluidos computacional, la inflamabilidad de mezclas estequiométricas de amoníaco-hidrógeno en tres combustores distintos: plano (S), con paredes onduladas (W), y con paredes onduladas y aletas (WF). Se variaron la velocidad de entrada y el porcentaje de hidrógeno. Se encontró que los combustores W y WF pueden sustentar flamas de amoníaco puro en un amplio rango de velocidades gracias a zonas de bajo número de Péclet en el dominio fluido. No obstante, la combustión se caracterizó por una baja liberación de calor y un incremento mínimo de temperatura respecto al ambiente, lo que podría sugerir que la llama se encuentra en régimen de “*llama débil*”.

Abstract

The growing demand for portable energy has driven the development of micro-thermophotovoltaic systems. In these systems, the design of the combustor is critical, as its small dimensions cause heat losses that hinder ignition and flame stability. Ammonia, a carbon-free fuel, is a promising alternative, although its low flammability limits its application. This work analyzes, using computational fluid dynamics, the flammability of stoichiometric ammonia-hydrogen mixtures in three different combustors: flat (S), with wavy walls (W), and with wavy walls and fins (WF). The inlet velocity and the percentage of hydrogen were varied. It was found that the W and WF combustors can sustain pure ammonia flames over a wide range of velocities due to low Péclet number zones within the fluid domain. However, combustion was characterized by a low heat-release rate and only a minimal temperature rise relative to the surroundings, which could indicate that the flame belongs to a “weak-flame” regime.

Palabras clave:

micro-combustión, sistemas micro-termofotovoltaicos, amoníaco, hidrógeno, dinámica de fluidos computacional

Keywords:

micro-combustion, micro-thermophotovoltaic system, ammonia, hydrogen, computational fluid dynamics

Introducción

Uno de los desafíos para aprovechar al máximo el potencial de los sistemas microelectromecánicos (MEMS por sus siglas en inglés) está relacionado con el suministro de energía de estos dispositivos. Hoy en día, la mayoría de los dispositivos electrónicos portátiles dependen de fuentes de energía como las baterías de litio, lo que plantea varios desafíos para su uso en MEMS. En primer lugar, debido a la baja densidad energética de las baterías de litio (aproximadamente 0,20 kWh/kg), su reducción a los tamaños típicos de los MEMS reduce significativamente la energía disponible, la cual, a menudo es insuficiente para alimentar estos sistemas. Dado lo anterior, la batería suele representar alrededor del 90% del tamaño del dispositivo [1]. Además, existen otras desventajas del uso de baterías de litio en dispositivos portátiles, como la necesidad de un mayor tiempo de carga, un tiempo

de funcionamiento corto y la necesidad de desecharlas una vez finalizada su vida útil, lo que representa una preocupación por el daño ambiental que puede producirse con la producción en masa de esta tecnología [2].

Entre las distintas alternativas para sustituir a las baterías convencionales, la opción más atractiva es el uso de combustibles fósiles y otros combustibles químicos, tales como el hidrógeno y el amoníaco. Dado que estos combustibles poseen densidades energéticas de 2 a 3 órdenes de magnitud más grandes que las baterías. Sin embargo, se requiere un sistema para convertir la energía liberada durante la combustión en electricidad. Los sistemas microtermofotovoltaicos (MTPVS por sus siglas en inglés) surgen de esto. Los MTPVS tienen tres componentes principales: un combustor

de paredes sólidas, un filtro y una celda fotovoltaica. Dentro del combustor, el combustible sufre una reacción de oxidación, liberando una cantidad de calor Q_{comb} , de la cual, una fracción Q_{rad} se pierde por las paredes en forma de radiación; este calor es capturado por el filtro. Finalmente, el filtro irradia una fracción Q_{fil} del calor capturado a la celda fotovoltaica para generar energía eléctrica [3]. Esta estructura sin partes móviles es lo que hace que los sistemas MTPV sean tan atractivos. La Figura 1 muestra un esquema simplificado de un sistema MTPV.

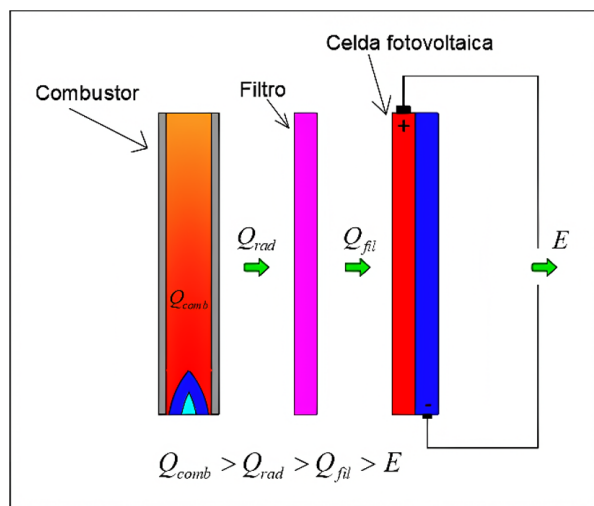


Figure 1 - Representación esquemática de un sistema micro-termofotovoltaico.

