

# Estudio del efecto de la adición de hidrógeno en las propiedades de combustión de biogas en sistemas de premezcla atmosféricos

Investigación Terminada

Andrés Iván Mayorga Pico

Ingeniería en Energía

[amayorga610@unab.edu.co](mailto:amayorga610@unab.edu.co)

Diego Alexander López Osorio

Ingeniería en Energía

[dlopez763@unab.edu.co](mailto:dlopez763@unab.edu.co)

Universidad Autónoma de Bucaramanga

## RESUMEN

En el presente trabajo se busca estudiar el efecto de la adición de hidrógeno en la combustión de premezcla de biogás en porcentajes controlados de 5%, 10% y 15%, en las propiedades de combustión de este último. Se determinaron las propiedades de combustión para un biogás simulado (60% CH<sub>4</sub>, 40% CO<sub>2</sub>) y posteriormente se determinaron para las mezclas biogás-hidrógeno con porcentajes de adición de hidrógeno de 5% (57% CH<sub>4</sub>, 38% CO<sub>2</sub>, 5% H<sub>2</sub>), 10% (54% CH<sub>4</sub>, 36% CO<sub>2</sub>, 10% H<sub>2</sub>), y 15% (51% CH<sub>4</sub>, 34% CO<sub>2</sub>, 15% H<sub>2</sub>) respectivamente. Las propiedades estudiadas fueron las relacionadas con el volumen y Masa de Aire requeridos, Volumen y Masa de Humos Secos y Húmedos, el Poder Calorífico Inferior (PCI) y Superior (PCS) y los Límites de Inflamabilidad Inferior (LII) y Superior (LSI). Los resultados obtenidos muestran que la adición de hidrógeno en la combustión de biogás permite obtener propiedades de combustión cercanas a las del gas natural o GLP, amplía el rango de los límites de inflamabilidad y aumenta el poder calorífico de la mezcla combustible, permitiendo una mayor intercambiabilidad entre biogás y gas natural o GLP en sistemas de combustión de combustibles gaseosos debido al aumento del índice de Wobbe, parámetro utilizado para determinar la intercambiabilidad de combustible gaseosos. Igualmente, mediante la utilización del software de simulación de cinética química CHEMKIN 2.0 y su rutina PREMIX, se evaluó la velocidad de deflagración laminar de las mezclas estudiadas y los perfiles de temperatura para determinar la estructura de llamas de las mezclas bajo mecanismos cinéticos reducidos y completos (GRIMECH 2.11 y 3.0), parametrizados de acuerdo a diferentes factores de aireación.

## ABSTRACT

In this paper, the effect of the addition of hydrogen in the biogas premix combustion is studied, with controlled percentages of 5%, 10% and 15% of hydrogen addition. Combustion properties of simulated biogas (60% CH<sub>4</sub>, 40% CO<sub>2</sub>) were determined and subsequently for biogas-hydrogen mixtures with percentages of hydrogen addition of 5% (57% CH<sub>4</sub>, 38% CO<sub>2</sub>, 5% H<sub>2</sub>), 10% (54% CH<sub>4</sub>, 36% CO<sub>2</sub>, 10% H<sub>2</sub>) and 15% (51% CH<sub>4</sub>, 34% CO<sub>2</sub>, 15% H<sub>2</sub>) respectively, in molar basis. Properties studied were those related to the volume and mass of required air, volume and mass of wet and dry fumes, the Lower Calorific Value (LCV), high calorific value (HCV) and Flammable Limits. Results show

that the addition of hydrogen in the biogas combustion allows to obtain combustion properties close to those of natural gas or LPG, expands the range of flammability limits and increases the calorific value of the combustible mixture, allowing greater interchangeability between biogas and natural gas or LPG in gaseous fuel combustion systems due to increased Wobbe index, a parameter used to determine the interchangeability of gaseous fuel. Similarly, using simulation software of chemical kinetics CHEMKIN 2.0 and its subroutine PREMIX, the speed of deflagration for mixtures studied and temperature profiles were evaluated to determine the structure of flames mixtures, using reduced and full kinetic mechanisms (GRIMECH 2.11 and 3.0), parameterized according to different factors aeration.

