

F. A. Avid, J. C. Bessons, P. Gamazo, J. J. Penzo, M. A. Rucheta, M. A. Storti (Eds.)
Concordia, 6-9 Noviembre 2023

EFFECTO TÉRMICO DE LA ADICIÓN DE HIDRÓGENO AL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE METANO EN UN QUEMADOR DE MEDIOS POROSOS INERTE

THERMAL EFFECT OF ADDING HYDROGEN TO THE METHANE COMBUSTION PROCESS IN AN INERT POROUS MEDIA BURNER

Christian Hernández^a y Mario Toledo^a

^aDepartamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, Avenida España 1680, Valparaíso, Chile, mario.toledo@usm.cl, <https://mecanica.usm.cl/>

Palabras clave: Combustión, Medios porosos inertes, Hidrógeno, Fase sólida, Fase gaseosa.

Resumen. El Plan Estratégico Nacional de Hidrógeno Verde busca fomentar el uso del hidrógeno como combustible y su desarrollo tecnológico en Chile. En este contexto, y considerando las diferentes propiedades termofísicas que presenta este combustible en comparación con el metano, la presente investigación tiene como objetivo identificar y caracterizar el efecto térmico de la adición de hidrógeno al proceso de combustión de metano en un quemador de medio poroso inerte (MPI). La metodología de investigación considera el uso de un modelo matemático bifásico que considera las ecuaciones de conservación de energía de la fase sólida y gaseosa, y de especie química con una cinética de reacción detallada. El modelo matemático se resuelve mediante el programa PREMIX, adaptado para la simulación de la combustión filtrada en reactores de MPI, utilizando el paquete de datos CHEMKIN. Se obtienen los principales parámetros operacionales en el quemador como son la velocidad del frente de llama y los perfiles térmicos, tanto de la línea base (combustión de metano) como de las pruebas con adición de hidrógeno en la mezcla. Mediante un análisis de las temperaturas de la fase sólida y gaseosa se determina el efecto del hidrógeno en los mecanismos de transferencia de calor y en la estabilidad de llama en estos quemadores. Adicionalmente, se contrastan los resultados numéricos con experimentos. Los principales resultados indican una disminución de la temperatura del frente de llama con el aumento de la concentración de hidrógeno en la mezcla, y un aumento de la velocidad del frente de llama bajo estas mismas condiciones.

Keywords: Combustion, Inert porous media, Hydrogen, Solid phase, Gas phase.

Abstract. The National Strategic Plan for Green Hydrogen seeks to promote the use of hydrogen as a fuel and its technological development in Chile. In this context and considering the different thermophysical properties that this fuel presents in comparison with methane, the present research aims to identify and characterize the thermal effect of the addition of hydrogen to the methane combustion process in a porous inert medium (PIM) burner. The research methodology considers the use of a two-phase mathematical model that considers the equations of energy conservation of the solid and gas phase, and of chemical species with detailed reaction kinetics. The mathematical model is solved computationally using the PREMIX program, adapted for the simulation of filtered combustion in MPI reactors, using the CHEMKIN data package. The main operational parameters in the burner are obtained, such as combustion front velocity and thermal profiles, both from the baseline (methane combustion) and from the tests with the addition of hydrogen in the mixture. By means of an analysis of the solid and gas phase temperatures, the effect of hydrogen on the heat transfer mechanisms and flame stability in these burners is determined. Additionally, the numerical results are contrasted with experiments. The main results indicate a decrease of the combustion front temperature with increasing hydrogen concentration in the mixture, and an increase of the flame front velocity under these same conditions.

1 INTRODUCCIÓN

La combustión de hidrógeno es un proceso de gran interés en la industria debido a su alta eficiencia energética y a su potencial uso como combustible limpio. Por ejemplo, se puede utilizar en motores de combustión interna, turbinas de gas, celdas de combustible y otros dispositivos (Yip, 2019; Manigandan, 2023; Baroutaji, 2019).

El hidrógeno es un gas altamente reactivo que puede quemarse en presencia de oxígeno por medio de una reacción exotérmica que produce agua y una gran cantidad de energía en forma de calor. La reacción química característica de un paso se presenta a continuación:



La adición de hidrógeno en mezclas de combustibles también ha sido objeto de numerosos estudios en los últimos años. Esto debido a que puede mejorar la eficiencia de combustión de otros combustibles, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la estabilidad de la llama. Se han llevado a cabo estudios experimentales y numéricos (Q. Li, 2017; J. Chen, 2015; A. Kumar, 2009; H. Wu, 2014; M. Marzouk, 2018; S. Balamurugan, 2016; J. Li, 2014; G. Chen, 2018) que demuestran los beneficios de la mezcla metano-hidrógeno para diferentes composiciones volumétricas. En la Tabla 1 se presentan las características de combustión (propiedades termofísicas) del metano y el hidrógeno en condiciones normales.

