

Cálculo de propiedades de combustión y análisis de estabilidad de llama para el gas límite 65%CH₄ + 35%H₂

Calculation of combustion properties and flame stability analysis for the limit gas 65%CH₄ + 35%H₂

MSc. Arley Cardona-Vargas¹, MSc. Camilo Echeverri-Uribe², Ing. Jaime Zapata-López³,
MSc. Jonathan Jaramillo-Álvarez⁴, Phd. Carlos Arrieta-González⁵, MSc. Andrés Amell-Arrieta⁶

¹Grupo de Investigación de Materiales Avanzados y Energía, Instituto Tecnológico Metropolitano, Colombia, <https://orcid.org/0000-0002-3051-9335>, Email: arleycardona5670@correo.itm.edu.co

²Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la energía, Universidad de Antioquia, Colombia, <https://orcid.org/0000-0002-9514-4976>, Email: camilo.echeverriu@udea.edu.co

³Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la energía, Universidad de Antioquia, Colombia, <https://orcid.org/0000-0003-3105-8216>, Email: jaimef.zapata@udea.edu.co

⁴Universidad Cooperativa de Colombia, Colombia, <https://orcid.org/0000-0001-7773-3526>, Email: jonathan.jaramilloal@campusucc.edu.co

⁵Grupo de Ingeniería en Energía, Universidad de Medellín, Colombia, <https://orcid.org/0000-0003-0839-6102>, Email: carrieta@udem.edu.co

⁶Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la energía, Universidad de Antioquia, Colombia, <https://orcid.org/0000-0003-4473-4105>, Email: andres.amell@udea.edu.co

Como citar: A. Cardona, C. Echeverry, J. Zapata, J. Jaramillo, C. Arrieta y A. Amell, "Cálculo de propiedades de combustión y análisis de estabilidad de llama para el gas límite 65%CH₄ + 35%H₂", *Revista Ingenio*, vol. 17, n°1, pp.1-8, 2020, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.2328>.

Fecha de recibido: 15 de agosto de 2019
Fecha aprobación: 25 de octubre de 2019

RESUMEN

Palabras claves:

Emisiones contaminantes,
Inestabilidades de llama,
Velocidad de deflagración
laminar, Tiempo de retraso
a la ignición.

La demanda de energía mundial potencia los beneficios ambientales y operacionales del gas natural como alternativa energética, por su composición, principalmente metano (CH₄), presenta bajas emisiones contaminantes y beneficios en sistemas energéticos y combustión; de ahí que se busquen mezclas de gas natural con otros combustibles, como hidrógeno (H₂), para potenciar aún más sus propiedades. En el presente trabajo se determinaron numérica y experimentalmente algunas propiedades para la mezcla 65 % CH₄ + 35 % H₂ a condiciones atmosféricas de la ciudad de Medellín, Colombia, propiedades relacionadas con la estructura, estabilidad de la llama, y autoignición. Simulaciones numéricas y mediciones experimentales de la velocidad de deflagración laminar se realizaron para dosados entre 0.9 y 1.4. En general la velocidad de deflagración laminar se ajusta de buena forma a los resultados numéricos, el valor máximo de la velocidad de deflagración corresponde a un valor de 51.38 cm/s para un dosado de 1.1. Para un dosado de 0.75 se presentan inestabilidades de llama. Adicionalmente, se encontró que el rango óptimo de operación del quemador operando con este gas límite es en el rango de dosados relativo entre $0.9 \leq \phi \leq 1.4$.

ABSTRACT

Keywords:

Contaminant emissions,
Intrinsic instabilities,
Laminar burning velocity,
Ignition delay time.

The world energy demand enhances the environmental and operational benefits of natural gas as an energy alternative, due to its composition, mainly methane, it presents low contaminant emissions and benefits in energy systems and combustion; hence, mixtures of natural gas with other fuels, such as hydrogen, are sought to further enhance its properties. In the present work some properties were determined numerically and experimentally for 65% CH₄ + 35% H₂ mixture for atmospheric conditions of Medellín, Colombia, properties related to the structure, stability of the flame, and autoignition. Numerical simulations and experimental measurements of laminar burning velocity were performed for equivalence ratios between 0.9 and 1.4. In general, good agreement is observed for laminar burning velocity and numerical results, the maximum laminar burning velocity value corresponds to 51.38 cm/s for an equivalence ratio of 1.1. For an equivalence ratio of 0.75 intrinsic instabilities were observed. Furthermore, we found that the optimal operation range of the burner operating by the limit gas studied is between $0.9 \leq \phi \leq 1.4$.

1. Introducción

En los últimos años las investigaciones acerca de las emisiones contaminantes originadas en la operación de sistema de combustión y las regulaciones ambientales han ido incrementándose, lo cual ha motivado el desarrollo de equipos que operen con combustibles de fuentes fósiles y con fuentes renovables. Estas mezclas de combustibles permiten disminuir en gran medida las emisiones de dióxido de carbono (uno de los gases responsables del efecto invernadero) a la

atmósfera gracias a la presencia de combustibles como el hidrógeno (H₂) y gas de síntesis. Las adiciones de H₂ a un combustible de origen fósil como el metano (CH₄), aumentan la velocidad de deflagración laminar debido a la alta reactividad que tiene el H₂ y a su vez ayuda a estabilizar las llamas del metano que en dosados relativos pobres tienden a ser inestables [3].

