

COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ESTRUCTURA DE LLAMA Y PATRÓN DE RADIACIÓN ENTRE GAS NATURAL Y BIOGÁS SIMULADO.

Carlos Alirio Diaz Gonzalez^{1*}, Andres Amell Arrieta²

¹ UNAB-Bucaramanga, Ingeniería en Energía. Calle 48 No. 39-234 Altos de Cabecera
Bucaramanga - Santander – Colombia.

² UdeA-Medellin. Facultad de Ingeniería. Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía GASURE. Bloque 20 - Oficina 435. Calle 67 Número 53 – 108, Medellín, Antioquia, Colombia.

*Tel(7) (57) 643 6111 /643 6261, extensión 235, cdiaz23@unab.edu.co

RESUMEN

La utilización de combustibles gaseosos implica el conocimiento de los fenómenos de su combustión para evitar problemas de intercambiabilidad entre los combustibles gaseosos fósiles y combustibles gaseosos no convencionales como el biogás. Estos problemas de intercambiabilidad se originan principalmente en las diferencias en densidad, poder calorífico y velocidad de deflagración, donde esta última tiene una notoria influencia en la estructura de llamas de premezcla, originando que bajo las mismas condiciones de potencia y factor de aireación, la estructura de llama de biogás presente diferencias respecto a la de una llama de gas natural. Igualmente, la diferente concentración de dióxido de carbono y vapor de agua producidos por la combustión, produce una diferencia en el flux de radiación emitido por la llama de biogás comparada con la llama de gas natural bajo las mismas condiciones de potencia y factor de aireación. En este trabajo se muestra una comparación experimental de la estructura de llama y el patrón de radiación entre una llama de premezcla parcial de biogás simulado de una composición de 60% de metano y 40% de dióxido de carbono y un gas natural con un contenido de 98% de metano. Las diferencias observadas en la estructura de llama y el patrón de radiación, deben ser tenidas en cuenta en el diseño de hogares de hornos o cámaras de combustión en donde el biogás sea el combustible a utilizar ya que la transferencia de calor en hornos tendrá una fenomenología diferente que el gas natural, acarreando problemas de intercambiabilidad.

1.- Introducción

El biogás es producido a partir de la fermentación anaerobia de la materia orgánica en rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos y en biodigestores anaerobios de desechos orgánicos animales y vegetales. El beneficio ambiental de la producción y uso de este combustible se nota profundamente en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la descomposición de la materia orgánica en desechos agropecuarios y en los rellenos sanitarios. Los principales componentes de este Biogás son el metano y el dióxido de carbono junto a menores porcentajes de oxígeno, nitrógeno y trazas de otros compuestos volátiles orgánicos VOC por sus siglas en inglés [1].

El Biogás posee un bajo poder calorífico pero aun así, su energía es suficiente para mantener en operación un dispositivo de generación de potencia como turbinas, microturbinas, motores alternativos o sistemas de calentamiento y cocción de alimentos [2], [3]. En zonas rurales con disponibilidad de desechos orgánicos, la producción y uso del biogás en quemadores de premezcla para la cocción de alimentos tiene efectos significativos sobre la reducción de la tala de bosque y la disminución de las enfermedades respiratorias, originada por la emisión de partículas de la combustión de la leña en sistemas de combustión artesanales e ineficientes. De acuerdo a la Agencia Internacional de la Energía existen en el mundo 2500 millones de personas con este problema.

Dada la gran proporción de dióxido de carbono presente en el Biogás, las características de su combustión son diferentes a las del gas natural; se reduce su temperatura de llama, su velocidad de deflagración laminar y debido a su bajo poder calorífico, su índice de Wobbe es menor al gas natural por lo tanto, se tienen problemas de estabilidad de llama e intercambiabilidad. Entre los trabajos más importantes realizados en el estudio de la combustión de Biogás están los de Lee et al [4] donde se estudió los efectos del dióxido de carbono en la velocidad de deflagración laminar S_L , que presenta una disminución en su valor ante la presencia de este gas; Quin, Egolfopoulos y Tsotsis [3] realizaron su estudio sobre los diferentes aspectos del uso del Biogás en sistemas de generación de potencia. Lee & Hwang [5] estudiaron experimentalmente el fenómeno de estabilidad en Biogás y mezclas de este con metano y propano. También es de gran importancia el trabajo clásico

de P.F. Kurz [6] sobre los factores que influyen la estabilidad en llamas de premezcla en quemadores tipo bunsen.