	Metano	Hidrógeno
Densidad, kg/m ³	0.66	0.08
Viscosidad dinámica · 10 ⁻⁵ , P	11.0	8.80
Poder calorífico inferior, MJ/kg	50.05	120.00
Velocidad de combustión laminar, m/s – punto esteq.	0.38	3.51
Energía mínima de ignición, mJ	0.280	0.011
Temperatura de autoignición, K	859	773 – 850
Número de octano	120	-
Temperatura adiabática de la llama (con aire), K	2223	2483
Relación de capacidad calorífica, γ	1.32	1.41
Densidad gravimétrica del hidrógeno, % en peso	25.0	100.0

Tabla 1: Propiedades termofísicas del metano e hidrógeno en condiciones normales (300 K y 110 kPa) (Valera-Medina, 2018).

Recientemente, investigadores de la Academia de Ciencias de Rusia han realizado una revisión de las perspectivas del uso de las mezclas de hidrógeno y metano desde diferentes áreas de interés (Makaryan, 2022). Desde el punto de vista técnico, cuando se utilizan mezclas de metano-hidrógeno con bajo contenido de hidrógeno, las medidas de seguridad y los riesgos son similares a los que existen cuando se trabaja con gas natural. Al aumentar el contenido de hidrógeno en la mezcla, existen graves problemas logísticos asociados a la dificultad de utilizar la misma infraestructura de distribución del gas. La principal diferencia entre el hidrógeno como combustible y los combustibles de hidrocarburos tradicionales es la velocidad de combustión laminar que es significativamente mayor, en condiciones estándares es al menos seis veces superior a la del metano. Además, tiene límites de concentración de propagación de la llama mucho más amplios en comparación con hidrocarburos, por esto mismo, se investiga su uso como aditivo en combustibles tradicionales, principalmente en el gas natural comprimido. En esta misma línea, se sabe que la adición de hidrógeno al metano aumenta su velocidad de propagación de llama laminar reduciendo su tiempo de combustión,

lo que conduce a altas tasas de liberación de calor y una disminución entre el tiempo de ignición del combustible y su máxima liberación de calor en comparación con el metano. Al mismo tiempo, la presencia de metano en la mezcla reduce los riesgos de combustión anormal como el flashback o la detonación, que son aspectos característicos de la combustión de hidrógeno.

Dentro de los estudios numéricos realizados para estas mezclas, existen distintos modelos cinéticos de combustión que describen la reacción entre el metano y el hidrógeno. La complejidad de estos modelos se encuentra en el número de reacciones y especies que consideran en el proceso de combustión, así como la cantidad de parámetros que influyen en este proceso. En el estudio de literatura realizado por Li et al. (Li, 2019) se muestran los principales modelos cinéticos reducidos, los que se encuentran validados tanto para el metano como para el hidrógeno, así como para las mezclas de metano-hidrógeno. El primer modelo reducido es el desarrollado por Lin et al. (Lin ZY, 2007) que considera 17 especies y 12 reacciones, el cual se desarrolla a partir del mecanismo GRI-1.2 utilizando los métodos de reducción SA (Stochastic Approximation) y QSSA (Quasi Steady State Assumption). El modelo reducido presentado por Nikolaou et al. (Nikolaou, 2013) considera 8 especies y 5 reacciones, el que se desarrolla a partir del mecanismo de GRIMech-3.0 utilizando los mismos métodos de reducción. Li et al. también realizaron un estudio comparativo de los modelos cinéticos detallados y reducidos de la combustión de metano-hidrógeno utilizando principalmente el método DRGEP (Direct Relation Graph and Error Propagation), el cual permite generar modelos simplificados de mecanismos detallados de reacciones química. Este método se basa en la idea de que algunas especies y reacciones en un mecanismo detallado son más importantes que otras para la predicción de propiedades cinéticas, al propagar los errores a través del mecanismo se puede identificar las especies y las reacciones que tienen mayor impacto en la predicción de estas propiedades, y es así como se puede obtener un modelo simplificado. Otra revisión de la literatura sobre los modelos cinéticos de combustión de mezclas de hidrógeno fue realizada por Semenikhin et al. (Semenikhin, 2022), donde se estudiaron nueve modelos cinéticos de simulación numérica del proceso de combustión (tres modelos Konnov-2019 con 51, 74 y 128 componentes, dos modelos Stagni con 55 y 59 componentes, y los modelos CRECK-2020, Wang-2018, NUIGMech-1.0, y GRIMech-3.0), los resultados de estos modelos fueron contrastados con datos experimentales de los principales laboratorios del mundo. Los parámetros que se utilizaron para la validación de los modelos fueron el tiempo de retraso de la ignición, la velocidad de propagación de la llama laminar y la distribución de la concentración de NO sobre el quemador.