Área de Conocimiento

Ingeniería

Palabras Clave

Biogás, Hidrógeno, Límites de Inflamabilidad, Velocidad de Deflagración.

## INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente tendencia e impulso dado a la utilización de fuentes de energía alternativas y/o no convencionales, el biogás ha tomado una notable importancia en lo referente al tema, en especial el producido por la fermentación anaerobia de residuos orgánicos provenientes de distintas fuentes para ser propuesto como un sustituto de los combustibles fósiles y no como emisiones de desecho. Sin embargo, su baja velocidad de deflagración laminar (aproximadamente 25 cm/s a 1 atm para una composición típica de 60% CH<sub>4</sub> y 40% CO<sub>2</sub>) produce un estrecho intervalo de estabilidad de llama y bajo poder calorífico, contrario a lo sucedido con el Gas Natural o GLP, que debido a la influencia del dióxido de carbono presente en porcentajes de hasta un 45% en volumen. Esto hace que su intercambiabilidad con estos combustibles sea bastante baja. Debido a esta baja intercambiabilidad, su utilización en los sistemas de combustión convencionales depende de la intervención física del quemador con mecanismos de estabilización de llama o mediante la adición de otro gas que mejore sus propiedades de combustión.

En el caso de la adición de otro gas, el hidrógeno al ser un gas cuya velocidad de deflagración laminar es mucho mayor

(aproximadamente 300 cm/s a 1 atm), puede ser utilizado como un agente que permita incrementar el intervalo de estabilidad de una mezcla combustible de biogás-aire así como también aumentar la tasa de liberación de calor gracias al alto poder calorífico del hidrogeno, lo que posibilitaría su intercambiabilidad en sistemas de combustión con combustibles gaseosos convencionales.

## OBJETIVOS

Determinar la influencia de la adición de hidrógeno en las propiedades de combustión de biogás en quemadores de premezcla.

Determinar la influencia de la adición de hidrógeno en los límites de inflamabilidad de mezclas con biogás en quemadores de premezcla.

Determinar la velocidad de deflagración de mezclas biogás-hidrógeno en quemadores de premezcla

## METODOLOGÍA

La estimación de las propiedades de combustión se realizó mediante el uso de los modelos de reacción química y sus balances estequiométricos y el modelo de Le Chatelier para determinar límites de inflamabilidad de mezclas de gases. Para determinar la velocidad de deflagración se ha utilizado el mecanismo cinético de reacción GRIMECH 3.11 utilizando la herramienta computacional CHEMKIN-Premix utilizando un modelo de llama plana.

Inicialmente se determinaron las propiedades de combustión relacionadas con los requerimientos de aire, las relacionadas con la generación de productos de combustión y las relacionadas con el contenido energético del combustible. Posteriormente, se determinaron los límites de inflamabilidad para las mezclas biogás-hidrógeno utilizando la ley de chatelier tomando como mezcla binaria la producida entre el dióxido de carbono presente en el biogás y el hidrógeno adicionado al mismo. Finalmente, se realizaron las simulaciones de la llama utilizando el mecanismo cinético indicado para determinar la velocidad de deflagración de las mezclas para diferentes factores de aireación a condiciones de temperatura y presión atmosférica locales.

## REFERENTES TEÓRICOS

Para el manejo de los combustibles en sus aplicaciones energéticas, es necesario conocer acerca de la disponibilidad energética por cantidad de combustible, de los requerimientos de aire para tener una combustión completa y de la cantidad y composición de productos de combustión. Estos requerimientos pueden ser fácilmente determinados cuando se conocen las propiedades de combustión de la mezcla combustible – comburente utilizada, de ahí la importancia de este tema en la ingeniería de combustión.

Igualmente, la estimación de las principales propiedades de combustión de combustibles gaseosos partiendo de su composición química, aplicando software de cálculo,

simulaciones numéricas o métodos experimentales, es conveniente para comprender la ocurrencia de muchos fenómenos durante la combustión y para realizar análisis comparativos de intercambiabilidad entre estos.