Los MTPVS destacan por su simplicidad, lo que facilita su diseño y mantenimiento. Sin embargo, estos dispositivos presentan una serie de inconvenientes. Debido a las dimensiones típicas del combustor (generalmente de unos pocos milímetros o incluso menos), la relación superficie-volumen es alta, lo que resulta en considerables pérdidas de calor a través de las paredes. Esto dificulta obtener una llama estable, comprometiendo la capacidad del sistema para suministrar energía de forma continua y eficiente. Además, dado que a estas escalas el número de Damköhler (Da) es cercano a la unidad, el tiempo de residencia de la mezcla aire-combustible puede ser mayor que su tiempo de reacción, por lo que existe el riesgo de una combustión incompleta dentro del combustor. Estas particularidades hacen del combustor el componente más crítico de los MTPVS.

Dado que la cantidad de calor entregada durante la combustión es proporcional al flujo másico de la mezcla aire-combustible, la velocidad de entrada es el factor que determina si se puede mantener una llama estable dentro de la cámara de combustión. Existen dos valores críticos de velocidad entre los cuales la combustión es estable: el límite de extinción y el límite de escape. La extinción se produce cuando la velocidad de entrada es demasiado baja, por lo que la cantidad de calor entregado por la combustión es menor que la pérdida de calor a través de las paredes de la cámara de combustión, y la llama se extingue. Por otro lado, el escape se produce

cuando la velocidad de entrada es demasiado alta, debido a que el tiempo de residencia de la mezcla es corto en comparación con el tiempo de reacción; en esos casos, la llama no puede estabilizarse dentro de la cámara de combustión y la mezcla se expulsa al exterior. La distancia de extinción de un combustible es la longitud característica más pequeña del canal de la cámara de combustión en la que la velocidad de entrada es demasiado baja o demasiado alta para que la mezcla se encienda.

Esto ha llevado al desarrollo de técnicas que buscan modificar la geometría interna del combustor para generar zonas de baja velocidad que favorezcan la recirculación, lo cual incrementa el tiempo de residencia de la mezcla en su interior. Una de las formas de inducir este efecto es mediante el uso de paredes onduladas. Mansouri [4], diseñó y examinó numéricamente un micro-combustor de sección transversal rectangular, y con una pared ondulada basada en una función sinusoidal; sus estudios determinaron que, optimizando los parámetros geométricos de la pared ondulada, fue posible mejorar la eficiencia del micro-combustor hasta en un 8.3% (de 24.76 a 33.06%), con respecto a un diseño con todas sus paredes rectas. Han *et al.* [5] compararon distintos combustores cilíndricos de paredes onduladas y determinaron que es posible obtener una mejora en la uniformidad de la temperatura de la pared exterior, y reduciendo a su vez las emisiones de NO_x en un 22%. Resende *et al.* [6] estudiaron numéricamente aspectos de la dinámica de la flama en un micro-combustor plano, con paredes onduladas definidas por un perfil sinusoidal, para la combustión estequiométrica del hidrógeno; se determinó que la flama era capaz de sustentarse para velocidades de entrada de 4 a 22 m/s. Ni *et al.* [7] estudiaron numéricamente la transferencia de calor y la generación de entropía en micro-combustores con paredes roscadas; para la combustión de hidrógeno, se determinó que una rosca del tipo triangular ayuda a reducir la desviación estándar de la temperatura hasta 25.5 K, y a incrementar la eficiencia teórica hasta un valor de 65%. Han *et al.* [8] realizaron un análisis exergético de un micro-combustor cilíndrico de paredes onduladas definidas por una función sinusoidal; para la combustión de hidrógeno, se determinó que incrementar la frecuencia de la función sinusoidal, mejora la uniformidad de la temperatura e incrementa la cantidad de exergía. Resende *et al.* [9], realizaron un estudio con las mismas características de aquel realizado en [6] (misma geometría, mismo combustible y misma relación de equivalencia), pero imponiendo esta vez un perfil de temperatura lineal en la pared del micro-combustor; se determinó que para velocidades superiores a 4 m/s, el comportamiento de la flama es pulsátil.

Otro de los aspectos importantes para la operación de los micro-combustores, es la selección del combustible. La combustión de hidrocarburos produce, entre otros gases, dióxido de carbono, el cual es el principal responsable de la crisis climática que se vive hoy día [4]; en este contexto, mucha de la investigación referente a micro-combustores, se ha enfocado en el empleo de combustibles alternativos. Una de las alter-

nativas más claras es el hidrógeno, sin embargo, dadas las dificultades técnicas referentes a la producción, almacenamiento y transporte de este combustible, su uso es limitado al día de hoy. Uno de los sustitutos del hidrógeno más prometedores, es el amoníaco, el cual, a diferencia del hidrógeno, es menos costoso de producir, y significativamente más fácil de almacenar y transportar. Sin embargo, el amoníaco presenta algunos inconvenientes: por un lado, dado que la velocidad laminar de flama del amoníaco es relativamente baja, es difícil producir una llama de aire-amoníaco en el interior del combustor; por otro lado, la oxidación del amoníaco produce cantidades importantes de NOx, los cuales son perjudiciales para la salud de las personas.