Finalmente, es importante ahondar en el concepto de combustión en medios porosos inertes (MPI) el cual fue concebido por Weinberg (Weinberg, 1971). En esta tecnología, la combustión de una mezcla de gases se produce dentro de los huecos de una matriz porosa, obteniendo características diferentes a las observadas en otros sistemas, como la combustión convencional desarrollada en fase gaseosa. Esto se debe al hecho de que las propiedades termofísicas de las fases sólida y gaseosa son muy diferentes, y hay una mayor transferencia de calor por conducción en la matriz sólida. Por otra parte, la transferencia de calor por radiación toma relevancia debido a que se produce incluso aguas arriba de la zona de combustión, lo que precalienta la entrada de la mezcla aire – combustible y genera una mejor combustión, este fenómeno Weinberg lo denominó combustión con exceso de entalpia. Debido a las ventajas que presenta esta tecnología como la mejorada transferencia de calor en la zona de combustión, la alta velocidad de llama, menores emisiones y una alta modulación de potencias (J.R. Howell, 1996; V.K. Pantangi, 2011), una gran cantidad de investigadores han mostrado su interés en el desarrollo diversas aplicaciones domésticas e industriales (M.A. Mujeeb, 2009; M.A.; A. Banerjee, 2021; D. Trimis, 1996).

La combustión en medios porosos inertes se caracteriza por la presencia de dos fases que interactúan de forma conjunta durante el proceso. Debido a la complejidad de la medición experimental de las temperaturas en las fases sólida y gaseosa, se han desarrollado varios modelos numéricos que permiten predecir el comportamiento térmico del frente de llama, tanto para el caso del frente estabilizado (sumergido o superficial) como para el caso del frente viajando (sumergido). Un primer artículo publicado por Kennedy et al. (L.A. Kennedy, 2000) analiza comparativamente las estructuras químicas de las ondas de combustión por filtración en un medio poroso inerte para mezclas pobres y ricas de metano-aire en un reactor cuyo frente de llama se encuentra sumergido (aguas arriba y aguas abajo). En este artículo se muestran datos experimentales y resultados numéricos para la temperatura máxima de la fase sólida (T_{sm}) y velocidades (u) del frente de llama para mezclas de metano-aire con una velocidad de filtración constante de 25 cm/s. Otro artículo publicado por Bubnovich y Toledo (V. Bubnovich, 2007) estudia las ondas de combustión autosostenidas durante la filtración de mezclas pobres de metano-aire en medios porosos inertes utilizando la aproximación de dos temperaturas. Tales procesos se caracterizan por una intensa interacción térmica entre el gas y el material poroso. Debido a la transferencia de calor interfacial, la fase sólida es capaz de redistribuir el calor absorbido de los productos de reacción a la mezcla no quemada. La solución analítica se construye en tres regiones diferentes: la región de precalentamiento, la región de reacción y la región ocupada por los productos de combustión. Se derivan expresiones analíticas que predicen los perfiles de temperatura y fracción de masa de metano en el frente de llama, así como la velocidad del frente y la extensión longitudinal de la región de reacción (espesor del frente de combustión). Los resultados se confirman mediante cálculos numéricos utilizando el método de diferencias finitas y un conjunto completo de ecuaciones básicas. Existen diferentes algoritmos, métodos numéricos y softwares que permiten predecir el comportamiento operacional de diferentes quemadores de medios porosos. Es importante mencionar que uno de los principales parámetros que se debe establecer al momento de utilizar una aproximación numérica del fenómeno es el mecanismo cinético de reacción. En base a las investigaciones analizadas previamente, el objetivo principal de este estudio numérico es determinar las temperaturas internas de la fase sólida y gaseosa en los reactores de medios porosos inertes con frente de llama sumergido, para distintas mezclas de metano-hidrógeno bajo diferentes configuraciones de relación de equivalencia (ϕ), utilizando como mecanismo de reacción GRIMech-3.0.

2 METODOLOGÍA NUMÉRICA

Para el desarrollo del modelo, se utilizarán esferas de alúmina como medio poroso inerte cuya porosidad (ϵ) es cercana a un 40%, este parámetro de diseño es controlado, así también distintos parámetros operacionales como la relación de equivalencia (ϕ), la velocidad de filtración (u_f), los flujos de premezcla, entre otros.

Se sabe que la estabilidad del frente de llama depende del contenido de calor de la mezcla (metano-hidrógeno) y de las propiedades de la matriz sólida (esferas alúmina sólida). Para visualizar la situación física, se presenta en la Figura 1.A una representación del medio poroso de alta capacidad térmica inserto en un tubo de cerámica con un largo de 20 cm. Si el flujo combustible-aire se encuentra encendido al interior del reactor de medios porosos, aparece una onda de combustión (o frente de llama) que puede propagarse sobre la longitud del medio poroso (aguas arriba o aguas abajo), como se presenta en la Figura 1 donde se muestra el estudio realizado por Kennedy et al. (L.A. Kennedy, 2000). La dirección y la magnitud de la velocidad de propagación de la onda (o frente de llama) dependen principalmente de los siguientes factores: propiedades termofísicas del gas y del sólido, y la energía de la mezcla. Este parámetro se calcula mediante el avance térmico del frente de llama dentro del reactor.