A continuación se definen las propiedades de combustión relacionadas con los requerimientos de aire y formación de productos de combustión; igualmente las propiedades relacionadas con el contenido energético de un combustible y finalmente la definición del concepto de intercambiabilidad de gases y algunos aspectos sobre la velocidad de deflagración [1].

Propiedades relacionadas con los requerimientos de aire:

Volumen estequiométrico de aire ( $V_a$ ) que se define como el volumen de aire a condiciones de referencia necesario para la combustión estequiométrica de 1 metro cúbico de gas a condiciones de referencia.

Densidad relativa ( $d$ ) definida como la relación entre la densidad del gas y la densidad del aire en el mismo estado de referencia.

Propiedades relacionadas con la generación de productos de combustión:

Volumen de humos húmedos ( $V_h$ ) definido como el volumen total en metros cúbicos de productos de combustión generados por la combustión completa de un metro cúbico de gas.

Volumen de humos secos ( $V_{hs}$ ) definido como el volumen en metros cúbicos de productos de combustión en base seca generados por la combustión completa de un metro cúbico de gas, es decir sin tener en cuenta el agua producida en la reacción.

Volumen de agua ( $V_{H_2O}$ ) definido como el volumen en metros cúbicos de agua generada por la combustión completa de un metro cúbico de gas.

Volumen de dióxido de carbono ( $V_{CO_2}$ ) definido como el volumen en metros cúbicos de dióxido de carbono generado por la combustión completa de un metro cúbico de gas.

Porcentaje máximo de dióxido de carbono ( $\gamma_{CO_2}$ ) definido como la relación entre el volumen de dióxido de carbono y el volumen de humos secos en porcentaje, este valor es máximo para una reacción estequiométrica.

Propiedades relacionadas con el contenido energético del combustible:

Poder calorífico inferior PCI, es la cantidad de energía liberada durante la combustión estequiométrica de un combustible y el agua en los productos de combustión se encuentra en fase gaseosa.

Poder calorífico superior PCS, es la cantidad de energía liberada durante la combustión estequiométrica de un combustible y el agua en los productos de combustión se encuentra en fase líquida. La diferencia entre el poder calorífico superior y el poder calorífico inferior es el calor latente de vaporización del agua.

Temperatura de llama adiabática (TLL), es la máxima temperatura que alcanzan los productos de combustión cuando esta se realiza en condiciones estequiométricas y adiabáticas, si bien esta temperatura nunca se alcanza en una combustión real, es una propiedad importante para el estudio de fenómenos térmicos.

Índice de Wobbe (W), es la relación entre el poder calorífico del gas ya sea superior o inferior y la raíz cuadrada de su densidad relativa, es de especial interés cuando se busca la intercambiabilidad entre gases combustibles ya que cuando se

requiere sustituir un gas combustible por otro, para tener la misma rata calórica en el sistema de combustión, se debe garantizar que los índices de Wobbe de los gases sean iguales.

Intercambiabilidad de gases [2],[3]

Dos gases son perfectamente intercambiables cuando al sustituir uno por otro en un equipo de combustión, el equipo continua operando óptimamente (potencia térmica comparable, estabilidad de llama y emisiones contaminantes menores o iguales), sin necesidad de introducir ningún ajuste.

Se admite generalmente que la intercambiabilidad puede estar limitada al uso térmico clásico. Pero la experiencia ha demostrado que, en general dos gases son intercambiables, lo son en otros usos y pocos casos necesitan de un estudio particular.

En la industria por lo general, no se exige una intercambiabilidad perfecta sino que los aparatos funcionen correctamente en un rango de valores de cada una de las propiedades. Se tiene así el concepto de intercambiabilidad aproximada que dice: "un gas es intercambiable por otro de referencia si se asegura que, sin ajuste en los aparatos domésticos y eventualmente pequeños ajustes en aparatos industriales, se tiene un funcionamiento óptimo de esos aparatos de uso térmico clásico que fueron ajustados para el gas de referencia".

La noción de intercambiabilidad involucra aspectos tales como:

La composición de los gases.

Las condiciones de alimentación de los aparatos.

Las características del proceso de combustión.

La flexibilidad de los aparatos para el uso de diferentes gases.