Con la finalidad de mejorar la flamabilidad del amoníaco, algunos autores han optado por pre-mezclar dicho combustible con hidrógeno, cuya velocidad laminar de flama es más grande. Gaheini *et al.* [10] analizaron los límites de estabilidad, el rendimiento térmico y las emisiones de NOx de las llamas de hidrógeno-amoníaco en un micro-combustor plano. Se concluyó que las llamas estables solo se pueden lograr cuando el contenido de hidrógeno en el combustible (en fracción molar) supera el 60%, debido a la baja inflamabilidad del amoníaco. Los límites de escape son de 3, 2 y 1 m/s para el 80%, 70% y 60%, respectivamente. La temperatura máxima y las emisiones de NOx aumentan con la velocidad de entrada. Respecto a las emisiones de NOx, los estudios de Cai *et al.* [11] determinaron que la formación de zonas de recirculación puede reducir de forma significativa las emisiones de NOx durante la combustión de amoníaco; esto se debe al efecto de difusión preferencial del oxígeno, el cual se difunde a una tasa más rápida que el resto de especies hacia las zonas de recirculación, por lo que la relación local de átomos de nitrógeno y oxígeno es bastante menor en dichas regiones, reduciendo así la cantidad global de NOx generada en el interior del micro-combustor.

En años recientes, otros autores han explorado el empleo de técnicas de recirculación de flujo para mejorar la estabilidad de la combustión del amoníaco y sus mezclas. Sheykhbaglou y Dimitriou [12] analizaron el desempeño térmico y las emisiones de NOx de un micro-combustor que incluye un cuerpo romo con hélice espiral; se empleó una mezcla de hidrógeno-amoníaco como combustible. Se determinó que, a mayor longitud del cuerpo romo y mayor ángulo de la hélice, se obtiene mejor desempeño térmico y mayor eficiencia, gracias a que la flama se estabiliza más cerca de la entrada del combustor por las zonas de recirculación formadas detrás del cuerpo romo; sin embargo, también aumentan las emisiones de NOx al incrementar ambos parámetros geométricos. Gao *et al.* [13] estudiaron el efecto de un campo magnético externo en la dinámica de la flama de metano-amoníaco al interior de un micro-combustor plano. Los resultados mostraron que, gracias al campo magnético se forman zonas de recirculación en el flujo, lo que a su vez mejora la recirculación de calor, y, por ende, la estabilidad de la flama.

La literatura existente hasta el momento muestra que tanto las técnicas de recirculación de flujo, como la mezcla con hidrógeno y otros combustibles, han sido estrategias efectivas para mejorar la estabilidad de las flamas de amoníaco y sus respectivas mezclas con otros combustibles. En el presente trabajo, se proponen dos micro-combustores planos con paredes onduladas: uno sin aletas, y otro con aletas rectangulares en las cavidades semicirculares. Hasta donde tienen conocimiento los autores, las geometrías propuestas en este estudio no han sido previamente reportadas en la literatura existente, así como tampoco se han reportado trabajos que combinen cavidades semicirculares con aletas en el interior de los combustores. Además, son escasos los estudios que analizan la estabilidad de las flamas de amoníaco en combustores con cavidades, así como el efecto del porcentaje de hidrógeno en su sostenibilidad. Por medio de simulaciones numéricas se construyeron los mapas de estabilidad de los dos combustores para compararlos entre sí, y a su vez, estos mismos se compararon con el mapa de estabilidad para un combustor plano convencional.

Metodo

Geometría del combustor

Se emplea el diseño de un combustor plano convencional como punto de partida, el cual se muestra en la Figura 2. Los parámetros geométricos indicados en la figura son $L=20\text{mm}$, $H=1\text{mm}$ y $HS=1\text{mm}$. Partiendo del diseño plano, se construyen los dos modelos mostrados en la Figura 3, donde los parámetros geométricos se escogen de manera que, tanto el espacio ocupado por el fluido, como el espacio ocupado por el sólido, se mantengan constantes e iguales a los del diseño plano. Se nombrará al combustor plano de la Figura 2 como S, al combustor mostrado en la Figura 3a como W y al de la Figura 3b como WF.

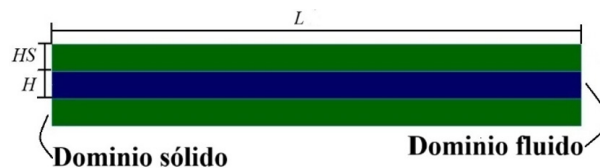


Figura 2 - Combustor plano convencional (S).