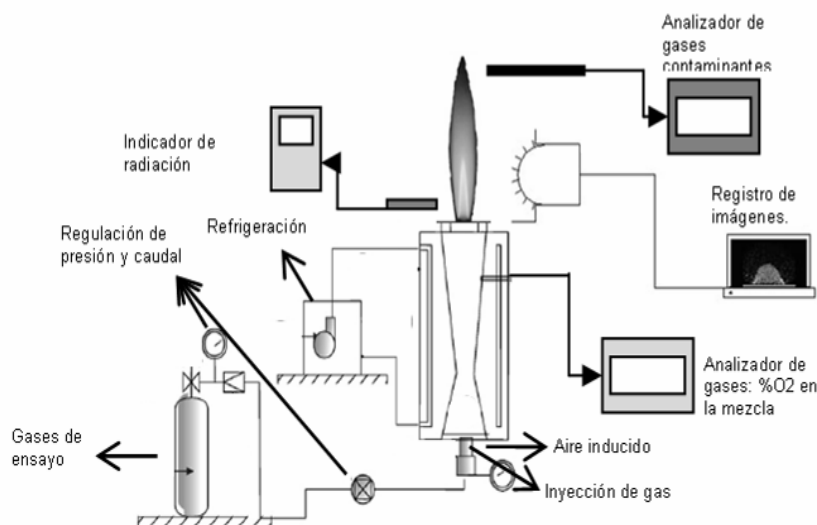
Por razones de seguridad para los usuarios y de eficiencia energética, el estudio de las aplicaciones del biogás en sistemas de combustión de premezcla resulta de gran pertinencia, máxime cuando a nivel internacional se encuentran poco trabajos en el tema y a nivel nacional aun no se aborda. Así, el principal objetivo de este estudio es comparar la estructura de llama de biogás simulado con la de gas natural en un sistema de premezcla parcial atmosférico y también su patrón de radiación; obteniendo información para el diseño, rediseño u optimización de sistemas de combustión para su utilización como combustible.

2.- Condiciones experimentales

2.1.- Montaje:

En la Figura 1 se muestra un esquema del montaje utilizado en esta etapa. En esta etapa se realizó primero el estudio de la estructura de llama y posteriormente del patrón de radiación del biogás utilizado.

Figura 1. Esquema del montaje experimental utilizado en este trabajo.

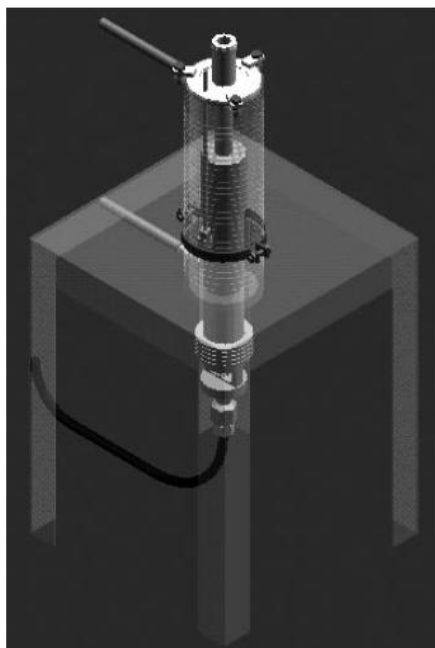


El biogás utilizado se ha adquirido a la empresa AGAFANO y su contenido igualmente ha sido certificado. La composición en volumen de este gas es de 60% metano y 40% dióxido

de carbono, que, como se presentó en la introducción, es una composición promedio para el biogás.

El quemador utilizado es un quemador atmosférico de premezcla de aire inducido y por lo tanto no se requirió de un sistema de ventilación para el suministro del aire de combustión, este quemador ha sido diseñado en el grupo GASURE. En la Figura 2 se muestra un esquema del quemador utilizado.

Figura 2. Esquema del quemador utilizado en este trabajo.



El diámetro del inyector con el que se realizó todo el trabajo experimental fue de 0.75 mm. El caudal de gas es controlado por una válvula de regulación de presión y medido mediante un medidor de caudal de sello húmedo con las siguientes características: Marca Elster-Handel, rango de caudal desde 0.002 m³/h hasta 0.2 m³/h con una precisión de + 0.01 dm³, la presión máxima de trabajo es de 60 mbar medida mediante un manómetro de columna y la temperatura es medida mediante un termómetro de columna igualmente.