Por otro lado, en la industria de los quemadores se utiliza un gas límite prueba con una composición de 65%CH₄ + 35%H₂ por medio del cual se realizan

Autor para correspondencia

Correo electrónico: arleycardona5670@correo.itm.edu.co (Arley Cardona Vargas)

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña
Artículo bajo la licencia CC BY-NC (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>)



pruebas de estabilidad de la combustión para validar la confiabilidad de los equipos. Esta prueba consiste en llevar hasta una condición extrema el quemador de tal manera que se propicie el fenómeno de la retrollama. Si el quemador es estable bajo estas condiciones entonces se valida su confiabilidad.

El objetivo de este trabajo es determinar numérica y experimentalmente la velocidad de deflagración laminar (s_L), el espesor térmico laminar del frente de llama, las inestabilidades intrínsecas y el tiempo de retraso a la ignición de la premezcla $65\%CH_4 + 35\%H_2$ con aire normal en donde las condiciones ambientales se muestran en la Tabla 1. La determinación de estas propiedades es muy importante, y deben ser tenidas en cuenta cuando se diseña un quemador industrial. Si el quemador diseñado presenta un buen comportamiento en cuanto al proceso de combustión y emisiones contaminantes, al ser evaluado con este gas límite, el quemador queda avalado para su producción.

Tabla 1. Condiciones atmosféricas

Descripción	Valor
Temperatura ambiente	22 ± 1 °C
Presión ambiente	0.85 atm
Humedad	60 ± 10 %.

2. Modelos teóricos

En esta sección se presentan los modelos teóricos utilizados para el cálculo de las propiedades de combustión y fenómenos de estabilidad de las llamas.

2.1 Velocidad de deflagración laminar

Cuando el régimen de flujo de una premezcla de gases es laminar, la velocidad de deflagración laminar se define como la rapidez con que se transmite la combustión desde la zona quemada hacia la zona inquemada [4]. En el presente trabajo esta propiedad se determinó numérica y experimentalmente.

Para las simulaciones se utilizó la subrutina Premix del software Chemkin Pro [5], en la cual se resuelven las ecuaciones de conservación de masa, de especies y de energía para estimar la velocidad de deflagración laminar mediante el uso de mecanismos cinéticos detallados de tal manera que se obtengan resultados precisos. Los mecanismos reaccionales detallados que se utilizaron fueron: el Gri Mech 3.0 [6], el cual posee 325 reacciones elementales y 53 especies, mecanismo que ha sido optimizado para reproducir la cinética química del metano; el mecanismo USC Mech II [7] que tiene 784 reacciones elementales y 111 especies, utilizado para predecir la cinética química de mezclas combustibles de $H_2/CO/C1-C4$.

Para realizar la simulación se supone que se tiene

una llama unidimensional, adiabática y estacionaria. La malla que corresponde al frente de llama está compuesta por un número máximo de puntos o nodos que debe tener la malla en la solución final debe ser de alrededor de 1000 para que la temperatura de los productos concuerde con la temperatura de llama adiabática. El valor de 1200 se pone en caso de que los valores de GRAD y CURV entrados sea tan bajo que la solución requiera de más de 1200 puntos para satisfacer los valores de GRAD y CURV entrados. Sin embargo, como se sabe que una solución con 1000 puntos es lo suficientemente precisa, el programa parará la simulación a 1200 puntos y mostrará la solución correspondiente a dicho número de puntos, a pesar de que la malla no satisfaga los valores de GRAD y CURV.

2.2 Espesor de llama laminar térmico

Para el cálculo del espesor del frente de llama térmico se usó de la solución final del perfil de temperatura del cálculo numérico de S_L con la subrutina Premix de Chemkin mediante la ecuación 1 [8]:

$$\delta_T = \frac{(T_b - T_u)}{(dT/dx)_{max}} \quad (1)$$

En la ecuación anterior δ_T es el espesor del frente de llama térmico, T_b es la temperatura de llama adiabática de la mezcla, T_u es la temperatura de entrada de la premezcla y $(dT/dx)_{max}$ es el gradiente de temperatura máximo en el perfil de temperatura.

2.3 Inestabilidades de llama

Las inestabilidades de llama son fenómenos que se presentan en cualquier llama de premezcla. Los estudios en llamas de premezcla realizados por Sivashinsky [9] y Yuan et al. [10] muestran que todas las llamas tienen asociadas una inestabilidad debida a fenómenos hidrodinámicos y otras a efectos termo-difusivos. Los fenómenos hidrodinámicos siempre están presentes debido a que en una reacción de combustión se generan gradientes de densidad ocasionando una distorsión en las corrientes de flujo ocasionadas por la aceleración de los gases de combustión. Por otro lado, los fenómenos termo-difusivos pueden afectar positiva o negativamente la estabilidad de la llama, este fenómeno puede atenuar o incrementar las inestabilidades de las llamas dependiendo del número de Lewis, Le , si es menor a la unidad hay una gran posibilidad que se genere una condición de inestabilidad.