Los ajustes que se deban realizar.

La severidad de los criterios para juzgar el buen funcionamiento de los aparatos.

La definición de las condiciones de intercambiabilidad requiere de buenos resultados experimentales, que permitan definir los límites por fuera de los cuales se presentan defectos en la combustión como inestabilidad de llama, formación excesiva de contaminantes o poca producción de calor.

El principal índice para definir la intercambiabilidad entre gases es el índice de Wobbe. Este número caracteriza un quemador desde el punto de vista de sus condiciones de operación y expresa la capacidad de un gas para entregar calor a un quemador.

Finalmente, la intercambiabilidad reviste importancia cuando se está en un proceso de cambio de gases como sucede actualmente en Colombia con el cambio de GLP a gas natural o en regiones rurales donde el uso del biogás tiene un gran potencial en sistemas de cocción y calentamiento.

Límites de Inflamabilidad

(LII –límite inferior de inflamabilidad– LSI –límite superior de inflamabilidad–) corresponden a las proporciones de la mezcla combustible - oxidante en porcentaje por volumen de gas en la mezcla, para las cuales la reacción de combustión puede iniciarse y auto propagarse.

Los límites de inflamabilidad son de gran importancia en la combustión, ya que su determinación y conocimiento permiten saber fácilmente si un combustible (por lo general en estado gaseoso) puede o no arder, en las condiciones dadas. Las mezclas de un combustible con un oxidante sólo pueden reaccionar si se encuentran dentro de un intervalo determinado de composiciones.

Los límites de inflamabilidad dependen de las concentraciones de oxígeno y gases inertes en cada mezcla. A medida que disminuye la concentración de inertes y aumenta la concentración de oxígeno, aumenta el límite superior de inflamabilidad, mientras que el límite inferior prácticamente no varía. Este último tampoco se altera con la presión (excepto con presiones muy por debajo de la presión atmosférica).

Los niveles de concentración en el que el hidrógeno puede reaccionar con el aire a presión normal y temperatura normales, en comparación con otros gases combustibles, es muy amplia (el LII es del 4 vol.-%, siendo el LSI del 75.6 vol.-%). Los límites de inflamabilidad del H<sub>2</sub> del %H<sub>2</sub>, %O<sub>2</sub>, diluyente, temperatura y presión.

El amplio rango entre el LII y LSI del H<sub>2</sub> influye directamente en el rango de límites del Biogás, cuando se adicionan porcentajes del 5%, 10% y 15%, disminuyendo el LII y aumentando el LSI, proporcional a cada porcentaje de adición. Esto nos demuestra que pequeñas adiciones de H<sub>2</sub> hacen más rica la mezcla, lo cual permite la ignición en un rango más amplio de concentraciones, favoreciendo la combustión.

Aspectos fenomenológicos de la combustión de premezcla,

Una llama de premezcla típica para hidrocarburos tiene diferentes zonas y cada zona tiene una apariencia típica que marca cada etapa de la combustión del gas [4],[5]. Sobre el puerto del quemador se tiene un delgado cono azul llamado cono interno. Dentro de este cono se observa un área oscura que es la mezcla fresca aire-gas sin quemar antes de entrar a la zona de precalentamiento y luego a la zona luminosa donde se produce la reacción y la liberación de calor. La llama se puede dividir entonces en dos zonas: la zona de precalentamiento y la zona de reacción. A su vez, esta zona de reacción se divide en una región de química rápida y otra de química lenta. La destrucción de las moléculas del combustible y la creación de muchas especies intermedias suceden en la región de química rápida, donde prevalecen las reacciones bimoleculares. Esta región rápida es de un espesor bastante reducido, lo que causa que los gradientes de temperatura y concentración de especies sean muy grandes. Estos gradientes son los que le dan a la llama las formas de autosostenerse: la difusión de calor y de radicales desde la zona de reacción a la zona de precalentamiento donde viene llegando la mezcla fresca aire-gas.