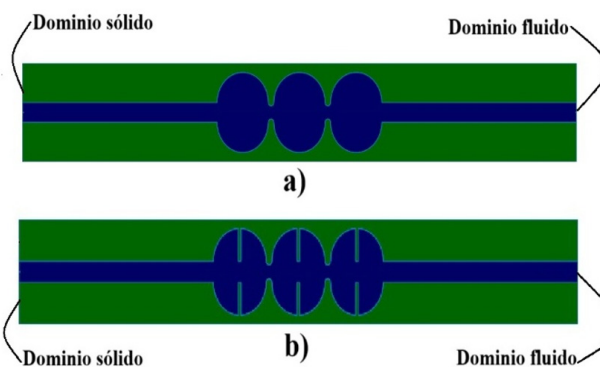


Figura 3 - a) Combustor plano con paredes onduladas semicirculares (W). b) Combustor plano con paredes onduladas semicirculares y aletas (WF).

Ecuaciones de gobierno

Los límites de extinción y de escape de cada micro-combustor analizado, son determinados mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional, con ayuda del paquete comercial ANSYS FLUENT R22. Dado que existe interacción entre la fase gaseosa y las paredes del combustor, se deben resolver las ecuaciones de gobierno para dos dominios: el fluido y el sólido. Para el dominio fluido, se resuelven las ecuaciones de conservación de masa, momento, energía y transporte de especies químicas. Se toman en cuenta las siguientes consideraciones para modelar el flujo: se considera un flujo estacionario; la densidad es considerada como función únicamente de la temperatura, más no de la presión, tal y como se realizó en el estudio [14]; para los parámetros de operación del dispositivo, el número de Reynolds se encuentra en un rango de 24-161, por lo que el flujo se considera laminar; a fin de simplificar el problema, se considera que el flujo es bidimensional; para la cinética de las reacciones, se usa el mecanismo propuesto por Nakamura *et al.* [15], planteado para la combustión de amoníaco sin considerar reacciones de superficie. Se optó por dicho modelo porque, en un estudio realizado por Han *et al.* [8], este mecanismo fue empleado para mezclas de hidrógeno y amoníaco, obteniéndose resultados validados con datos experimentales. Dadas las consideraciones anteriores, las ecuaciones de gobierno son las siguientes:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) &= -\nabla P \\ + \nabla \cdot \left(\mu \left[\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T \right] - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{v} (\rho E + P) &= \nabla \cdot (K \nabla T) \\ + \nabla \cdot \mu \left[\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} \right] \cdot \mathbf{v} \\ - \nabla \cdot \left(\sum_i h_i \mathbf{J}_i \right) + S \end{aligned} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \chi_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i \quad (4)$$

donde, ρ , μ y K son la densidad, viscosidad y conductividad térmica de la mezcla gaseosa, $\mathbf{v}$ es el campo de velocidad, P es el campo de presión, E es la energía total del fluido, T es el campo de temperatura, S es la energía liberada durante la reacción química, h_i es la entalpía de la i -ésima especie, χ_i es la fracción molar de la i -ésima especie, R_i es la tasa de generación o destrucción de la i -ésima especie debido a la reacción química, y $\mathbf{J}_i$ es el vector de difusión de masa de la i -ésima especie.

En el dominio sólido, la ecuación de difusión del calor determina el balance neto de energía:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (5)$$

El límite de extinción se define como la velocidad de entrada más pequeña para la cual, el dominio gaseoso permanece con la misma temperatura a la que ingresa el gas al combustor. Por su parte, el límite de escape se define como la velocidad de entrada más alta, para la cual ocurre el mismo fenómeno.

Condiciones de frontera

Con la finalidad de disminuir el costo computacional, se considera únicamente la mitad del modelo. El modelo cuenta con 5 fronteras, numeradas como se muestra en la Figura 4. En la frontera 1 una mezcla estequiometría de aire-combustible ingresa al combustor con un perfil de velocidad y una temperatura constantes; la velocidad tiene únicamente componente axial, y la temperatura de la mezcla se considera de 300K. La frontera 2 representa la salida del combustor, y donde se considera una presión manométrica de cero. La frontera 3 representa la interfaz entre el dominio fluido y sólido, donde se considera continuidad entre la temperatura del fluido y la temperatura del sólido. La frontera 4 representa las paredes exteriores del combustor, donde se considera la acción conjunta de la pérdida de calor por convección y por radiación. Las paredes del combustor están hechas de acero, correspondiente a una emisividad de 0.7. Adicionalmente, se considera una temperatura ambiente de 300 K y un coeficiente de transferencia de calor de 20 W/m²K, el cual es típico en casos de convección natural, tal como se hizo en [14]. La pérdida de calor por radiación en la frontera 4 se define mediante la siguiente ecuación:

$$h(T_w - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_\infty^4) = 0 \quad (6)$$

donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, T_w es la temperatura de la pared exterior del combustor, T_∞ es la temperatura del medio ambiente exterior, ε es la emisividad del acero y σ es la constante de Stefan Boltzmann. La frontera 5 representa el plano de simetría del combustor.

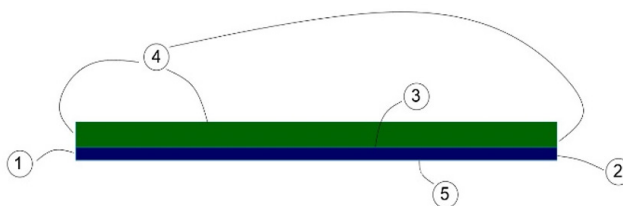


Figure 4 - Fronteras del dominio computacional.

