

ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DE DEFLAGRACIÓN LAMINAR DE UNA MEZCLA GLP/GAS DE SÍNTESIS

Lina Rubio Gaviria^{1,*}, Andrés Amell Arrieta²,
Camilo Echeverri Uribe³ y Hernando Yepes Tumay⁴

Resumen

El crecimiento económico y poblacional ha llevado a un incremento en la demanda del sector energético, donde predomina el consumo de combustibles fósiles. Por esta razón, se ha despertado el interés investigativo en la búsqueda de combustibles alternativos que mitiguen la dependencia a los combustibles fósiles, aporten valor energético y disminuyan las emisiones de gases de efecto invernadero. El gas de síntesis se considera como el aditivo idóneo para formar mezclas con hidrocarburos fósiles. La literatura reporta diferentes estudios de caracterización de mezclas C1-C4/gas de síntesis, donde aún no se tienen resultados de mezclas con GLP. El presente estudio se centra en el cálculo numérico y experimental de la velocidad de deflagración laminar para una mezcla 50% C₃H₈-50% gas de síntesis a condiciones atmosféricas de 295 K y 0.849 bar. Los resultados obtenidos contribuyen a la introducción de combustibles alternativos en el mercado energético a partir de la caracterización de estos en términos de velocidad de deflagración, propiedad influyente en la operación y diseño de equipos de combustión.

Palabras clave: Estabilidad de llama, gas de síntesis, GLP, velocidad de deflagración laminar.

Abstract

Economic and population growth has led to an increase in demand from the energy sector, where consumption of fossil fuels predominates. For this reason, it has attracted research interest in finding alternative fuels to mitigate the dependence on fossil fuels, provide energy value and reduce emissions of greenhouse gases. The synthesis gas is considered as the ideal additive to form mixtures with fossil fuels. The literature reports various characterization studies C1-C4/gas synthetic mixtures, results have not yet blends with GLP. This study focuses on the numerical and experimental calculation of the laminar burning velocity for a mixture 50% C₃H₈-50% synthesis gas at atmospheric conditions of 295 K and 0.849 bar. The results contribute to the introduction of alternative fuels in the energy market from its characterizing in terms of laminar burning velocity as an important property in the operation and design in combustion equipment.

Keywords: Flame stability, laminar burning velocity, LPG, syngas.

^{1,*}Ingeniera Química, Estudiante de Maestría en Ingeniería Énfasis Energética, Investigadora en Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía – Universidad de Antioquia. Autor para correspondencia ✉: lina.rubio@udea.edu.co

²Máster en Economía de la Energía y los Recursos Naturales – Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Ingeniero Mecánico, Docente Departamento de Ingeniería Mecánica, Investigador y Coordinador Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía – Universidad de Antioquia.

³Ingeniero Mecánico, Estudiante de Maestría en Ingeniería Énfasis Energética, Investigador en Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía – Universidad de Antioquia.

⁴Ingeniero Mecánico – Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Estudiante de Maestría en Ingeniería Énfasis Energética, Investigador en Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía – Universidad de Antioquia.

Recibido: 07-10-2014, Aprobado tras revisión: 22-11-2014.

Forma sugerida de citación: Rubio, L.; Amell, A.; Echeverri, C.; Yepes, H. (2014). "Estudio teórico y experimental de la velocidad de deflagración laminar de una mezcla glp/gas de síntesis". INGENIUS. N.º 12, (Julio-Diciembre). pp. 62-67. ISSN: 1390-650X.

1. Introducción

Un estudio realizado por la Agencia Internacional de la Energía, (IEA: International Energy Agency), reveló que a partir de la demanda de energía primaria reportada en 2011, para el año 2035 se tendrá un crecimiento del 45%, donde se espera que la principal fuente de energía la ocupen los combustibles fósiles con una participación aproximada del 80% del mercado energético [1].

Con este panorama se sustentan desarrollos tecnológicos para generar nuevos combustibles confiables, que aprovechen los recursos disponibles, generen un impacto ambiental positivo y además contribuyan a atenuar las alzas en los precios de los energéticos convencionales y de alta demanda en el mercado, como lo es el caso del gas natural el cual está adquiriendo valor como materia prima y, además, proyecta un incremento en la demanda energética del 48% [1], [2].

El gas de síntesis (syngas) se considera como uno de los combustibles alternativos más prometedores en la diversificación de fuentes de energía, dada la versatilidad que tiene en el aprovechamiento de diferentes materias primas para su producción.