La velocidad de deflagración laminar es uno de los más importantes parámetros para el análisis de los fenómenos de combustión, especialmente para el diseño de sistemas de altas prestaciones como turbinas a gas. Conocida también como velocidad de llama, es la velocidad lineal a la cual viaja la llama a través de una mezcla gas-aire estática, la rapidez con la que avanza la combustión de la zona quemada a la zona sin quemar o también como la rapidez con la que un combustible libera su energía [4],[6]. Este parámetro igualmente depende en gran forma del tipo de gas y la cantidad de aire con que este se mezcle. Este parámetro también es de gran importancia a la hora de intercambiar gases combustibles en un mismo quemador ya que es difícil sustituir un gas que arda rápidamente por una mayor cantidad de otro que arda lentamente.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Dado que el biogás y el hidrógeno son combustibles gaseosos con propiedades de combustión muy diferentes [7],[8],[9], a continuación se presentan las principales propiedades de estos combustibles.

Tabla 1. Propiedades de combustión

PROPIEDAD	BIOGAS (60% CO <sub>2</sub> - 40% CH <sub>4</sub> )	HIDRÓGENO (H <sub>2</sub> )
Volumen Esteq. Aire [Va]	5,712	2,38
Volumen CO <sub>2</sub> [V(CO <sub>2</sub> )]	1	0
Volumen H <sub>2</sub> O [V(H <sub>2</sub> O)]	1,2	1
Volumen Humos Secos [Vf]	5,512	1,88
Volumen Humos Húmedos [Vf']	6,712	2,88
Densidad relativa	0,9431	0,0696
% máximo de CO <sub>2</sub>	18,142	0
Masa estequiométrica de la mezcla [Mam]	34,116	2,016
Límite de Inflamabilidad Inferior [LII]	8,333	4
Límite de Inflamabilidad Superior [LSI]	22	75
Poder Calorífico Inferior [PCI]	481444,32	241869
Poder Calorífico Superior [PCS]	534198	285830
Calor de Formación - Entalpía [h°f]	-202318	0
Entalpía Total [h]	-202318	0
Calor de Reacción - Entalpía [hrp] (Hp-Hr)	-534198	-285830
Entalpía Sensible [Δh]	0	0
Índice de Wobbe [W]	550066,8	1083000
Temperatura punto de rocío [Tr]	57,374	72,82

Volumen estequiometrico de aire (Va) es el volumen de aire requerido para quemar estequiométricamente un m<sup>3</sup> de gas combustible.

Volumen de humos húmedos (Vf') es el volumen total de humos producido por la combustión de un m<sup>3</sup> de gas combustible; se expresa en m<sup>3</sup> de humos húmedos/m<sup>3</sup> de gas.

Volumen de humos secos (Vf) es el volumen de humos secos normal o estándar producido por la combustión estequiometrica de un m<sup>3</sup> de gas combustible. No se tiene en cuenta el agua producida; se expresa en m<sup>3</sup> de humos secos/m<sup>3</sup> de gas.

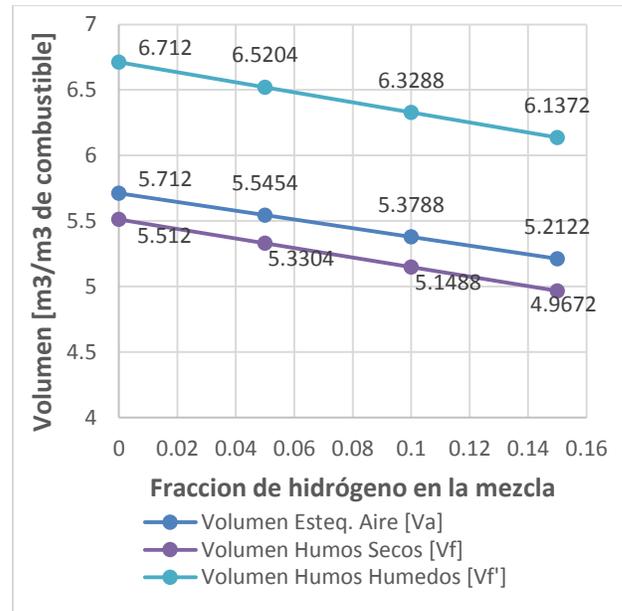


Figura 1. Variación de las propiedades de los humos según la fracción de hidrógeno en la mezcla con biogás (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> de combustible)

Como se puede observar en la gráfica anterior, al adicionar hidrógeno a un biogás cuya composición química típica es 60% CH<sub>4</sub> y 40% CO<sub>2</sub>, las propiedades volumétricas de combustión disminuyen su valor y presentan cierto grado de sensibilidad a estas adiciones. Esta disminución se presenta básicamente debido al menor requerimiento de volumen de aire por parte del hidrógeno para realizar una combustión estequiométrica.