Para determinar si una llama es inestable o no se verifica que el número de onda crítico ($k_c = 2 \times \pi / \lambda_c$) sea menor que el número de onda de la llama asumiendo que $\lambda \approx \delta_T$. El cálculo analítico se hizo mediante la ecuación 2,

ecuación 3, y ecuación 4:

$$\sigma = \Omega_0 s_L k - \Omega_1 D_{th} k^2 - 4D_{th} \delta_T^2 k^4 \quad (2)$$

$$\Omega_0 = \frac{\sqrt{\varepsilon + \varepsilon^2 - \varepsilon^3} - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \quad (3)$$

$$\Omega_1 = \frac{(1 - \varepsilon)^2 - \ln(2\Omega_0 + 1 + \varepsilon)}{2(1 - \varepsilon)[\varepsilon + (1 + \varepsilon)\Omega_0]} - \frac{(1 + \Omega_0)(\varepsilon + \Omega_0)Ze(1 - Le)}{2(1 - \varepsilon)[\varepsilon + (1 + \varepsilon)\Omega_0]} \quad (4)$$

$$\times \int_0^{1/\varepsilon - 1} \frac{\ln(1 + \xi)}{\xi} d\xi$$

En donde σ es la tasa de crecimiento de las inestabilidades, s_L es la velocidad de deflagración laminar, D_{th} es la difusividad térmica, ε es la relación entre la densidad de los gases quemados y los gases no quemados y k es el número de onda, Ze es el número de Zeldovich, y Ω_0 , Ω_1 , ξ son constantes del modelo. El primer término de la ecuación 2 proporciona información sobre las inestabilidades hidrodinámicas y su valor es siempre positivo, mientras que el segundo término proporciona información sobre los efectos termo-difusivos; y el último es un término de la relajación temperatura propuesto por Yuan et al. [10].

2.4 Tiempo de retraso a la ignición

El tiempo de retraso a la ignición, es el tiempo en que se tarda en iniciar la reacción de una mezcla combustible más oxidante, dadas unas determinadas condiciones de presión y temperatura [11-13]. Su conocimiento es determinante para evitar la ocurrencia de auto igniciones previas a la zona de reacción (caso de turbinas de gas), o antes de la propagación de la combustión hacia la mezcla sin quemar (fenómenos de “knock” en motores de combustión interna) [14-15].

El tiempo de retraso a la ignición se calculó numéricamente utilizando la subrutina Aurora del software comercial Chemkin Pro. Esta subrutina considera un reactor perfectamente agitado, adiabático, sin entradas y sin salidas. Se asume que es 0-D y que la turbulencia es tan fuerte que no existen gradientes dentro del reactor por lo que los términos difusivos en las ecuaciones de transporte se hacen cero quedando sólo los términos transitorios y de generación de energía.

3. Montaje experimental

Los experimentos fueron realizados utilizando el método del quemador. Los detalles y descripción del montaje experimental se muestran en [16]. Los

caudales de CH₄, H₂ y aire son controlados por medio de rotámetros calibrados, mientras que el quemador utilizado minimiza el fenómeno del “strech” de tal manera que se obtiene una llama como la que se muestra en la Figura 1, de esta manera es posible estimar s_L con la Ecuación 5 en donde U es la velocidad de los gases sin quemar y θ es el ángulo que se muestra en la Figura 1.

$$s_L = U \times \text{sen } \theta \quad (5)$$

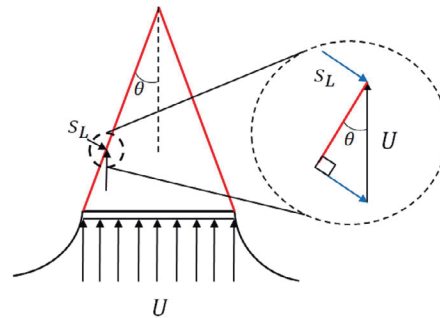


Figura 1. Llama de premezcla laminar en un quemador de contorno curvado.

4. Resultados

A continuación, se presentan los resultados numéricos y experimentales para la velocidad de deflagración laminar y las inestabilidades intrínsecas, estimaciones numéricas para la temperatura de llama adiabática y espesor del frente de llama para la mezcla estudiada de 65%CH₄ y 35%H₂.

4.1 Temperatura de llama adiabática

En la Figura 2 se muestran los resultados de la temperatura de llama adiabática para la mezcla en estudio con dos mecanismos reaccionales, el Gri Mech 3.0 [6] y el USC Mech II [17], junto con las del metano y el hidrógeno puros. Inicialmente se observa que no existen diferencias significativas entre los dos mecanismos y esto es debido a que para este cálculo se realiza un balance de energía en donde sólo importan las propiedades termodinámicas con diferencias por debajo del 0.3%. Por otro lado, se puede apreciar que al adicionar H₂ al CH₄ su temperatura de llama aumenta y esto se debe a que la temperatura de llama adiabática del H₂ es mayor a la de CH₄, sin embargo, el incremento no es muy significativo dándose el mayor en $\phi = 1.5$ con el 2.55%.