El gas de síntesis es producido por gasificación de materias primas carbonosas y es usado como combustible para la producción de electricidad o calor, o como materia prima para la producción de productos químicos. Estas fuentes de carbón pueden provenir de combustibles fósiles, biomasa o desechos orgánicos [2], [3], [4].

La diversidad en los procesos de producción, tiene como consecuencia una variabilidad en la composición del syngas, pero fundamentalmente se constituye por hidrógeno y monóxido de carbono, y diluyentes tales como el dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno (N_2), agua y otras trazas de hidrocarburos [5]. El contenido energético dependerá de la composición del syngas obtenido y esta a su vez depende de la fuente de carbono usada en el proceso de gasificación y del posproceso de purificación que se le realice al syngas [2], [3], [4].

Los gases de síntesis que se producen actualmente tienen un contenido energético menor al de los energéticos convencionales y de alta demanda en la industria, como lo es el gas natural. Lo anterior dificulta la introducción directa del gas de síntesis como combustible alternativo debido a que esta sustitución debe garantizar que la potencia de entrada al equipo de combustión se conserve, la combustión sea completa y estable, y que no se generen inconvenientes que comprometan la realización de ajustes en el equipo [6].

Para obtener contenidos energéticos comparables a los del gas natural, la mezcla de gas síntesis con

GLP (mezcla de propano y butano principalmente) resulta una opción viable, dado el alto índice Wobbe que presenta el GLP. Internacionalmente, el GLP se considera como una fuente de energía portable, limpia, eficiente y de fácil acceso para los consumidores en todo el mundo. Sus propiedades lo identifican como una fuente de energía versátil y confiable que puede ser usado en más de 1000 aplicaciones, donde su uso predomina en el sector doméstico, sin embargo, se está buscando potencializar su mercado en el sector industrial para la generación de energía y como energético alternativo en el sector transporte [7], [8].

La pertinencia de estas mezclas está en que la combustión de cada energético por separado todavía busca superar inconvenientes que se generan, ya sea de inestabilidades y bajo poder calorífico en el syngas o las emisiones contaminantes que surgen en la quema de hidrocarburos fósiles. Con estas mezclas se busca aprovechar el valor energético que proporciona el propano así como la reactividad y la reducción en emisiones contaminantes que aporta el H_2 como componente del syngas.

La caracterización de este combustible alternativo es de gran importancia, especialmente en términos de velocidad de deflagración como parámetro fundamental en llamas de premezcla para el diseño de equipos y dispositivos de combustión, desarrollar mecanismos cinético-químicos, predicciones de rendimiento, análisis de la combustión turbulenta, emisiones contaminantes y fenómenos relacionados con la estructura y estabilidad de la llama.

Los estudios de estas mezclas son poco comunes en la literatura, y la mayoría de estos están direccionados a mezclas en las que el hidrocarburo presente es el metano; sin embargo, se han realizado análisis comparativos entre hidrocarburos saturados C1-C4, los cuales revelan que cuando estos son mezclados con syngas, al incrementar el número de carbonos la velocidad de deflagración disminuye [9], [10].

2. Materiales y métodos

La composición de la mezcla se consolidó a partir de un análisis comparativo de su índice de Wobbe con respecto al del gas natural, de tal forma que este combustible alternativo pueda ser usado implementado como energético en equipos de combustión sin afectar su operación o modificar significativamente su diseño.

A partir de lo anterior se planteó una mezcla de GLP/gas de síntesis en una proporción 50-50, donde el GLP se tomará como 100% propano [11] y se trabajara con una composición típica de gas de síntesis obtenido por la gasificación de biomasa reportada por diferentes autores [12], [13]. Con el fin de simplificar la

composición del gas de síntesis, esta se definirá como 40% de H_2 , 40% CO y 20% CO_2 .

En la Tabla 1 se muestra la composición de cada combustible y de la mezcla de estudio y, además, se presenta el índice de Wobbe (W), el cual es un parámetro que se utiliza muy a menudo para caracterizar la intercambiabilidad de un combustible, relacionando el poder calorífico superior con la raíz cuadrada del peso específico del combustible. Con esta relación se puede comparar el contenido de calor de un combustible para una configuración geométrica del inyector del quemador y presión de suministro. En la última columna se muestra una relación de W para cada combustible con respecto al gas natural.