El porcentaje máximo de CO<sub>2</sub> es la relación entre el volumen de CO<sub>2</sub> y el volumen de humos secos en porcentaje; cuyo valor es máximo en condiciones de combustión estequiométrica.

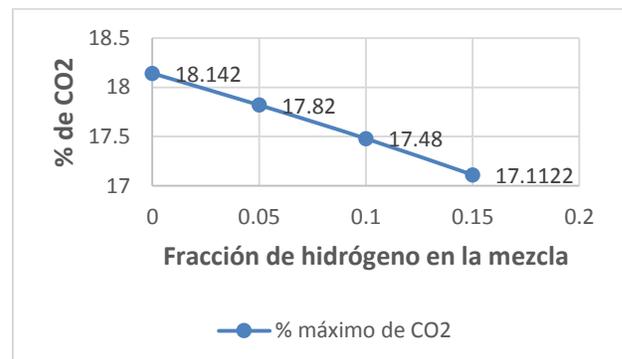


Figura 2. Variación en el porcentaje máximo de CO<sub>2</sub> de acuerdo a la fracción de hidrógeno en la mezcla con biogás (kg/kg de combustible)

Claramente se puede ver el descenso en el porcentaje de CO<sub>2</sub>, el cual presenta cierta sensibilidad a la adición de hidrógeno, dadas las propiedades de la combustión solamente de hidrogeno. Es un resultado importante, pues no solamente se ve como mejora la combustión con la adición de este gas, además la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> es un tema de vital importancia dados los continuos esfuerzos en cuanto a la disminución del efecto invernadero.

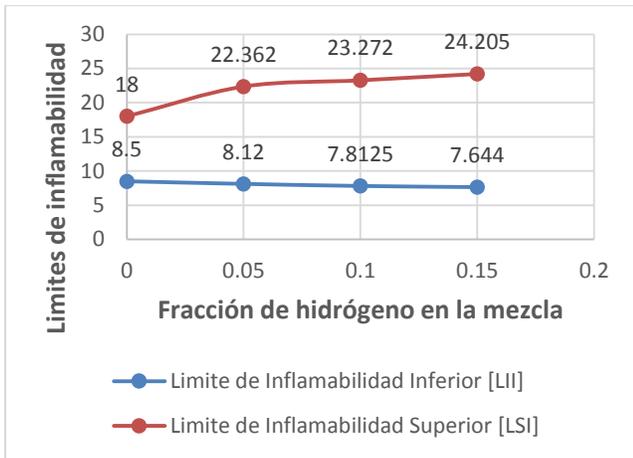


Figura 3. Límites de inflamabilidad para una mezcla biogás-hidrógeno

En cuanto a los resultados observados respecto a los límites de inflamabilidad, se logra ver una variación muy pequeña del límite inferior, debido a que éste presenta un valor cercano para el hidrógeno y el metano. Lo contrario ocurre con el límite superior, debido a que este es bastante mayor en el caso del hidrógeno, presenta una significativa varia sensibilidad, al momento de realizar las mezclas biogás-hidrógeno. Por lo tanto, el intervalo de inflamabilidad de la mezcla resultante aumentará al adicionar hidrógeno.

Poder calorífico (PCS –poder calorífico superior– y PCI –poder calorífico inferior–) se define como la cantidad de energía liberada por un combustible cuando se queme estequiométricamente y los productos de combustión salgan a igual condición (presión y temperatura) a la que entran los reactivos. Se expresa en kJ/kg de combustible. Para hidrocarburos e hidrógeno, debido a la formación de agua en la combustión de éstos, es necesario diferenciar entre poder calorífico superior y poder calorífico inferior, donde en uno se considera que el agua de los humos sale en estado líquido, aprovechando su entalpía de vaporización, y en el otro en estado gaseoso respectivamente. Este es indispensable para calcular la potencia térmica de cualquier equipo que funciona con combustibles gaseosos.