Este resultado indica que no se presentarían problemas de operación con respecto a la resistencia de los materiales a estas temperaturas y la formación de NO_x térmico por medio del mecanismo de Zeldovich. Por lo

tanto, la mezcla en estudio es viable ambientalmente ya se utilice metano puro. que alcanza temperaturas muy cercanas al caso en que

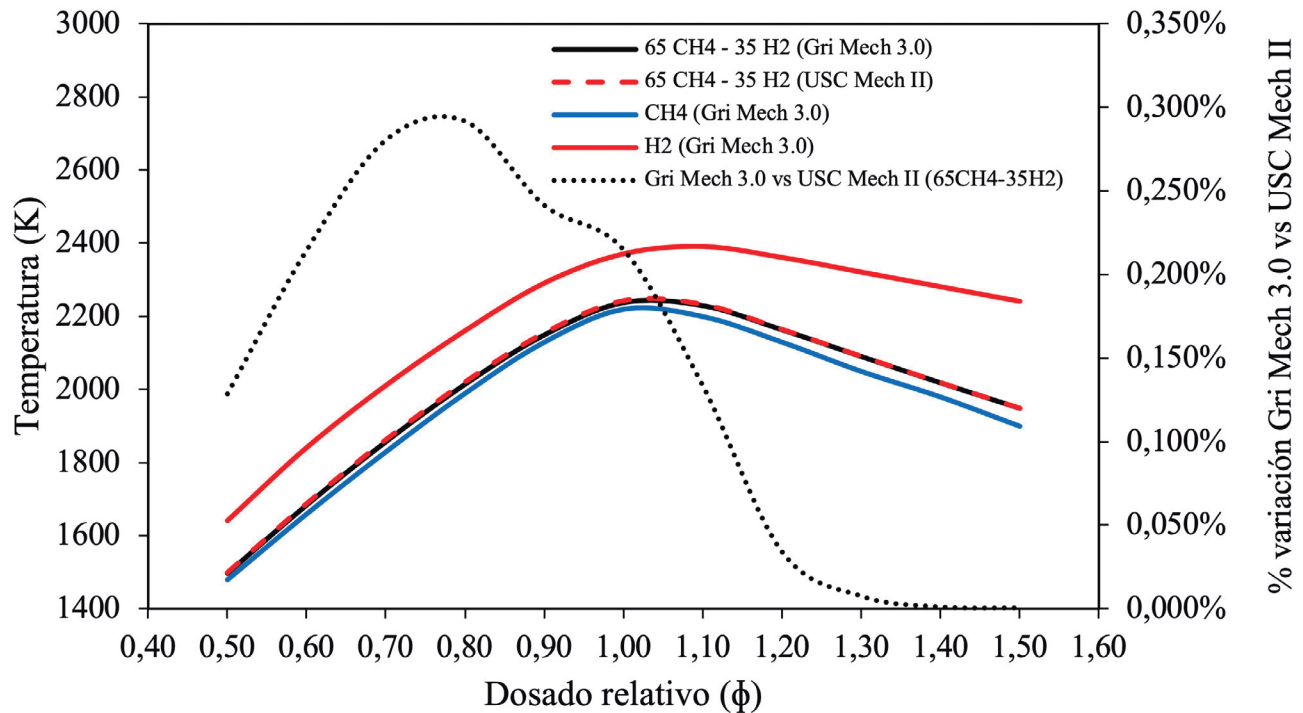


Figura 2. Temperatura de llama adiabática vs la relación de equivalencia. $P_i = 849$ mbar, $T_i = 295$ K.

4.2 Velocidad de deflagración laminar

Se obtuvo numérica y experimentalmente la velocidad de deflagración por medio de método del quemador para la premezcla $65\%CH_4 + 35\%H_2 +$ Aire para dosados relativos desde 0.9 hasta 1.5. En el cálculo numérico se tuvo en cuenta las recomendaciones de Bongers y De Goey [18] porque debido a la cantidad de hidrógeno en la premezcla se puede generar una alta difusividad, lo cual puede tener un efecto importante sobre la estimación numérica de s_L .

En la Figura 3 se observa que los resultados experimentales tienen un ajuste aceptable con los resultados numéricos con el Gri Mech 3.0, mientras que con el USC Mech II se aprecia que el mecanismo subestima s_L . Por lo tanto, para estimar y analizar numéricamente s_L es aconsejable utilizar el mecanismo Gri Mech 3.0.

Por otro lado, se puede apreciar que la adición del 35% H_2 al CH_4 tiene un efecto significativo en s_L , lo cual se aprecia en la Figura 3 en donde se grafican los resultados de velocidad de deflagración laminar del metano medidos por Cardona [19] a las mismas condiciones del $65\%CH_4-35\%H_2$. Debido a que el H_2 tiene una velocidad de deflagración laminar mucho mayor que la del CH_4 , las adiciones del primer gas al segundo aumenta la velocidad de deflagración, pero predomina el efecto del metano, lo cual tiene coherencia con investigaciones previas como la realizada por Disarli y Benedetto [20] en la que se establecen 3 zonas: (1) zona en la que la combustión es dominada por el metano ($0 \leq H_2 \leq 0.5$), (2) zona de transición ($0.5 \leq H_2 \leq 0.9$) y (3) zona en la que el hidrógeno domina la combustión inhibiendo al metano. En las zonas (1) y (3) la velocidad de deflagración laminar aumenta linealmente con el aumento del contenido de H_2 .