El quemador cuenta con un sistema de refrigeración por agua para evitar el efecto del aumento de la temperatura en el factor de aireación. La determinación de este factor de aireación se realiza tomando la lectura del porcentaje de O₂ en la premezcla utilizando un analizador Landtec diseñado para medir la concentración de biogás en rellenos sanitarios

donde se tiene una mezcla de biogás y aire. El control de la tasa de aireación primaria se realiza mediante la disminución del paso de aire en la base del quemador, en la zona de inyección del gas.

El quemador utilizado se encuentra dentro de una campana que se utiliza en la observación de la estructura de la llama con el objetivo de obtener una oscuridad plena y así poder observar más claramente la estructura de la llama. Para este fin se utiliza una cámara de alta resolución (8 megapixel) de propiedad del grupo GASURE.

La segunda etapa experimental de este trabajo se concentra en la determinación del patrón de radiación de la llama de biogás y su comparación con una llama de metano puro, que para este caso se ha tomado gas natural de La Guajira, Colombia; que tiene un 97.76 % en volumen de metano.

El montaje experimental en esta etapa es similar en gran parte al utilizado en la primera etapa, la diferencia es la utilización de un sistema de medición de radiación en lugar de la cámara con que se tomaron las imágenes en la primera etapa experimental. Con este sistema se realizó la determinación del patrón de radiación de las llamas de biogás y las de metano con las que se compararon. Este montaje se realizó en un cuarto completamente oscuro para así evitar que la lectura del radiómetro pudiera ser afectada por radiaciones provenientes del exterior o por la luz exterior.

El sistema de medición de radiación consta de un sensor de radiación o radiómetro y su respectivo indicador, los dos equipos de la marca MedTherm corp. Serie 64, donde se obtiene la lectura del flux de radiación.

El radiómetro utilizado tiene las siguientes características:

Modelo 64P-1-22

Tipo de sensor: schmidt-boelter

Salida de voltaje de 12.96 mV para 1 V/cm²

Incertidumbre de + 3%

En este montaje se tiene la posibilidad de mover el sensor en las direcciones axial y radial a la llama y así poder realizar un barrido completo del patrón de radiación.

Inicialmente se seleccionaron los puntos de operación del quemador (potencia y factor de aireación) en los cuales se tenga una correcta operación de este para biogás y metano. Esta

correcta operación del quemador se obtuvo bajo condiciones de igual potencia térmica e igual factor de aireación. Los factores de aireación (n) en los cuales se obtuvo una correcta operación del quemadores decir, combustión estable, higiénica y sin ruido para los dos gases fueron 0.56 y 0.62. Estos factores de aireación se determinaron mediante ensayo y error. La potencia térmica bajo la cual se realizó la experimentación fue de 0.4327 KW con base al PCI para ambos gases. Al conocer la potencia térmica, se conoce entonces el caudal de cada uno de los gases necesario para alcanzar esta potencia en el quemador. Las presiones de suministro de los gases necesarias para obtener el caudal determinado se obtienen mediante la siguiente relación:

$$\frac{P_{biogas}}{P_{metano}} = \left(\frac{W_{metano}}{W_{biogas}} \right)^2 \quad (1)$$

Donde:

P_{biogas} es la presión de suministro del biogás.

P_{metano} es la presión de suministro del metano.

W_{biogas} es el índice de Wobbe del biogás.

W_{metano} es el índice de Wobbe del metano.

Se obtuvieron las siguientes presiones de suministro:

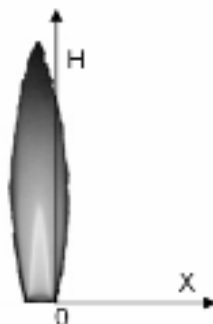
biogás: 30 mbar

Metano: 5 mbar

Conocidos los puntos de operación del quemador, se procedió a realizar en primera instancia la determinación del patrón de radiación. Para la determinación de este patrón se establece un factor de aireación y se fija, posteriormente, se ubica el radiómetro descrito anteriormente y se toman las lecturas del indicador en esta posición. Las diferentes lecturas se toman luego en diferentes posiciones axiales o de altura y radiales tomando como punto

de referencia el borde del quemador de acuerdo a la Figura 3, siguiendo la metodología de Baukal & Gebhart [7].

Figura 3. Direcciones para la medición del patrón de radiación. H: dirección axial. X: dirección radial.