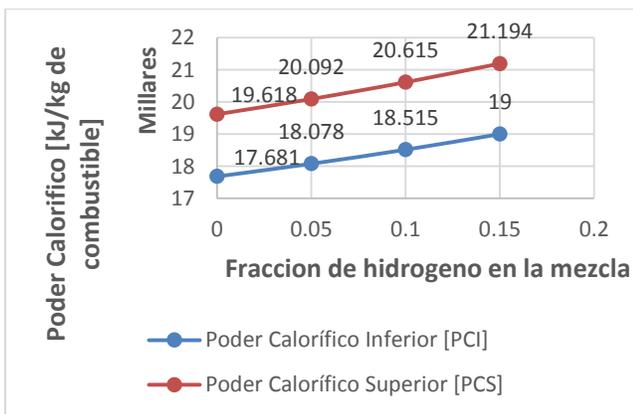


Figura 4. Poder calorífico superior e inferior para mezclas biogás-hidrógeno (kJ/kg de combustible)

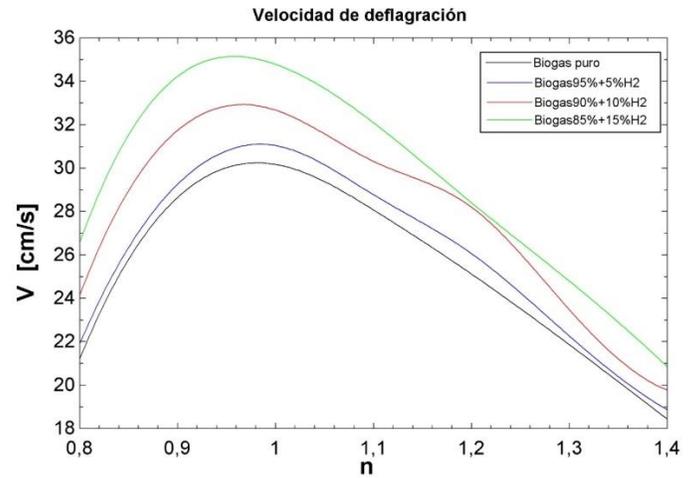


Figura 5. Velocidad de deflagración a distintos factores de aireación para cada mezcla.

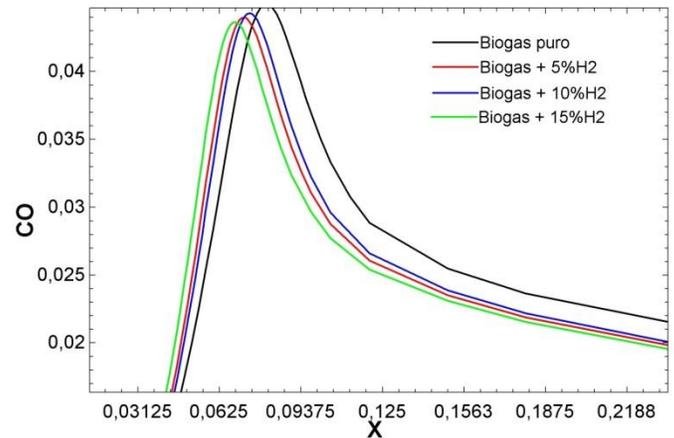


Figura 6. Especies Químicas X vs. CO para cada mezcla.