2.1. Metodología numérica

La estimación numérica de la velocidad de deflagración laminar se obtuvo a partir de la subrutina PREMIX del *software* CHEMKIN PRO. Esta rutina requiere el uso de un mecanismo reaccional y un paquete de propiedades de transporte y térmicas, para esta mezcla se evaluaron dos mecanismos, el Grimech 3.0 [14], el cual ha presentado resultados favorables para mezclas de syngas [15], [16] y el de San Diego [17], el cual presenta un buen ajuste para mezclas $H_2/CO/C_3H_8$ [9].

Para el mallado, perfil de temperatura inicial, propiedades de transporte y difusión térmica se toman las recomendaciones realizadas por otros autores en investigaciones previas [5], [15], [16], [17].

2.2. Metodología experimental

La velocidad de deflagración laminar se determinó a partir de la técnica del quemador de llama estabilizada usando el método del ángulo. El cual se describe en la Figura 1. En cada punto del frente de llama la combustión se transmite perpendicularmente, estableciéndose un campo de velocidad de deflagración distribuido a lo largo del frente de llama (ver Figura 1).

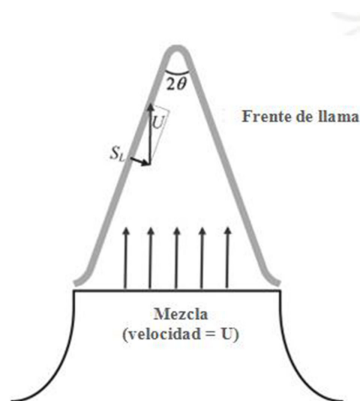


Figura 1. Método del ángulo para determinar la velocidad de deflagración [18].

La componente de la velocidad de la mezcla no quemada que es normal al frente de la llama es idéntica a la velocidad de combustión laminar, por lo tanto, S_L se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$S_L = U \sin \theta \quad (1)$$

Donde U es la velocidad promedio de la mezcla no quemada. Este método se suele denominar como el método del ángulo. Sin embargo, las velocidades locales varían a lo largo del frente de llama debido a los efectos de estiramiento de llama y a las pérdidas de calor, razón por la cual este método solo permite obtener valores promedio.

El frente de llama se genera en un quemador de puerto rectangular de contorno curvado con una geometría de 9.4×29.8 mm. Con este quemador se garantizan números de Reynolds laminares, con el fin de obtener un perfil de velocidades uniforme y que permita lograr una imagen de llamas triangulares y definidas, para poder aplicar el método del ángulo. El quemador cuenta con un sistema de refrigeración por agua, el cual se requiere para mantener a la premezcla a una temperatura constante. La composición de la mezcla se garantiza a partir de rotámetros calibrados específicamente para cada uno de los gases usados para preparar la mezcla combustible/aire. Las especificaciones del banco de rotámetros y el quemador se definen detalladamente en la referencia [5].

Los experimentos se llevaron a cabo a una atmósfera isotérmica de 295 ± 1 K a una altura 1550 m.s.n.m. con una presión de 0.849 bar.

La Figura 2 muestra el montaje usado para la captura de imágenes del frente de llama, el cual consta de una cámara de ICCD (*Intensified Charges Couple Device*) y un filtro que permite únicamente el paso de la radiación UV emitida por radicales CH^* y bloquea la radiación fuera de esta longitud de onda [15]. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de las imágenes obtenidas del frente de llama.

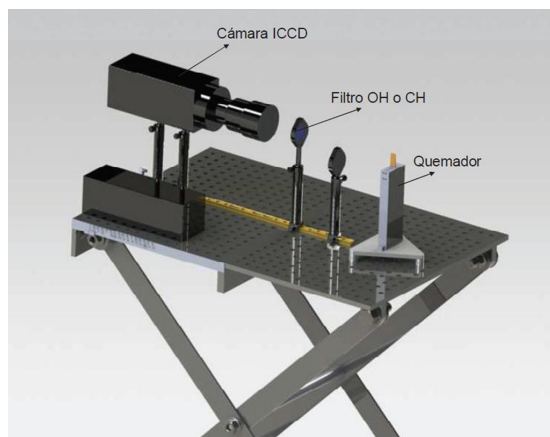


Figura 2. Esquema montaje experimental [16].

Tabla 1. Composición y comparación índice de Wobbe.

Gas	Composición simplificada	W (kWh/m _{st} ³)*	W _i /W _{gas natural}
Gas Natural	100% CH ₄	140.894	1
GLP	100% C ₃ H ₈	21.706	15.405
Syngas	40% H ₂ 40% CO	31.484	0.2234
Mezcla 50-50 GLP/syngas	20% CO ₂ 50% C ₃ H ₈ 20% H ₂ 20% CO 10% CO ₂	139.114	0.9873

*Con base al poder calorífico superior (kWh/m_{st}³).