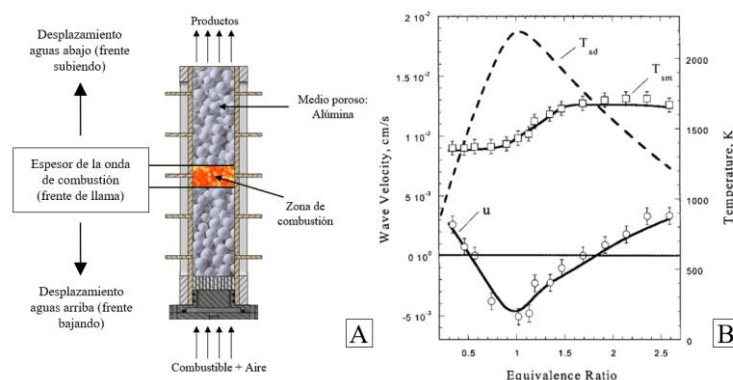


Figura 1: (A) Esquema de la situación física. (B) Propagación del frente de llama para la mezcla de metano-aire con una relación de equivalencia que varía entre 0.3 a 2.6. La curva de velocidad del frente indica si esta viaja aguas arriba o aguas abajo (L.A. Kennedy, 2000).

El modelo matemático de combustión en medios porosos inertes considera cuatro ecuaciones gobernantes que se describen a continuación:

- Ecuación de continuidad para la mezcla:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho_g \cdot u_g) = 0 \quad (2)$$

- Ecuación de energía para el gas:

$$\varepsilon \cdot (\rho \cdot c_p)_g \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + u_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \cdot \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) - a \cdot (T_g - T_s) + \Delta h_c \cdot K \cdot \bar{w} \cdot w_0 \cdot \varepsilon \cdot \rho_g \cdot e^{-E/R \cdot T_g} \quad (3)$$

- Ecuación de energía para el sólido:

$$(1 - \varepsilon) \cdot (\rho \cdot c_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{sf} \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) + a \cdot (T_g - T_s) - \beta_v \cdot (T_s - T_0) \quad (4)$$

- Ecuación de continuidad para la especie química:

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + u_g \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = \frac{1}{\rho_g} \frac{\partial}{\partial z} \left(D \cdot \rho_g \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) - K \cdot \bar{w} \cdot e^{-E/R \cdot T_g} \quad (5)$$

Este modelo incluye dos ecuaciones de energía, una para el gas y otra para el sólido, debido a que en el sistema físico no existe equilibrio térmico entre ambas fases, es decir, $T_g \neq T_s$. Adicionalmente, ambas ecuaciones de energía incluyen un término más que describe la intensidad del intercambio de calor entre la superficie interna del medio poroso y la del gas (parámetro “ a ”). También se considera los mecanismos de transporte de calor y masa por conducción, convección, radiación térmica, reacción química y la pérdida de calor hacia el entorno a través de la superficie lateral que rodea el medio poroso, en este caso de forma cilíndrica.

La metodología numérica consiste en resolver el modelo matemático presentado anteriormente, basado en una aproximación de dos temperaturas y una química de combustión detallada, para analizar los perfiles de las especies y el mecanismo de combustión del frente de llama. Este modelo matemático es aplicado en el código unidimensional de llama laminar PREMIX, el cual es modificado para la combustión en medios porosos. Este código originalmente es desarrollado para la combustión convencional de llama libre, donde el principal mecanismo de transferencia de calor que participa en el proceso es la convección. La modificación del código PREMIX para la combustión en medios porosos considera la incorporación de la ecuación de energía para el sólido (Ecuación 4), que permite considerar la matriz porosa en el proceso, y así potenciar los mecanismos de transferencia de calor por conducción y radiación (L.A. Kennedy, 2000). En este código se utiliza una cinética química

de multipaso, y la determinación precisa de las propiedades termoquímicas y de transporte del gas se adquieren del paquete CHEMKIN de subrutinas y bases de datos, además, se utiliza GRIMech-3.0 como mecanismo de cinética química que considera 325 reacciones y 53 especies. Tanto el paquete de datos CHEMKIN como el mecanismo de cinética química GRIMech-3.0 fueron obtenidos del Laboratorio de Combustión de la Universidad de California (Berkeley, s.f.).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Efectos de la adición de hidrógeno en el gradiente térmico

A continuación, se presentan los efectos de la adición de hidrógeno en la combustión de metano en un quemador de medios porosos para un frente de combustión que viaja aguas arriba. La Figura 2.A muestra la temperatura máxima alcanzada por la fase sólida y gaseosa del reactor en función de la relación de equivalencia en un rango de 0.7 a 1.0 para distintas concentraciones de hidrógeno en la mezcla (0% a 40% de H_2). Por su parte, la Figura 2.B presenta un contraste entre los resultados numéricos y experimentales obtenidos, en las mismas condiciones mencionadas anteriormente.