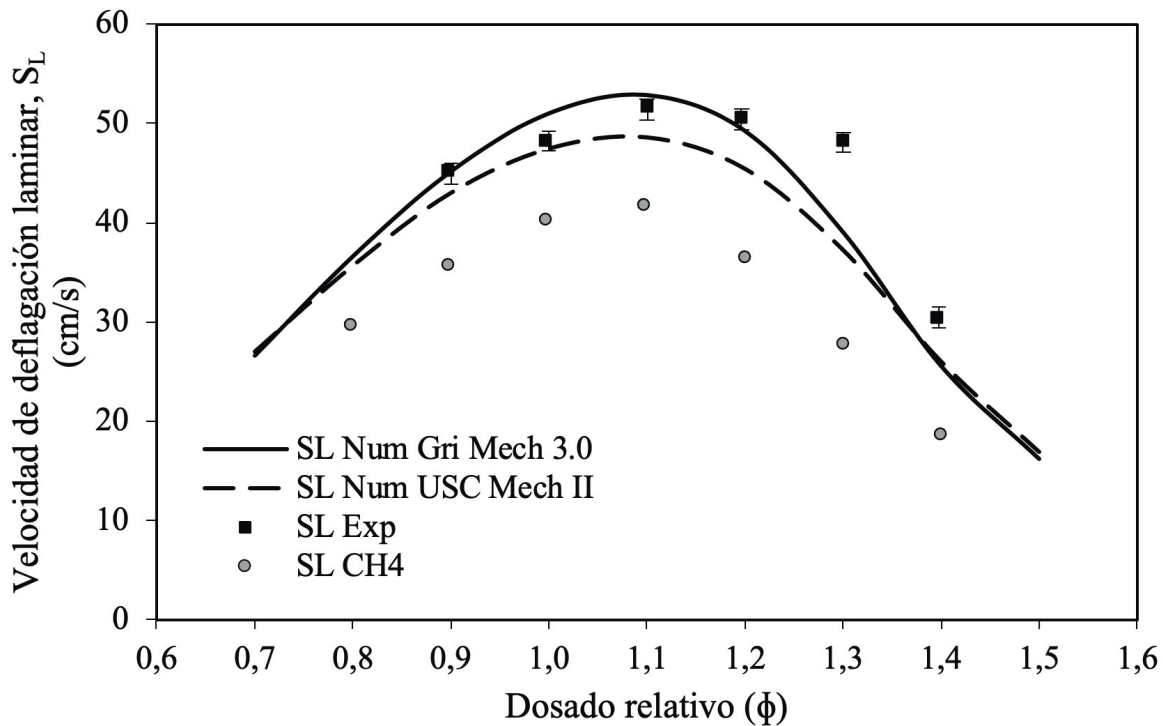


Figura 3. Velocidad de deflagración laminar experimental y numérica vs el dosado relativo. $P_i = 0.85\text{atm}$, $T_i = 295\text{K}$

4.3 Espesor del frente de llama

En la Figura 4 se muestra el espesor del frente de llama versus el dosado relativo para la mezcla 65%CH₄ + 35%H₂. Esta presenta un comportamiento inverso a la velocidad de deflagración laminar, donde el valor mínimo del espesor de la llama está cerca de la región estequiométrica donde la velocidad de deflagración es mayor. Para la mezcla de 65%CH₄ + 35%H₂ el

espesor de llama térmico es menor al del metano puro, debido al aumento de la velocidad de deflagración por la presencia del alto contenido de hidrógeno en la premezcla. Estas diferencias oscilan entre un rango de aproximadamente 14% y 33%, en donde las mayores diferencias se presentan hacia la zona de región rica y se estrechan cerca de la región estequiométrica.