Resultados y discusión

Los mapas de estabilidad para los tres diseños propuestos se presentan en las Figuras 5–7. La velocidad de entrada se varió entre 0.5 y 4 m/s, mientras que la fracción de hi-

drógeno en el combustible tomó valores de 0, 50 y 100% (completándose el resto con amoníaco). Para cada combinación de condiciones operativas, se realizaron simulaciones numéricas y se analizó la distribución de temperatura a lo largo del dominio fluido. Cuando la temperatura se mantuvo prácticamente uniforme y coincidente con la temperatura de entrada, se consideró que no había combustión. En cambio, cuando se observó un incremento apreciable de temperatura respecto a la condición de entrada, se clasificó como un caso con presencia de flama. Dicho método fue empleado también en el estudio realizado por Qian *et al.* [16]. Los tres mapas muestran claramente que, en los casos en los que el combustible contiene hidrógeno, la flama es más susceptible al escape que a la extinción, pues la mezcla es capaz de hacer ignición en las velocidades más pequeñas. A velocidades superiores del límite de escape, el incremento de la velocidad de entrada conlleva a una reducción del tiempo de residencia, de modo que el tiempo de reacción es insuficiente para que ocurra la combustión en el interior del combustor. Adicionalmente, se observa que, al reducir el porcentaje de hidrógeno, también disminuye el límite de escape. Esto implica un aumento en la temperatura requerida para la ignición del combustible, lo que a su vez incrementa el tiempo necesario para alcanzar dicha temperatura dentro del combustor.

Otro aspecto a considerar, es que una flama con 100% de amoníaco puede sustentarse para un gran rango de velocidades de entrada en los combustores W y WF. Esto se debe a que, las zonas de recirculación generadas en las cavidades circulares actúan como resistencias al paso del calor que circula de la flama a la pared, reduciendo por tanto las pérdidas de energía térmica y facilitando la sustentación de la flama. Esto se refleja en la Figura 8, donde se muestran los mapas de contorno del número de Péclet para los combustores W y WF. Se observa que las cavidades circulares son zonas de bajo número de Péclet, por lo que en dichas regiones el calor se transporta principalmente por difusión, la cual es relativamente pequeña en gases; por esta razón, las pérdidas de calor se reducen.