En la Figura 2.A, la temperatura máxima es alcanzada con una relación de equivalencia estequiométrica ($\phi = 1.0$), independiente de la adición de hidrógeno en la mezcla. Por otra parte, la adición de hidrógeno en la mezcla disminuye la temperatura de la zona de combustión (frente de llama), tanto en la fase sólida como en la fase gaseosa. Esto se puede atribuir a la disminución del poder calorífico de la mezcla metano-hidrógeno. Además, se tienen presente las propiedades de difusión de las moléculas, donde el hidrógeno al ser una molécula más pequeña tiende a difundirse más rápidamente en el medio poroso en comparación con el metano, por lo que su velocidad de reacción es mayor entregándole la capacidad de reaccionar primero dentro del reactor. Además, se tiene el fenómeno de reducción de dióxido de carbono (CO_2) en los productos de combustión de mezclas de hidrógeno-metano. La molécula de CO_2 tiene una capacidad de radiación que favorece la transferencia de calor en el reactor. En la Figura 2.A, también se aprecia que el gradiente térmico entre las concentraciones de hidrógeno (desde 0% hasta 40% H_2) permanece casi constante entre 10 a 20 K en todo el rango de relación de equivalencia. Esto refleja que la disminución de temperatura del frente de llama tanto para la fase sólida como la fase gaseosa es casi constante entre un porcentaje de hidrógeno y otro. Esta condición se da para todas las relaciones de equivalencias analizadas.

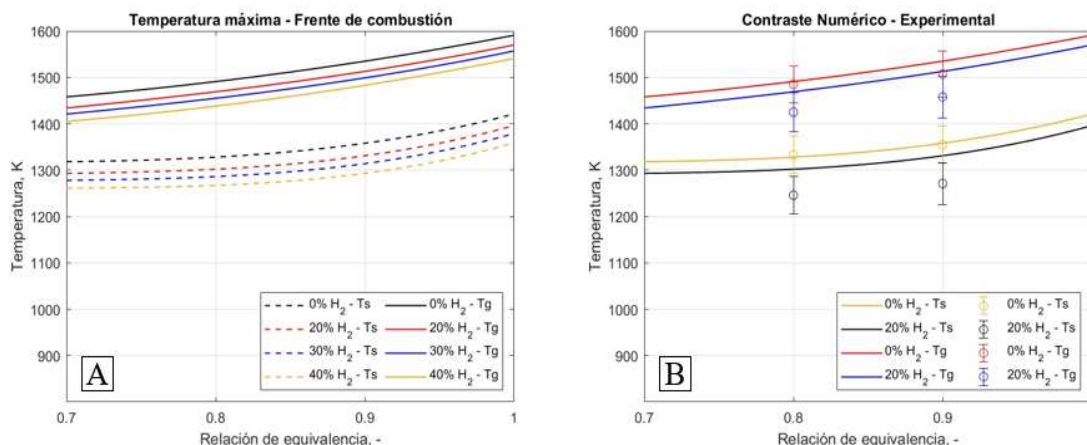


Figura 2: (A) Temperatura máxima de la fase sólida y gaseosa en función de la relación de equivalencia para distintas concentraciones de hidrógeno en la mezcla. (B) Contraste numérico-experimental de las temperaturas máximas en ambas fases.

Por otra parte, la Figura 2.B presenta un contraste entre los valores obtenidos de forma numérica y experimental. Es importante mencionar que la metodología utilizada para medir la temperatura en la fase sólida y gaseosa en el reactor fue similar a la descrita por Zheng et al. (Zheng, 2011). Los resultados experimentales entregan una tendencia similar para la temperatura en ambas fases (sólida y gaseosa), tanto para la línea base (0% H₂) como para una concentración de 20% de hidrógeno en la mezcla. Los resultados más precisos fueron los obtenidos para la combustión de metano (0% H₂) debido a que el mecanismo de reacción y la cinética utilizada se encuentra desarrollada para la combustión de este gas. Por su parte, cuando se incluye el hidrógeno en la mezcla, la tendencia de los resultados numérico-experimental es la misma, pero los valores experimentales difieren.

La Figura 3 muestra el perfil de temperaturas tanto para la fase sólida como para la fase gaseosa al interior de todo el reactor de medios porosos, para ambos casos (Figura 3.A y 3.B) el frente se encuentra viajando aguas arriba. Se caracterizan tres zonas típicas dentro del reactor, la Zona I ($x = 0 - 9$ cm) conocida como zona de precalentamiento donde la matriz sólida debiese estar a una temperatura más alta que la mezcla de combustible y aire, esto debido a la transferencia de calor por conducción y radiación dentro del sólido. El calor se transfiere a la mezcla de gases por convección. Cuando la mezcla de gases alcanza la temperatura de ignición, las reacciones químicas tienen lugar en la Zona II ($x = 9 - 12$ cm) conocida como región de combustión, donde el calor se libera en el proceso exotérmico. En una gran parte de la zona de combustión, el gas tiene una temperatura más alta que la matriz sólida, donde predomina la transferencia de calor por convección y radiación. La combustión se controla en el interior del medio poroso ajustando el caudal másico de la mezcla de combustible y aire. Parte del calor de la combustión se transfiere de la fase gaseosa al medio poroso por convección y radiación, pasando a la Zona III ($x = 12 - 20$ cm) conocida como zona de postcombustión, donde la temperatura del sólido y del gas logran el equilibrio térmico entre ambas fases. Los perfiles de temperatura cerca de la salida descienden debido a la pérdida de calor hacia el ambiente.