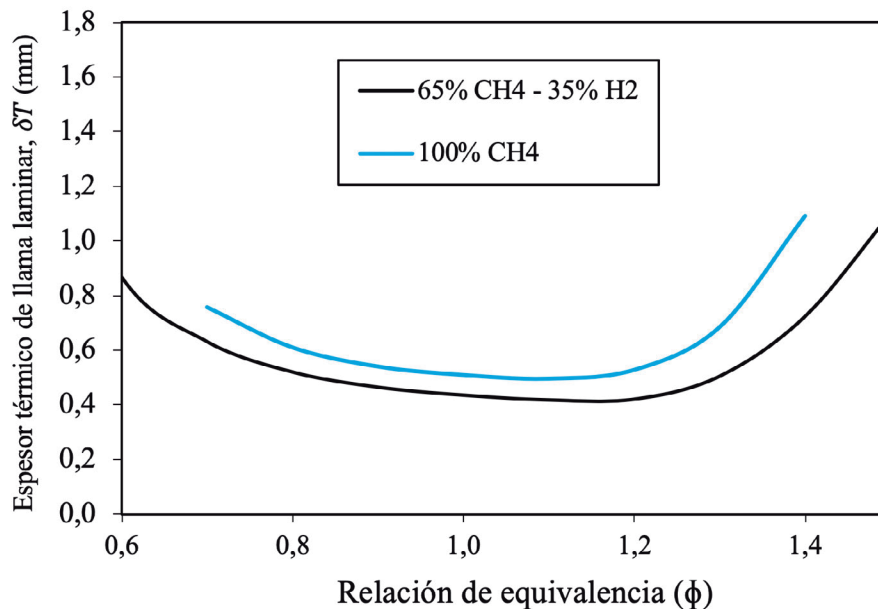


Figura 4. Espesor del frente de llama. $P_i = 849\text{mbar}$, $T_i = 295\text{K}$

4.4 Tiempo de retraso a la ignición

En la Figura 5 se puede apreciar el tiempo de retraso a la ignición versus el dosado relativo para tres presiones diferentes 1, 15 y 30 atm de la mezcla 65%CH₄ + 35%H₂. La presión de 15 atm es una presión representativa de una turbina a gas, mientras que la de 30 atm es representativa de un motor de combustión interna alternativo. Los resultados muestran que a mayor presión y dosado relativo, el tiempo de retraso se disminuye debido a que la energía que se requiere para encender el combustible es menor las regiones cercanas a la estequiometría. Adicionalmente, se observa un comportamiento irregular entre la presión a condición atmosférica y a altas presiones, donde mientras el tiempo de retraso aumenta con el incremento del dosado relativo a presión atmosférica, en altas presiones disminuye (efecto contrario), esto se debe a que en altas presiones existen reacciones intermedias que son altamente dependientes de la presión, dando lugar a modificaciones en la cinética química de la reacción.

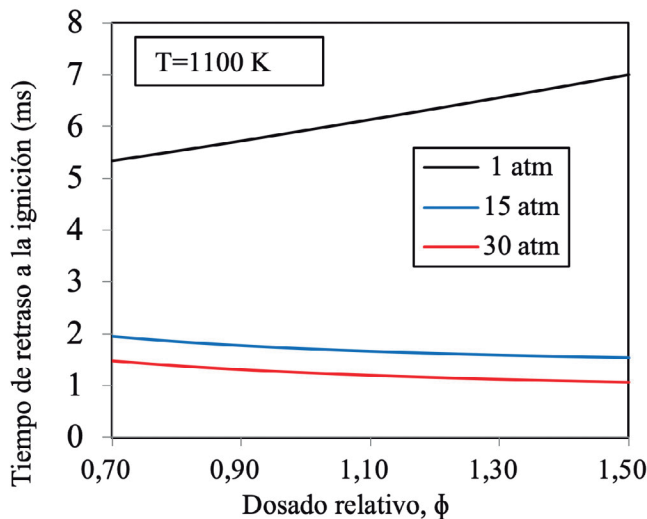


Figura 5. Tiempo de retraso a la ignición vs dosado para diferentes presiones. $T_i = 1100$ K.

4.5 Inestabilidades de llama

En la Figura 6 se observan algunas de las llamas obtenidas para la mezcla 65%CH₄ + 35%H₂. En la Figura 6a y Figura 6b se observan llamas con inestabilidades de llama, mientras que en la Figura 6c se observa una llama estable para esta mezcla. La inestabilidad fue detectada a un dosado relativo de 0.75 por lo que el estudio se centró en esta condición.

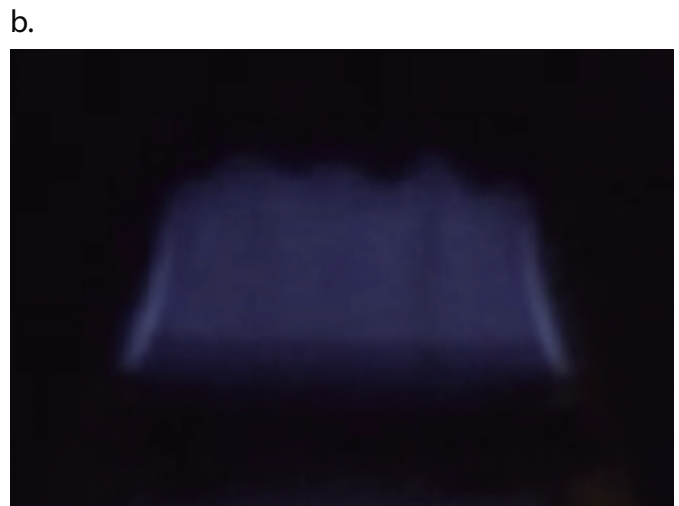


Figura 6. Estabilidad de llama: a) y b) Imagen de inestabilidades de llama, c) Llama estable.