2.2.- Características principales de los experimentos:

Cada uno de los experimentos realizados presenta características propias. A continuación, en la Tabla 1, se presentan las variables a medir y controlar en cada experimento. El número de réplicas de cada experimento se definió de acuerdo a la metodología propuesta por Montgomery [8].

Tabla I. Variables a medir y controlar en cada experimento.

Experimento	Variable a medir o fenómeno a observar	Variables a controlar	Numero de replicas
Estructura de llama	Altura y ángulo del cono interno.	-Factor de aireación n -Potencia térmica	3
Radiación de llama	Flu x de calor radiante	-Factor de aireación n. -Tipo de gas - Potencia térmica	3

Toda la experimentación se ha realizado teniendo en cuenta un nivel de confiabilidad de 0.95 es decir, un valor del error tipo 1 (α de 0.05).

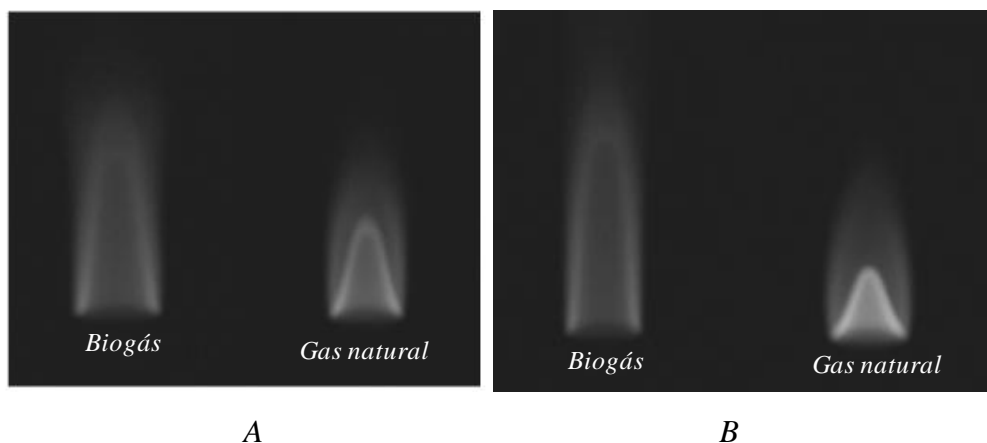
3.- Resultados y discusión

En la combustión de premezcla de biogás se tiene una llama con una estructura en la cual el cono interno o zona primaria de combustión esta muy bien definida e igualmente el frene de llama. Sin embargo, la zona secundaria de combustión o cono externo de difusión, no se aprecia muy bien, diferente a lo que se aprecia para las llamas de metano. Entre las causas de esto están las siguientes:

- La mayor concentración de dióxido de carbono en los productos de combustión que hace que la radiación de estas llamas sea aun menos luminosa que en otros hidrocarburos.
- La menor temperatura de los productos de la combustión de biogás resulta en una menor incandescencia de estos productos y por lo tanto, de esta zona de la llama.

Al comparar las estructuras de llama de biogás y metano se aprecian mucho más estas diferencias. La Figura 4 muestra las estructuras de llama de estos dos gases en el mismo punto de operación en el quemador, es decir, misma potencia y misma tasa de aireación.

Figura 4. Estructura de llama A: $n = 0.56$. B: $n=0.62$.



En las dos anteriores figuras se observa la influencia de la velocidad de deflagración laminar de los gases en sus estructuras de llama. En el biogás, al ser menor, se obtiene una estructura donde el cono interno es mucho mayor que en el metano, donde la velocidad de deflagración es mayor. Igualmente se observa, que el cono externo en la llama de biogás es

menos visible que en una llama de metano a las mismas condiciones de operación, donde la temperatura de los productos de combustión es más alta y la concentración de especies como el dióxido de carbono es menor.