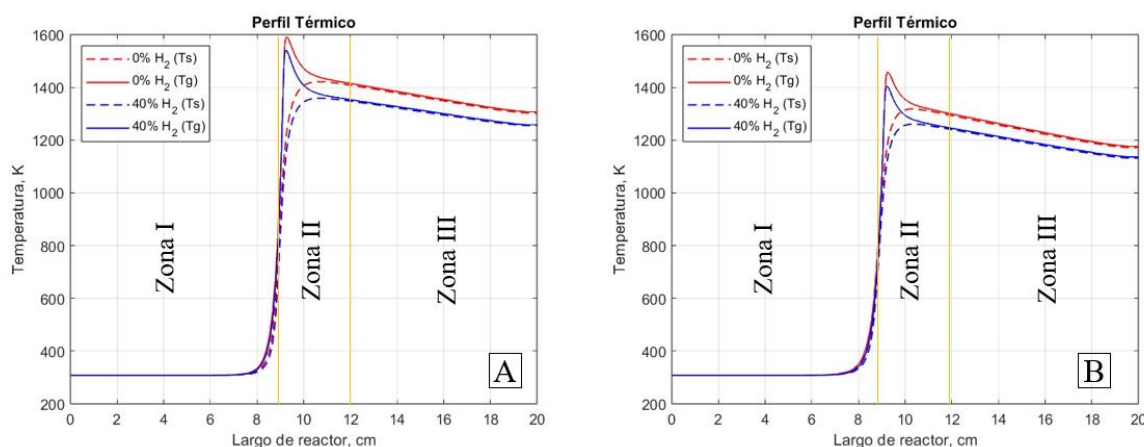


Figura 3: (A) Perfil térmico en el reactor para una velocidad de filtración constante de 42 cm/s y un $\phi = 1.0$
(B) Perfil térmico en el reactor para una velocidad de filtración constante de 42 cm/s y un $\phi = 0.7$.

La incidencia de la adición de hidrógeno a la mezcla se aprecia principalmente en la disminución de la temperatura del frente de llama y un aumento en su espesor. Este último parámetro se define como la distancia dentro del reactor en la cual el consumo de combustible pasa desde un 99% (0.99) a un 2% (0.02). Como se aprecia en la Figura 4 la adición de hidrógeno en la mezcla aumenta el espesor del frente de llama, principalmente cuando se opera en puntos cercanos a la estequiometría. En la Figura 4.A se muestra la simulación con

una relación de equivalencia de 0.7, el espesor de llama pasa de 1.6 a 1.68 cm cuando se opera con 0% y 40% de H₂ en la mezcla, respectivamente. En la Figura 4.B se muestra la simulación con una relación de equivalencia de 1.0, donde el espesor del frente de llama pasa de 1.62 a 3.22 cm cuando se opera con 0% y 40% de H₂ en la mezcla, respectivamente.

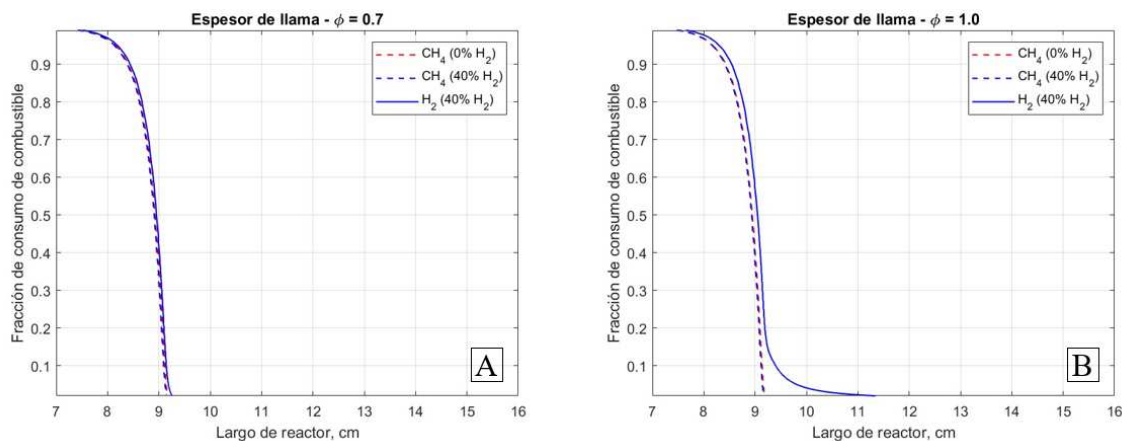


Figura 3: Espesor de llama (A) Velocidad de filtración constante de 42 cm/s y un $\phi = 0.7$. (B) Velocidad de filtración constante de 42 cm/s y un $\phi = 1.0$.

3.2 Efectos de la adición de hidrógeno en la velocidad del frente de llama

La Tabla 1 muestra algunas propiedades termofísicas del hidrógeno y el metano, donde la velocidad de reacción es uno de los principales parámetros que diferencia a ambos combustibles. En condiciones estequiométricas de llama laminar, el hidrógeno puede tener una velocidad de reacción hasta seis veces mayor que el metano, esto trae consecuencias importantes en la operación de sistemas que utilizan hidrógeno.