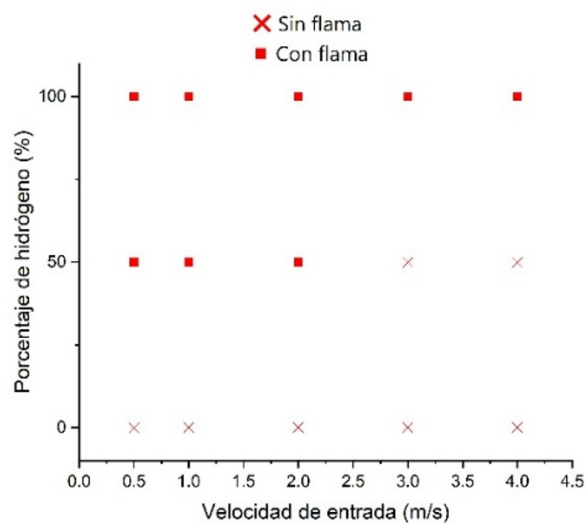


Figure 5 – Mapa de estabilidad para el combustor S

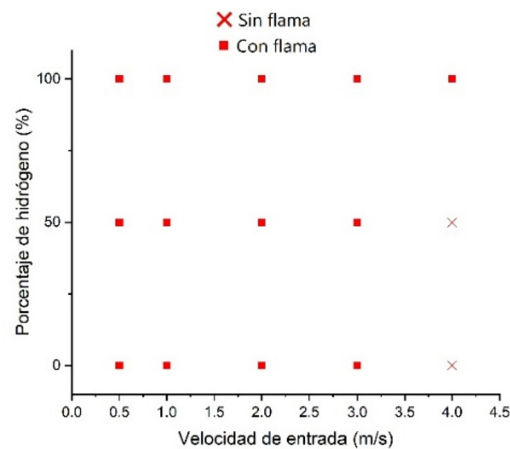


Figure 6 – Mapa de estabilidad para el combustor W

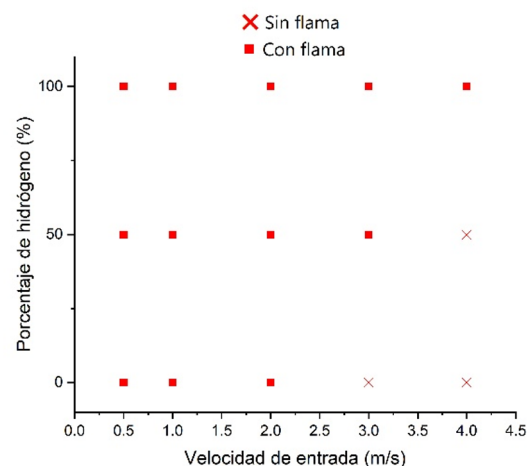


Figure 7 – Mapa de estabilidad del combustor WF

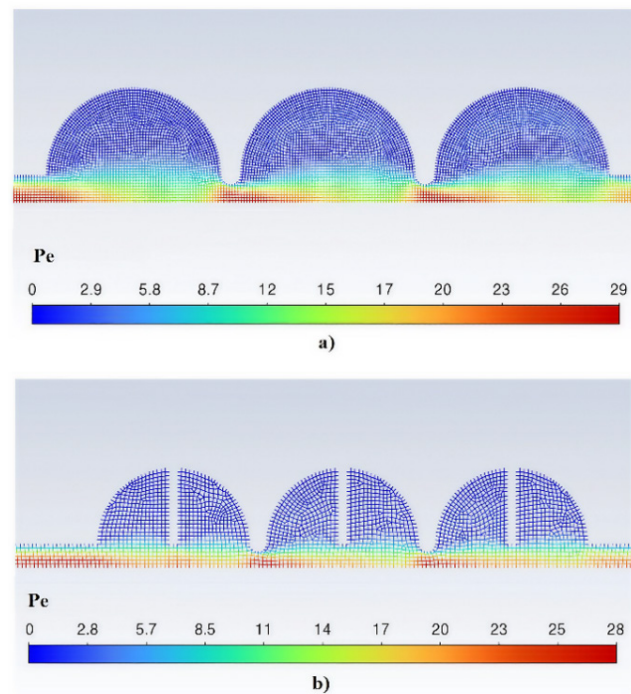


Figure 8 – Contornos del número de Péclet local para a) el combustor W, y b) el combustor WF.

En las Figuras 9-11 se comparan los perfiles de temperatura en la pared exterior de los combustores S, W y WF; dicha comparación se hace para 0% (Figura 9), 50% (Figura 10) y 100% (Figura 11) de hidrógeno en el combustible, y tomando en cuenta que la velocidad de entrada es de 1m/s. Se aprecia que, exceptuando el caso en el que el combustible es amoníaco puro, el diseño WF es el que alcanza los valores de temperatura más altos en la pared, seguido por el combustor W; lo anterior indica una mejora en la transferencia de calor entre la flama y el sólido con el añadido de las aletas. Tanto el combustor W, como el WF, presentan un perfil de temperatura con forma de campana, donde la temperatura máxima se encuentra en la parte intermedia, donde se encuentran las cavidades circulares. Por su parte el combustor S presente un perfil similar a una curva hiperbólica, donde el mayor incremento de la temperatura ocurre en la región en la cual la flama hace ignición.

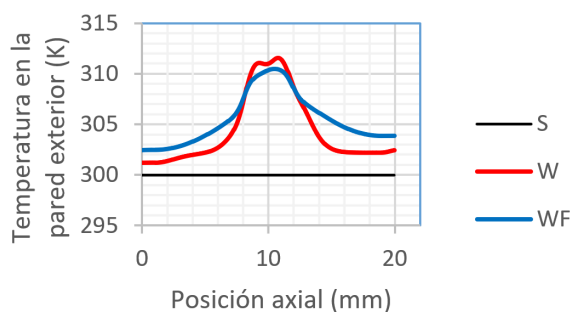


Figure 9 – Perfil de temperatura en la pared exterior de los tres combustores, con 0% de H₂.

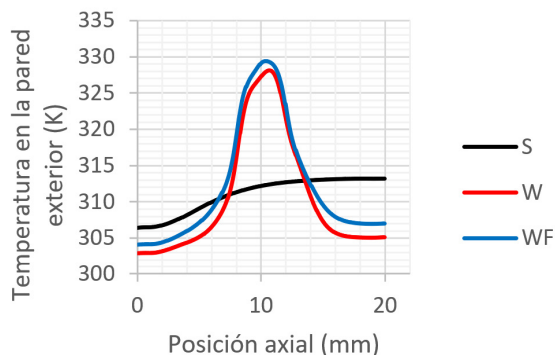


Figure 10 – Perfil de temperatura en la pared exterior de los tres combustores, con 50% de H₂.

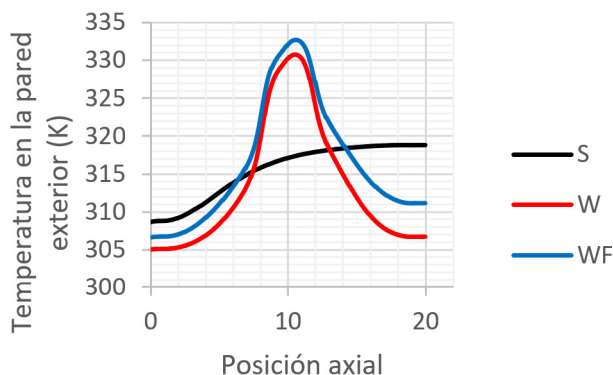


Figure 11 – Perfil de temperatura en la pared exterior de los tres combustores, con 100% de H₂.