Se nota también la diferencia entre los espesores del frente de llama entre los dos gases. En el biogás, este espesor es mayor que el reportado para metano [9] metano. Al observar la ecuación 1, desarrollada por medio de la teoría de Mallard & Le Chatelier [9], [10], [11] se puede establecer una relación entre la velocidad de deflagración laminar y el espesor de la zona de reacción. Observando esta relación se pueden determinar las causas de esta diferencia: La velocidad de deflagración para el biogás es casi dos veces menor que para el metano. Este efecto haría que este espesor fuera casi el doble, sin embargo, al observar el otro factor de esta ecuación, la difusividad térmica α , tiene un valor mayor en la mezcla metano-aire y esto contrarresta en parte el efecto de la velocidad de deflagración menor del biogás. El dióxido de carbono presente en mayor proporción en la mezcla biogás-aire tiene el efecto de disminuir la difusividad térmica de la mezcla.

$$\delta = \frac{2\alpha}{S_L} \quad (2)$$

Donde

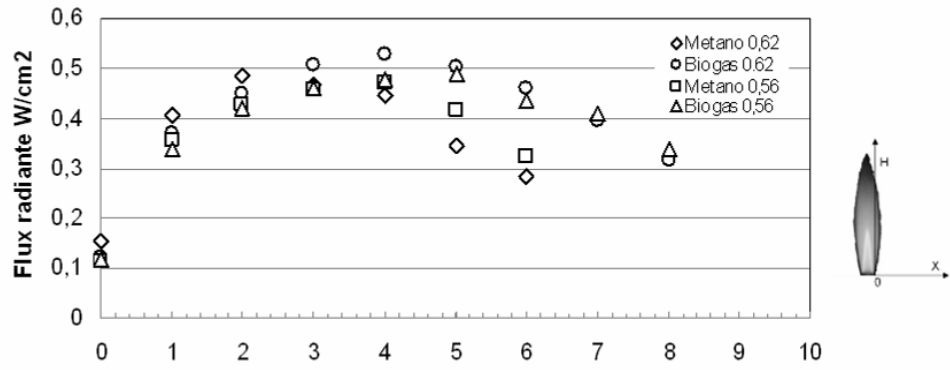
δ es el espesor de la zona de reacción o espesor de llama.

α es la difusividad térmica de la mezcla fresca gas-aire.

S_L es la velocidad de deflagración laminar del gas.

Sobre el patrón de radiación, al tener una estructura de llama con un tamaño mayor, el biogás presenta una zona de radiación de llama mayor a la del metano en lo referente a distancia a la largo del eje de la llama. El valor máximo del flux de calor por radiación medido en la llama de biogás es mayor al medido en la llama de metano. En la Figura 5 se muestran los valores de este flux a una distancia radial de cero, es decir, en el borde del quemador y a diferentes alturas.

Figura 5. Flux de calor por radiación en llamas de biogás y metano para factores de aireación primarios de 0.56 y 0.62 a una distancia radial de $X=0$.



Se observa que los valores del flux radiante son mayores para el biogás, lo cual es un resultado esperado debido a la mayor concentración de dióxido de carbono en los productos de combustión, aunque debido a la menor temperatura de estos productos en la llama de biogás, la diferencia con el metano no es tan significativa. Sin embargo, teniendo en cuenta la diferencia de tamaños de las llamas y por consiguiente de las áreas de las mismas, se puede esperar que la diferencia entre el flujo total de energía por radiación sea mayor.

A medida que la distancia axial a la llama se aumenta, la diferencia entre el flux radiante de cada llama se disminuye por la naturaleza difusa de la radiación que hace que esta se distribuya en un espacio cada vez mayor, uniformizando su valor. En las Figuras 6 y 7 se muestra esta tendencia.

Figura 6. Flux de calor por radiación en llamas de biogás y metano para factores de aireación primarios de 0.56 y 0.62 a una distancia radial de $X=2$ cm.