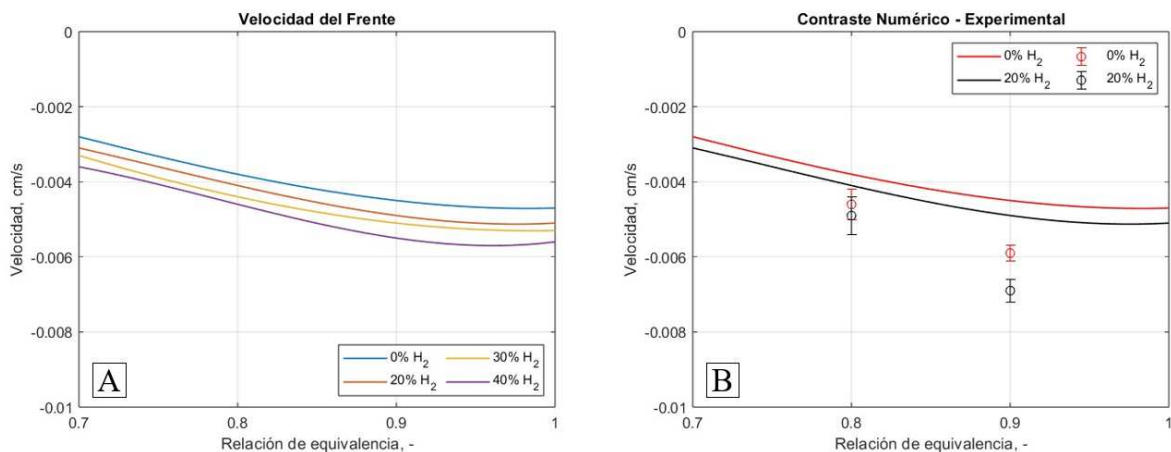


Figura 5: (A) Velocidad del frente de llama en función de la relación de equivalencia para distintas concentraciones de hidrógeno en la mezcla. (B) Contraste numérico-experimental de las velocidades del frente de llama.

Los resultados mostrados en la Figura 5.A tienen directa relación con lo mencionado anteriormente, al aumentar la concentración de hidrógeno en la mezcla, la velocidad del frente de llama aumenta. Este aumento de velocidad se genera de forma gradual entre un porcentaje de hidrógeno y otro. La velocidad del frente es negativa debido a que este se desplaza aguas arriba en el reactor (desciende). Otros aspectos relevantes que intervienen en la velocidad del frente son la difusividad del hidrógeno, la mezcla de los gases y el poder calorífico. La

difusión más rápida del hidrógeno facilita su mezcla con el oxígeno en el medio poroso, lo que conduce a una combustión más eficiente y, por lo tanto, a una mayor velocidad del frente de llama. La Figura 5.B presenta el contraste entre los valores obtenidos de forma numérica y valores obtenidos de forma experimental. Los resultados experimentales entregan una tendencia similar para la velocidad del frente de llama, tanto para la línea base (0% H₂) como para una concentración de 20% de hidrógeno en la mezcla. Sin embargo, estos resultados difieren levemente en sus valores con lo obtenido numéricamente, considerando los supuestos del modelo matemático y cinético utilizado.

4 CONCLUSIONES

Este estudio exploró el efecto de agregar hidrógeno a la combustión de metano en un quemador de medio poroso inerte (MPI). Se encontró que la adición de hidrógeno conlleva una disminución de la temperatura del gas y del sólido en el reactor, y un aumento de la velocidad del frente de llama. Estos resultados numéricos se respaldaron con resultados experimentales.

La investigación realizada contribuye al reconocimiento de las interacciones químicas y termofísicas en la combustión de mezclas de hidrógeno y metano en medios porosos inertes, lo que es esencial para el avance de tecnologías de combustión sostenible en diversas aplicaciones industriales y energéticas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quisieran agradecer el apoyo de la Dirección de Postgrado y Programas de la Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.

REFERENCIAS

- A. Banerjee, D. P., 2021. Developments and applications of porous medium combustion: A recent review, *Energy*, 221 (2021).. *Energy*, Volumen 221.
- A. Kumar, A. L., 2009. Experimental study of the combustion of methane-hydrogen mixtures in a stagnation flame. *Combustion and Flame*, 156(1), pp. 189 - 202.
- Baroutaji, A. W. T. R. M. & O. A. G., 2019. Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors.. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Volumen 106, pp. 31-40.
- Berkeley, U. d. C. e., s.f. *Laboratorio de Combustión de la Universidad de California en Berkeley*. Available at: <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/version30/text30.html>
- D. Trimis, F. D., 1996. Combustion in a porous medium-advances and applications. *Combustion Science and Technology*, Volumen 121, p. 153–168. .
- G. Chen, J. L. Y. W. W. J. C., 2018. Numerical study on the combustion characteristics of methane-hydrogen mixture in a non-premixed turbulent jet flame. *Applied Thermal Engineering*, Volumen 143, pp. 186 - 197.
- H. Wu, Y. W. W. F. H. H., 2014. Experimental study on the combustion characteristics of methane-hydrogen mixture in a partially premixed burner. *Energy*, Volumen 74, pp. 321 - 330.
- J. Chen, S. Z. J. S. S. W. Y. L., 2015. Experimental study on the combustion characteristics of methane-hydrogen-air mixtures in a premixed laminar burner. *Fuel*, Volumen 155, pp. 200 - 207.
- J. Li, J. L. X. M. J. L., 2014. Experimental study on the flame characteristics of a premixed