En el rango de dosados entre 0.4 y 0.8 no se pudo obtener datos experimentales debido a que la llama no encendía y en algunos casos ($\phi = 0.75$) se daba la presencia de inestabilidades intrínsecas o la llama no era estacionaria ($\phi = 0.75$), por lo que solo se obtuvieron resultados experimentales para dosados entre $0.9 \leq$

$\phi \leq 1.4$. Estos resultados son muy importantes ya que nos dan una idea del rango de dosados de operación del quemador, estos datos de operación se deben tener en cuenta a la hora de diseñar el quemador, para tener un buen funcionamiento desde la combustión y las emisiones contaminantes.

En la Figura 12 se ilustra la tasa de crecimiento de la mezcla en estudio para el dosado relativo en donde se presentaron inestabilidades intrínsecas de acuerdo con la Ecuación 6, en donde la máxima tasa (44.26 s⁻¹) corresponde a un número de onda de 810 m⁻¹. Este número de onda corresponde al número de onda crítico y si se asume que el espesor de llama laminar térmico es aproximadamente igual a la longitud de onda de la llama, entonces se tiene que el espesor de llama laminar térmico crítico es:

$$\delta_{T_c} = \frac{2\pi}{k_c} = 0,0078 \text{ m} \quad (6)$$

Al comparar el espesor térmico de llama crítico con el espesor térmico de llama de la premezcla para $\phi = 0.75$ ($\delta_T = 0.00057 \text{ m}$) se observa que $\delta_{T_c} > \delta_T$. Esto indica que hay inestabilidad de llama, dado que cuando se tienen espesores grandes las llamas tienden a ser más estables en comparación a los espesores de llama pequeños. Para el caso de estudio se tiene un espesor de llama menor al espesor crítico, dando lugar a las tasas de crecimiento más altas y por lo tanto, un espesor menor también es inestable.

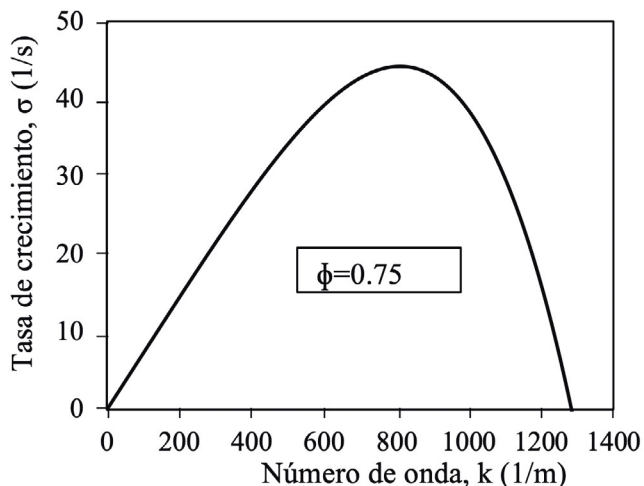


Figura 7. Tasa de crecimiento $P_i = 849 \text{ mbar}$, $T_i = 295 \text{ K}$, y $\phi = 0.75$.

5. Conclusiones

Se realizaron cálculos teóricos y mediciones experimentales de algunas propiedades típicas de combustión en régimen laminar de la mezcla 65%CH₄ + 35%H₂ con aire normal a 0.85 atm, temperatura ambiente de (22 ± 1°C) y diferentes dosados. De acuerdo con los resultados se concluye:

- Se determinó numéricamente S_L mediante dos mecanismos reaccionales (GRI-Mech 3.0 y USC Mech II) se encontró que los resultados se ajustan bien en la zona pobre, hasta un dosado de 0.8, pero para dosados entre 0.9 y 1.3 los valores de s_L presentan diferencias considerables entre los dos mecanismos, resultado que demuestra la alta dependencia que tiene el cálculo de la velocidad de deflagración laminar en función del mecanismo reaccional detallado que se utilice. Igualmente se encontró que el espesor del frente de llama es menor para la mezcla que contiene hidrogeno respecto al metano, este comportamiento influencia directamente en la estabilidad de la llama para la mezcla con hidrógeno debido a la reactividad del hidrógeno.
- El tiempo de retraso a la ignición disminuye con el aumento de la presión y dosado relativo en altas presiones, mientras que en dosados relativos altos y presión atmosférica el tiempo de retraso aumenta debido a que en bajas presiones aparecen reacciones elementales diferentes a altas presiones, las cuales son sensibles a la presión modificando la cinética química.
- Para la mezcla 65%CH₄ + 35%H₂ se encontró que en $\phi = 0.75$ se presentan inestabilidades de llama por lo que es considerado el punto crítico de operación y fue en donde se estudiaron las tasas de crecimiento y números de ondas críticos. este comportamiento se da debido a que al hacer la aproximación de $\lambda \approx \delta_T$ se encuentra que $\delta_{T_c} > \delta_T$ lo que indica que el espesor de la llama en estudio es menor al de la tasa máxima de crecimiento y por lo tanto es un caso más crítico de inestabilidad.
- A partir de ellos resultados encontrados en este estudio se encontró que un rango óptimo para operación del quemador, desde el punto de vista de estabilidad del quemador y emisiones contaminantes es en el rango de dosados relativos de $0.9 \leq \phi \leq 1.4$.