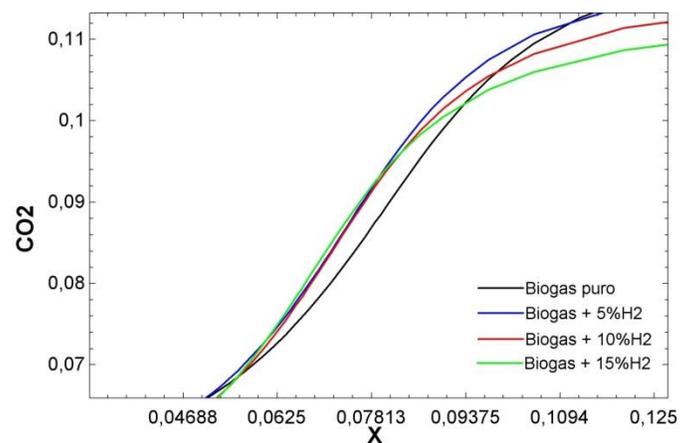


Figura 7. Especies Químicas X vs. CO2 para cada mezcla.

## CONCLUSIONES

La adición de hidrógeno al Biogás simulado en este trabajo, permite obtener propiedades de combustión del mismo que lo hacen intercambiable con Gas Natural o GLP en sistemas de combustión convencional (Velocidad de Deflagración, Límites de Inflamabilidad).

La adición de Hidrógeno tiene un efecto mayor en los límites de inflamabilidad que en la velocidad de deflagración, lo que indica que la cantidad de Hidrógeno a añadir tiene un limitante de seguridad.

El mecanismo cinético utilizado (GRIMECH 2.11) en la herramienta CHEMKIN-Premix, muestra resultados concordantes con la literatura referente a las propiedades de combustión de gases pobres como el Biogás.

## OBSERVACIONES

Los resultados mostrados hacen parte de la primera etapa del desarrollo del proyecto “ESTUDIOS DEL EFECTO DE LA ADICIÓN DE HIDRÓGENO EN LA COMBUSTIÓN DE BIOGAS EN UN QUEMADOR DE PREMEZCLA ATMOSFÉRICO”, que abarca etapas experimentales y de simulación numérica en desarrollo.

Es importante aclarar que este trabajo hace parte de un proyecto de investigación asociado al Grupo GIRES de la UNAB, comprendido por la simulación y las pruebas experimentales mediante el montaje del quemador atmosférico de premezcla para la comparación de resultados teóricos y experimentales.

Finalmente, este proyecto de investigación hace parte de la primera de tres fases de un proyecto que abarca las etapas siguientes de obtención del hidrógeno a partir del mismo biogás, su aplicación en hornos industriales y la etapa final de aplicación en motores de combustión interna alternativos.

## REFERENCIAS

- A. Amell; “Estimación de las propiedades de combustión de combustibles gaseosos”; Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Centro de Extensión Académica CESET. Medellín, 2002.
- A. Amell; “Fenómenos de combustión en llamas de premezcla”; Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Centro de Extensión Académica CESET. Medellín, 2009.
- A. Amell, E. Gil y E. Gómez; “Combustión de gas natural y quemadores industriales”; Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Centro de Extensión Académica CESET. Medellín, 1998.
- C. Díaz, A. Amell y L. Cardona; “Estudio experimental de la estabilidad de llama de biogás en un sistema de premezcla”; Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía (GASURE). Medellín, 2008.
- American Gas Association; “Fundamentals of gas combustion”; Third edition, 131 p. USA, 2001.
- Y. Ogami, H. Kobayashi; “Laminar burning velocity of stoichiometric CH<sub>4</sub>/air premixed flames at high pressure and high temperature”; JSME International Journal, series B, Vol. 48, No. 3, pp. 603-609. 2005.

Leung, Wierzba; “The effect of hydrogen addition on biogas non-premixed jet flame stability in a co-flowing air stream”; International journal of Hydrogen Energy. 2008.33, 3856 – 3862.

Leung, Wierzba; “Effects of hydrogen addition on methane combustion”. Fuel Processing Technology. 2008. 89. 1142-1147.

Porpatham, Ramesh, & Nagaingam; “Effect of hydrogen addition on the performance of a biogas fuelled spark ignition engine”. International Journal of Hydrogen Energy 32, 2057 – 2065. 2007

## IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Nombre del semillero	Semillero de Investigación en Ciencias Termoflúidicas
Tutor del proyecto	Carlos Alirio Díaz González
Grupo de Investigación	GIRES
Línea de Investigación	Fuentes Energéticas y Transformación de Energía