- methane-hydrogen-air mixture in a porous ceramic burner. *Combustion and Flame*, 161(4), pp. 1111 - 1122.
- J.R. Howell, M. H. J. E., 1996. *COMBUSTION OF HYDROCARBON FUELS WITHIN POROUS INERT MEDIA*. s.l.:s.n.
- L.A. Kennedy, J. B. A. V. S. A. F. S. F., 2000. CHEMICAL STRUCTURES OF METHANE-AIR FILTRATION COMBUSTION WAVES FOR FUEL-LEAN AND FUEL-RICH CONDITIONS.
- Lin ZY, Z. J. H. Y., 2007. Simplifying the detailed reaction mechanism based on sensitivity analysis and quasi-stationary assumptions.. *J National Univ. Defense Technol*, Volumen 20, pp. 1 - 16.
- Li, R. H. G. Q. F. P. C. & K. A. A., 2019. Comparative analysis of detailed and reduced kinetic models for CH₄ + H₂ combustion.. *Fuel*, Volumen 246, pp. 244 - 258.
- M. Marzouk, M. A. A. A., 2018. Numerical study on the effect of hydrogen addition on methane combustion in a turbulent swirl burner. *Energy Conversion and Management*, Volumen 156, pp. 139 - 151.
- M.A. Mujeebu, M. A. M. B. A. M. M. A., 2009. Applications of porous media combustion technology - A review. *Appl Energy*, Volumen 86, pp. 1365-1375.
- M.A. Mujeebu, M. A. M. B. A. M. R. M. M. A., 2009. Combustion in porous media and its applications - A comprehensive survey. *J Environ Manage*, Volumen 90, p. 2287–2312.
- Makaryan, I. A. S. I. V. S. E. A. A. A. V. & A. V. S., 2022. A Comprehensive review on the prospects of using Hydrogen–Methane blends: Challenges and opportunities.. *Energies*, 15(6).
- Manigandan, S. P. T. R. R. J. I. V. T. N. & P. A., 2023. Role of hydrogen on Aviation sector: A review on hydrogen storage, fuel flexibility, flame stability, and emissions reduction on gas turbines engines. *Fuel*, Volumen 352.
- Nikolaou, Z. M. C. J. & S. N., 2013. A 5-step reduced mechanism for combustion of CO/H₂/H₂O/CH₄/CO₂ mixtures with low hydrogen/methane and high H₂O content.. *Combustion and Flame*, 160(1), pp. 56 - 75.
- Q. Li, H. L. Y. Z. Z. L. L. J., 2017. Numerical simulation of combustion characteristics of a methane-hydrogen mixture in a laminar flow reactor. *Fuel Processing Technology*, Volumen 167, pp. 164 - 173.
- S. Balamurugan, G. N. K. R., 2016. Experimental investigation of the effect of hydrogen addition on the combustion characteristics of methane in a premixed turbulent burner. *Combustion Science and Technology*, Volumen 188, pp. 271 - 289.
- Semenikhin, A. S. M. S. S. C. I. V. M. S. G. I. D. V. G. N. I. R. D. V. N. S. S. F. N. I. S. N. O. I. A. A. & T. D. S., 2022. Kinetic Models of Methane-Hydrogen Mixture Combustion: Brief review and Validation.. *Thermal Engineering*, 69(10), pp. 792 - 801.
- V. Bubnovich, M. T., 2007. Analytical modelling of filtration combustion in inert porous media. *Appl Therm Eng.* , Volumen 27, p. 1144–1149.
- V.K. Pantangi, S. M. P. M. R. R., 2011. Studies on porous radiant burners for LPG (liquefied petroleum gas) cooking applications. *Energy*, 36(10), p. 6074–6080.
- V.S. Babkin, A. K. V. B., 1991. *Propagation of Premixed Gaseous Explosion Flames in Porous Media*.. s.l.:s.n.
- Vafai, K., 2015. *Handbook of Porous Media*.. s.l.:s.n.
- Valera-Medina, A. X. H. O.-J. M. D. W. I. F. & B. P. J., 2018. Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science*, Volumen 69, pp. 63 - 102.

- Weinberg, F., 1971. Combustion Temperatures: The Future. *Nature*, 233(5317), pp. 239 - 241.
- Yip, H. L. S. A. Y. A. K. S. T. R. A. Y. G. H. M. P. R. & C. Q. N., 2019. A review of Hydrogen Direct Injection for Internal Combustion Engines: Towards Carbon-Free Combustion.. *Applied sciences*, 9(2), p. 4842.
- Zheng, C. C. L. S. A. L. Z. y. C. K., 2011. Mediciones de temperatura de fase sólida y gaseosa de combustión de medios porosos.. *Actas del Instituto de Combustión*, 33(2), pp. 3301 - 3308.