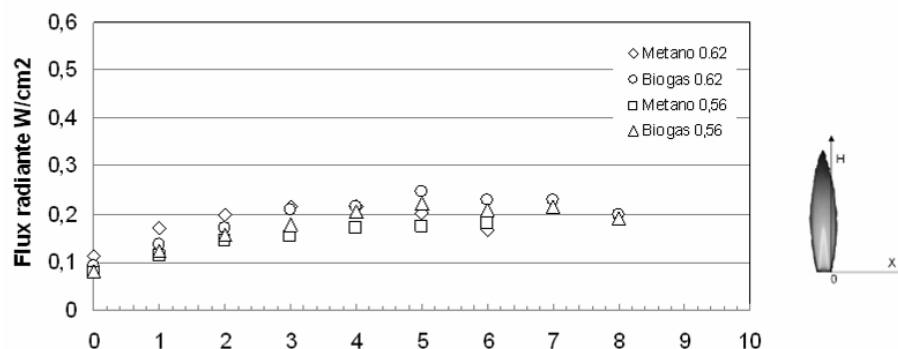
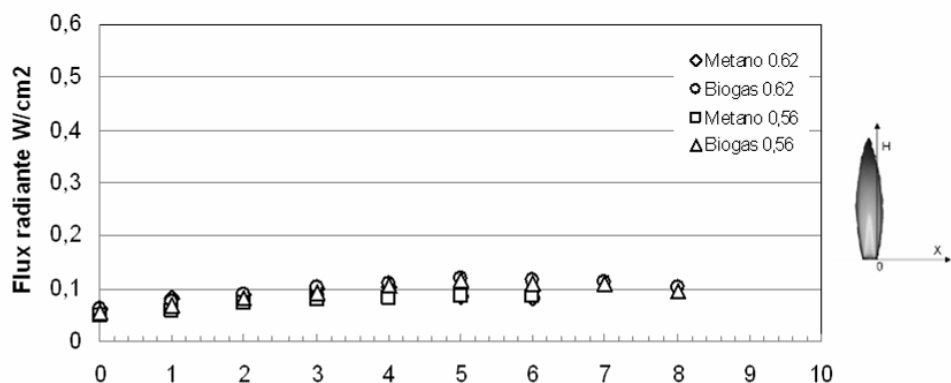


Figura 7. Flux de calor por radiación en llamas de biogás y metano para factores de aireación primarios de 0.56 y 0.62 a una distancia radial de $X=4$ cm.



En las mediciones a diferentes alturas sobre la llama, se observa que inicialmente el metano tiene un flux radiante mayor y a medida que la altura aumenta, el biogás es el que tiene un flux mayor. La diferencia en la estructura de llama entre los dos gases permite que el biogás presente valores altos de flux radiante a mayores alturas. En las Figuras 8 a 10 se muestra esta tendencia.

Figura 8. Flux de calor por radiación en llamas de biogás y metano para factores de aireación primarios de 0.56 y 0.62 a una distancia axial de $H=0$ cm.

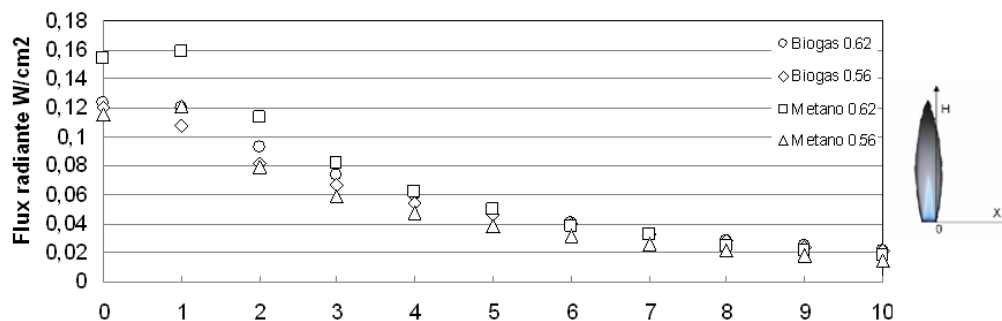


Figura 9. Flux de calor por radiación en llamas de biogás y metano para factores de aireación primarios de 0.56 y 0.62 a una distancia axial de $H=2$ cm.

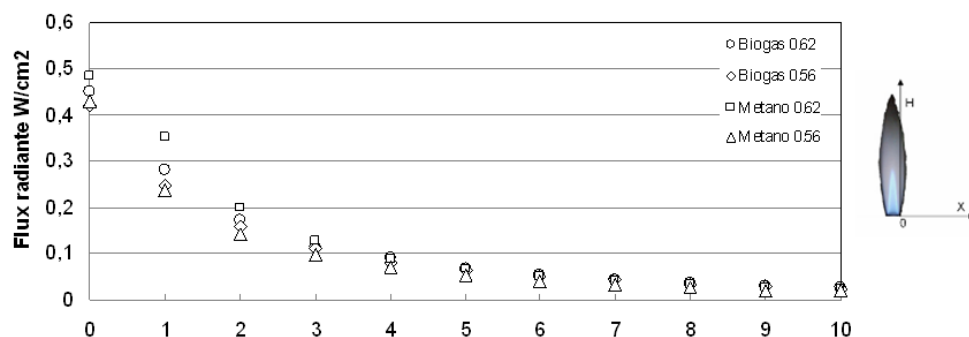
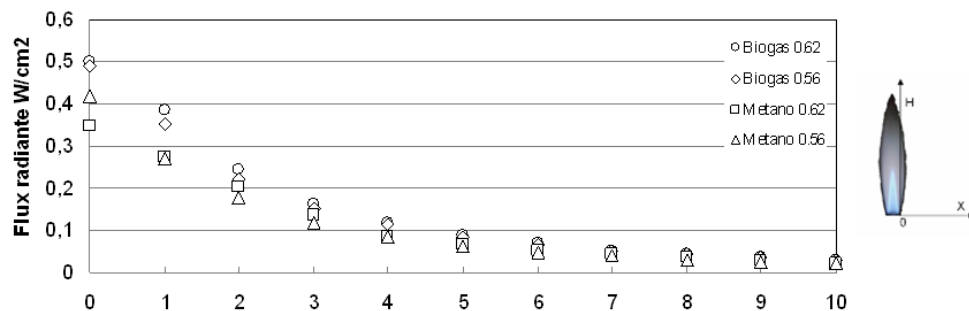