La Figura 12 compara los valores máximos de temperatura en la pared exterior para las condiciones de operación con las que se obtuvieron las Figuras 9-11. A su vez, en la Figura 13 se compara la máxima diferencia de temperatura en la pared, con la finalidad de cuantificar la uniformidad de la temperatura. Se aprecia como en todos los casos, el aumento del porcentaje de hidrógeno incrementa la temperatura máxima alcanzada; esto gracias a su poder calórico. A pesar de que los diseños W y WF alcanzan mayores temperaturas en la pared exterior, el diseño S presenta una mejor uniformidad en todos los casos. Para la operación de un sistema MTPV, es deseable que la temperatura de la pared alcance valores altos, pero también es deseable una buena uniformidad de la mima.

Para fines de comparación, en la Figura 14 se comparan los perfiles de temperatura en la línea de simetría de los tres combustores para una velocidad de entrada de 1m/s y para un combustible con 50% de hidrógeno. Se observa que la máxima temperatura alcanzada en la línea de simetría es de 350.87K, en el combustor W, seguido del combustor WF, donde la máxima temperatura es de 328.99K. Ambos valores están muy por debajo de los valores reportados para los diseños propuestos por otros autores (rondando los 1800K para llamas de hidrógeno). En estudios previos, se han reportado fenómenos similares, en los que una flama al interior de un conducto estrecho alcanzaba una temperatura de sólo unos cuantos grados por encima de la temperatura ambiente. Dichas llamas fueron nombradas “llamas débiles” [17]. Una flama débil se caracteriza por presentar una luminiscencia muy tenue y una baja tasa de liberación de calor, de modo que su temperatura apenas se eleva unos cuantos grados por encima de la temperatura ambiente. Este tipo de llamas suele observarse en micro-reactores operando con velocidades de entrada reducidas (típicamente inferiores a 1 m/s) y bajo condiciones de calentamiento externo. En el estudio de Tsuboi *et al.* [17], se analizaron las diferencias de temperatura entre la pared y la flama en condiciones asociadas a llamas débiles, encontrándose valores entre 0 y 30 K, lo cual coincide con lo encontrado en el presente trabajo. Esta baja temperatura puede atribuirse al fuerte acoplamiento térmico entre la pared y la flama. En consecuencia, es plausible que las llamas observadas en este estudio correspondan a llamas débiles; no obstante, se requiere una investigación más detallada del fenómeno para confirmarlo con certeza.

Conclusiones

El presente estudio mostró resultados preliminares obtenidos sobre la sustentación de llamas de hidrógeno-amoníaco en un combustor plano de paredes onduladas y aletas. Los principales resultados fueron:

- Los diseños con paredes onduladas W y WF aumentan el rango de condiciones de operación en los que es posible sustentar una flama en el combustor.
- Con los diseños W y WF, es posible sustentar una flama

de 100% de amoníaco para un amplio rango de velocidades de entrada.

- Los diseños W y WF muestran una mayor temperatura en la pared exterior con respecto al diseño S. El combustor WF tiene una ligera ventaja sobre el W dado el incremento de la transferencia de calor con las aletas.
- El diseño S mantiene una mayor uniformidad de la temperatura en la pared exterior.
- Para cada uno de los casos analizados, el incremento de la temperatura de la flama con respecto del ambiente fue pequeño en comparación con los valores reportados por otros autores.

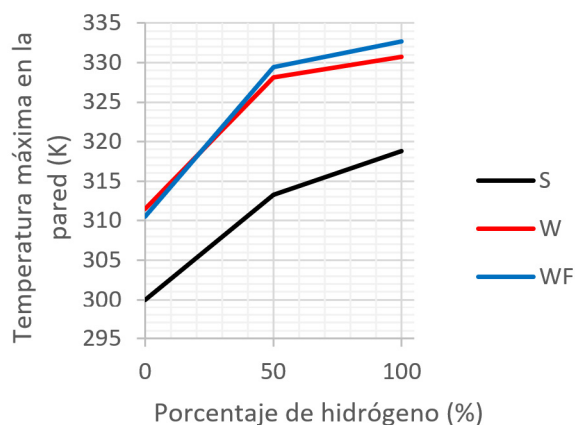


Figure 12 – Temperatura máxima en la pared exterior del combustor en función del porcentaje de hidrógeno; velocidad de entrada de 1m/s.

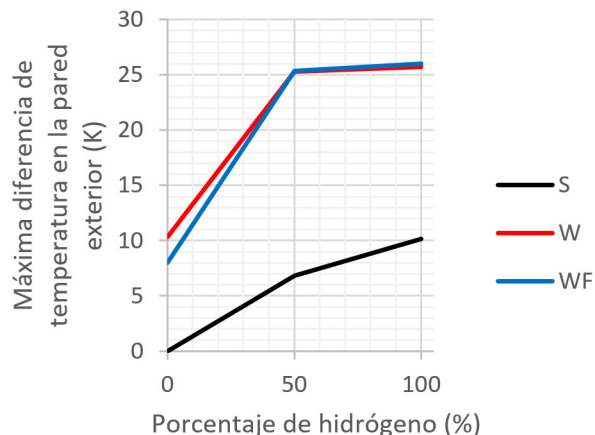


Figure 13 – Diferencia máxima de temperatura máxima en la pared exterior del combustor en función del porcentaje de hidrógeno; velocidad de entrada de 1m/s.