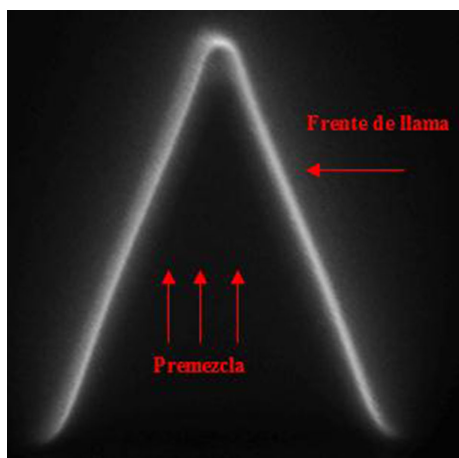


Figura 3. Fotografía ICCD instantánea de la llama. Mezcla 50% C₃H₈ 50% gas de síntesis, dosado 0.9.

3. Resultados y discusión

3.1. Comparación de los datos experimentales con los numéricos

La Figura 4 muestra los resultados experimentales y numéricos de la velocidad de deflagración laminar de la mezcla estudiada, para condiciones atmosféricas de 295 K y 0.849 bar. Se observa como los resultados numéricos tienen un mejor ajuste al mecanismo cinético de San Diego, especialmente en condiciones de mezcla pobre donde el porcentaje de desviación no supera el 6%.

3.2. Efecto de la adición de gas de síntesis en la velocidad de deflagración laminar

La Figura 5 muestra una comparación de los resultados experimentales de velocidad de deflagración obtenidos en el presente estudio, con respecto a resultados previos reportados por otros autores para el propano y el gas de síntesis de composición 40% H₂, 40% CO y 20% CO₂.

A partir de esta comparación se observa como una sustitución del 50% del GLP por gas de síntesis, incrementa considerablemente la velocidad de deflagración, especialmente en condiciones de mezcla pobre, donde la velocidad se incrementa hasta en un 40% con respecto al GLP. Por otro lado, se observa como la adición de propano al gas de síntesis en condiciones de mezcla rica, reduce la velocidad de deflagración de este en un 5% aproximadamente.

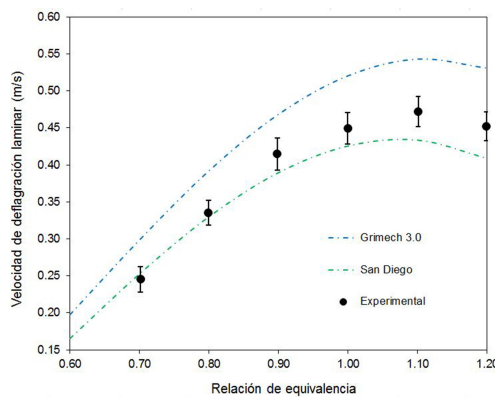


Figura 4. Resultados numéricos y experimentales para la mezcla 50 GLP/50 Gas de síntesis.

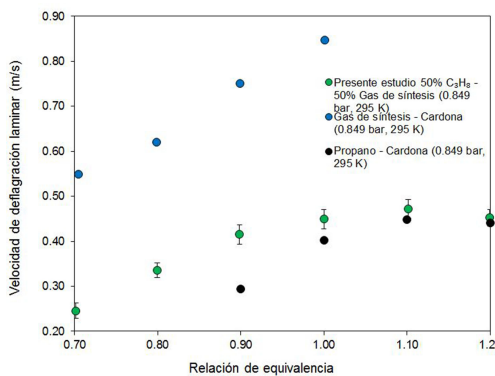


Figura 5. Efecto de la adición de gas de síntesis en la velocidad de deflagración laminar.

4. Conclusiones

Se realizaron mediciones experimentales de la velocidad de deflagración laminar para una mezcla GLP/gas de síntesis obtenido por la gasificación de biomasa, a partir del método del ángulo usando la técnica del quemador de llama estabilizada, a condiciones atmosféricas de 295 K y 0.849 bar. Se realizaron estimaciones numéricas usando dos mecanismos reaccionales, estos resultados se compararon con los obtenidos experimentalmente. Por último, se evaluó el efecto de la adición del syngas en la velocidad de deflagración. Los resultados obtenidos permiten hacer las siguientes afirmaciones:

1. El ajuste de los resultados numéricos a los experimentales muestra como el mecanismo de san Diego puede predecir de manera certera la velocidad de deflagración laminar para mezclas GLP/gas de síntesis a condiciones subatmosféricas, especialmente en la región de mezcla pobre.
2. Los resultados obtenidos muestran como la adición de gas de síntesis incrementa la velocidad de deflagración laminar del propano. Por otro lado, el propano disminuye la velocidad del gas de síntesis. Lo anterior ilustra el cumplimiento del objetivo que era aprovechar la alta reactividad del hidrógeno contenido en el gas de síntesis y atenuar los problemas de inestabilidad de llama de este gas con la adición de propano.
3. El desarrollo de esta investigación permite tener como resultado la caracterización de la mezcla de GLP con gas de síntesis, a partir del cálculo de la velocidad de deflagración laminar como propiedad representativa en el desarrollo y/o ajuste de equipos de combustión donde la estabilidad de llama garantiza el desempeño óptimo y seguro del dispositivo.
4. La divulgación de estos resultados en la comunidad científica incentiva el desarrollo de equipos que aprovechen el contenido energético de energías alternativas donde el gas de síntesis tenga una importante participación.

Referencias

- [1] IEA. (2013) World energy outlook.
- [2] D. Roddy, "A syngas network for reducing industrial carbon footprint and energy use," *Applied Thermal Engineering*, vol. 53, no. 2, pp. 299 – 304, 2013, includes Special Issue: PRO-TEM Special Issue.
- [3] K. H. Casleton, R. W. Breault, and G. A. Richards, "System issues and tradeoffs associated with syngas production and combustion," *Combustion Science and Technology*, vol. 180, no. 6, pp. 1013–1052, 2008.
- [4] K. J. Whitty, H. R. Zhang, and E. G. Eddings, "Emissions from syngas combustion," *Combustion Science and Technology*, vol. 180, no. 6, pp. 1117–1136, 2008.
- [5] H. Burbano, J. Pareja, and A. Amell, "Laminar burning velocities and flame stability analysis of H₂/CO/air mixtures with dilution of N₂ and CO₂," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 3232 – 3242, 2011.
- [6] J. Cortés, "Validación de la intercambiabilidad de gases en el contexto Colombiano." Especialización En Combustibles Gaseosos, Universidad de Antioquia, 20003.
- [7] WorldLPGas. (2013) Annual report 2013. World LP Gas Association.
- [8] UPME, MinMinas. (2013) Cadena del gas licuado del petróleo. Bogotá, Colombia.
- [9] O. Park, P. S. Veloo, N. Liu, and F. N. Egolopoulos, "Combustion characteristics of alternative gaseous fuels," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 33, no. 1, pp. 887 – 894, 2011.
- [10] T. M. Vu, J. Park, J. S. Kim, O. B. Kwon, J. H. Yun, and S. I. Keel, "Experimental study on cellular instabilities in hydrocarbon/hydrogen/carbon monoxide-air premixed flames," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 6914 – 6924, 2011.
- [11] CCS (Consejo Colombiano de Seguridad). (2010) Hoja de datos de seguridad lpg gas petrolato líquido.
- [12] M. Bolhár-Nordenkampf, R. Rauch, K. Bosch, C. Aichernig, and H. Hofbauer, "Biomass chp plant güssing - using gasification for power generation," in *International Conference on Biomass Utilization*, Thailand, June 2002.
- [13] K. Göransson, U. Söderlind, J. He, and W. Zhang, "Review of syngas production via biomass DF-BGs," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 482 – 492, 2011.
- [14] D. Smith, D. Golden, M. Frenklach, N. Moriarty, B. Eiteneer, and M. Goldenberg. (2000) GRI-Mech 3.0.
- [15] A. A. Amell, H. A. Yepes, and F. J. Cadavid, "Numerical and experimental study on laminar burning velocity of syngas produced from biomass gasification in sub-atmospheric pressures," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 16, pp. 8797 – 8802, 2014.

-
- [16] H. A. Yepes and A. A. Amell, “Laminar burning velocity with oxygen-enriched air of syngas produced from biomass gasification,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 18, pp. 7519 – 7527, 2013.
- [17] UC San Diego. (2011) Chemical-kinetic mechanisms for combustion applications. Mechanical and Aerospace Engineering (Combustion Research), University of California at San Diego.
- [18] J. Pareja, H. J. Burbano, and Y. Ogami, “Measurements of the laminar burning velocity of hydrogen-air premixed flames,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 4, pp. 1812 – 1818, 2010.