Figura 9. Flux de calor por radiación en llamas de biogás y metano para factores de aireación primarios de 0.56 y 0.62 a una distancia axial de $H=5$ cm.



4.- Conclusiones

- A igual potencia térmica y tasa de aireación, la estructura de llama de biogás presenta una geometría mayor (mayor altura del cono interno) que una llama de metano, lo que se explica por la diferencia entre la velocidad de deflagración y poderes caloríficos de estos gases. Al tener una velocidad de deflagración laminar menor, el balance de velocidades en el frente de llama se establece en una zona mas lejana del puerto.
- La zona secundaria de combustión o zona de difusión en una llama de biogás, no presenta una apariencia visible. Las menores temperaturas de la llama hacen que la incandescencia de los gases en esta zona sea menor y por lo tanto su brillo. Igualmente, la mayor concentración de dióxido de carbono presente en esta zona puede ser una de las causas por las cuales esta zona sea menos luminosa que en el metano.
- A igual potencia térmica y tasa de aireación, el flux de calor radiante de una llama de premezcla de biogás no presenta un comportamiento regular con respecto a una de metano. Es decir, en zonas próximas a la base del puerto del quemador, el metano presenta un flux mayor y en zonas alejadas de la base del puerto, el biogás tiene un flux mayor, debido a las diferencias en la estructura de llama y concentraciones de especies (CO_2 y H_2O)
- Las diferencias observadas en la estructura de llama y el patrón de radiación, por el efecto del CO_2 deben ser tenidas en cuenta a la hora del diseño de hogares de hornos o cámaras de combustión en los sistemas en los cuales el biogás sea el combustible a utilizar ya que la transferencia de calor en hornos que utilicen biogás tendrá una fenomenología diferente que en hornos que utilicen metano.

5.- Agradecimientos

Los autores agradecen al grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, GASURE, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, por el apoyo científico, tecnológico, logístico y financiero para la ejecución del proyecto: Estudio de la Combustión de Biogás en un sistemas de premezcla, del cual hacen parte los resultados que se presentan en este artículo.

6. - Referencias

- [1] M Caine. International Energy Agency. *Topic report of the IEA Bioenergy Agreement Task 24*. (2000).
- [2] Lafay Y, Cabot G., Boukhalfa A. *13th Int. Symp. On Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics*. Lisbon, Portugal. (2006).
- [3] Qin W., Egolfopoulos F.N., Tsotsis T.T. *Chem. Eng. J.* Vol. 82, 157-172. (2001).
- [4] Lee C.E., Oh C.B., Jung I.K., Park J. *Fuel*. Vol. 81, 1679-1686. (2002).
- [5] Lee C.E., Hwang C.H. *Fuel*. Vol. 86, 649-655. (2007).
- [6] Kurz P.F. *Combustion and Flame*. Vol. 1, 162-178. (1957).
- [7] C. Baukal. *Heat Transfer in Industrial Combustion*. USA. CRC Press. (2000).
- [8] Montgomery D. *Diseño y análisis de experimentos, 2 ed.* Ciudad de México. John Wiley & Sons (2003).
- [9] Turns S. *An Introduction to Combustion. 2a ed.* McGraw-Hill. USA. (2000).
- [10] Glassman I. *Combustion. 3a ed.* Academic Press. USA. pp. (1996).
- [11] Kuo K. *Principles of combustion*. Wiley-Interscience Publication. USA. (1986).