Los resultados obtenidos muestran que los diseños propuestos de micro-combustor con paredes onduladas y aletas permiten una mayor estabilidad de las flamas de hidrógeno-amoníaco que un diseño plano convencional. Sin embargo, los niveles de temperatura alcanzados, tanto en la flama, como en la pared exterior, son pequeños comparados con los obtenidos en otros diseños de combustores para sistemas MTPV. Lo anterior deja en claro que es necesaria la implementación de otras estrategias a fin de mejorar el desempeño

térmico del combustor, y hacerlo viable para su aplicación en un sistema MTPV. Se especula que el recubrir una pequeña sección de la entrada del combustor con un catalizador podría mejorar tanto la estabilidad de flama, como el desempeño térmico. Adicionalmente, futuras investigaciones deben centrarse en analizar la influencia de las pérdidas de calor en las características de la flama en combustores de paredes onduladas, así como también deben abordarse las emisiones de NOx y su mitigación. De igual forma, considerar el flujo como tridimensional en futuras investigaciones, puede revelar otros comportamientos de la flama causados por posibles asimetrías del flujo.

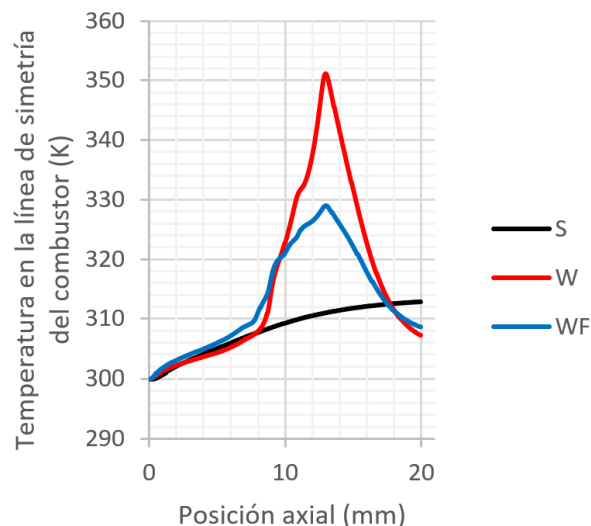


Figure 14 – Perfil de temperatura en la línea de simetría del combustor; las condiciones de operación son 50% de hidrógeno en el combustible, y velocidad de entrada de 1m/s.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento por el apoyo financiero proporcionado por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) a través de los proyectos DGAPA-PA-PIIT IN103124 e IN102126.

Referencias

- [1] Y. Ju, K. Maruta, *Progress in Energy and Combustion Science* 37 (2011) 669
- [2] E. Jiaqiang, B. Luo, D. Han, J. Chen, G. Liao, F. Zhang, J. Ding, *Energy* 239 (2022) 122509.
- [3] M. Nauman, J. Pan, Y. Wang, F. Li, A. Oluwaleke, A. Raza, *International Journal of Hydrogen Energy* 49 (2024) 1165.
- [4] Z. Mansouri, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* 163 (2021) 108371.
- [5] L. Han, J. Li, D. Zhao, Y. Xi, X. Gu, N. Wang, *Fuel* 289 (2021) 119755.

- [6] P.R. Resende, L.C. Morais, C. Pinho, A.M. Afonso, *energies* 15 (2022) 626.
- [7] S. Ni, D. Zhao, X. Zhu, *Fuel* 303 (2021) 121325.
- [8] L. Han, J. Li, D. Zhao, T. Cai, N. Wang, *Applied Thermal Engineering* 196 (2021) 117328.
- [9] P.R. Resende, L.L. Ferrás, A.M. Afonso, *International Journal of Hydrogen Energy* 48 (2023) 13682.
- [10] G.Z. Ghaeini, M.P. Ghofrani, S.M. Bathaei, M. Kim, J.A. Esfahani, K.C. Kim, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 45 (2023) 290.
- [11] T. Cai, D. Zhao, Y. Sun, S. Ni, W. Li, D. Guan, B. Wang, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 145 (2021) 111150.
- [12] S. Sheykhabglou, P. Dimitriou, *International Journal of Hydrogen Energy* 98 (2025) 957-984.
- [13] H. Gao, J. Li, A. Li, Y. Li, X. Xu, Y. Wang, M. Zhou, W. Wu, L. Duan, *International Journal of Hydrogen Energy* 51 (2024) 179-189.
- [14] H. Rong, H. Zhao, T. Cai, *International Journal of Hydrogen Energy* 49 (2024) 1303-1314.
- [15] H. Nakamura, S. Hasegawa, T. Tezuka, *Combustion and Flame* 185 (2017) 16-27.
- [16] P. Qian, M. Liu, X. Li, F. Xie, Z. Huang, C. Luo, X. Zhu, *Applied Thermal Engineering* 174 (2020) 115281.
- [17] Y. Tsuboi, T. Yokomori, K. Maruta, *Proceedings of the Combustion Institute* 32 (2009) 3075.