6. Agradecimientos

Se agradece al Programa de sostenibilidad de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Antioquia 2018-2019 y al grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía de la Universidad de Antioquia por sus apoyos económicos y logísticos para este trabajo.

7. Referencias

- [1] K. Zhao, D. Cui, T. Xu, Q. Zhou, S. Hui, and H. Hu, "Effects of hydrogen addition on methane

- combustion,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 89, no. 11, pp. 1142–1147, Nov. 2008, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.05.005>.
- [2] C. Serrano, J. J. Hernández, C. Mandilas, C. G. W. Sheppard, and R. Woolley, “Laminar burning behaviour of biomass gasification-derived producer gas,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 2, pp. 851–862, 2008, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.10.050>.
- [3] R. J. Kee et al., “The PREMIX program is part of the CHEMKIN Collection. CHEMKIN Collection, Release 3.6,” 2000.
- [4] G. P. Smith et al., “Gri-Mech 3.0.” http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
- [5] L. Elliott, D. B. Ingham, A. G. Kyne, N. S. Mera, M. Pourkashanian, and C. W. Wilson, “Genetic algorithms for optimisation of chemical kinetics reaction mechanisms,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 30, no. 3, pp. 297–328, 2004, doi: [10.1016/j.pecs.2004.02.002](http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.002).
- [6] H. J. Burbano, J. Pareja, and A. A. Amell, “Laminar burning velocities and flame stability analysis of H₂/CO/air mixtures with dilution of N₂ and CO₂,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 3232–3242, 2011, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.11.089>.
- [7] G. I. Sivashinsky, “Instabilities, Pattern Formation, and Turbulence in Flames,” *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 15, no. 1, pp. 179–199, Jan. 1983, doi: [10.1146/annurev.fl.15.010183.001143](http://dx.doi.org/10.1146/annurev.fl.15.010183.001143).
- [8] J. Yuan, Y. Ju, and C. K. Law, “On flame-front instability at elevated pressures,” *Proc. Combust. Inst.*, vol. 31, no. 1, pp. 1267–1274, Jan. 2007, doi: [10.1016/j.proci.2006.07.180](http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.180).
- [9] C. Tang, X. Man, L. Wei, L. Pan, and Z. Huang, “Further study on the ignition delay times of propane–hydrogen–oxygen–argon mixtures: Effect of equivalence ratio,” *Combust. Flame*, vol. 160, no. 11, pp. 2283–2290, Nov. 2013, doi: [10.1016/j.combustflame.2013.05.012](http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.05.012).
- [10] M. Lamnaouer, R. C. Ryder, A. Brankovic, and E. L. Petersen, “Reduced combustion time model for methane in gas turbine flow fields,” *J. Nat. Gas Chem.*, vol. 18, no. 2, pp. 145–155, Jun. 2009, doi: [10.1016/S1003-9953\(08\)60093-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-9953(08)60093-6).
- [11] Y. Zhang, Z. Huang, L. Wei, J. Zhang, and C. K. Law, “Experimental and modeling study on ignition delays of lean mixtures of methane, hydrogen, oxygen, and argon at elevated pressures,” *Combust. Flame*, vol. 159, no. 3, pp. 918–931, 2012, doi: [10.1016/j.combustflame.2011.09.010](http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.09.010).
- [12] A. Amell, “Fenómenos de combustión en llamas de premezcla.” Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, GASURE, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, 2009.
- [13] J. Huang and W. K. Bushe, “Experimental and kinetic study of autoignition in methane/ethane/air and methane/propane/air mixtures under engine-relevant conditions,” *Combust. Flame*, vol. 144, no. 1–2, pp. 74–88, 2006, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2005.06.013>.
- [14] A. Cardona Vargas, A. Amell Arrieta, and C. E. Arrieta, “Combustion characteristics of several typical shale gas mixtures,” *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 33, pp. 296–304, 2016, doi: [10.1016/j.jngse.2016.03.039](http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2016.03.039).
- [15] F. E. & C. K. L. Hai Wang, Xiaoqing You, Ameya V. Joshi, Scott G. Davis, Alexander Laskin, “USC Mech Version II. High-Temperature Combustion Reaction Model of H₂/CO/C₁-C₄ Compounds.” 2007.
- [16] H. Bongers and L. P. H. De Goey, “The effect of simplified transport modeling on the burning velocity of laminar premixed flames,” *Combust. Sci. Technol.*, vol. 175, no. 10, pp. 1915–1928, 2003, doi: [10.1080/713713111](http://dx.doi.org/10.1080/713713111).
- [17] C. A. Cardona, “Determinación numérica y experimental de la velocidad de deflagración laminar y patrón de radiación de la mezcla equimolar de gas natural y gas de síntesis con aire normal y aire enriquecido con oxígeno,” Universidad de Antioquia, Medellín, 2012.
- [18] V. Disarli and a Benedetto, “Laminar burning velocity of hydrogen–methane/air premixed flames,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 5, pp. 637–646, Apr. 2007, doi: [10.1016/j.ijhydene.2006.05.016](http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.05.016).