

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ESTABILIDAD DE LLAMA DE BIOGÁS EN UN SISTEMA DE PREMEZCLA

Carlos A. Díaz González, Andrés Amell Arrieta & Luís Fernando Cardona

Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía (GASURE), Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

carlosdiaz_13@yahoo.com

Recibido para evaluación: 26 de Marzo de 2008

Aceptación: 16 de Junio de 2008

Entrega de versión final: 1 de Julio de 2008

Resumen

La utilización de nuevas fuentes de energía renovables ha tenido especial interés en los últimos años buscando disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y el impacto ambiental que ellos generan. En este trabajo se estudia experimentalmente la estabilidad de llama de un biogás simulado compuesto por metano en un 60% y dióxido de carbono en un 40% en volumen, con el fin de obtener información de diseño e intercambiabilidad de gases en sistemas de combustión de premezcla que puedan operar con diferentes gases combustibles. El criterio de estabilidad utilizado ha sido el de los gradientes críticos de velocidad. Mediante la utilización de este parámetro y la metodología experimental seguida, utilizando un quemador de premezcla parcial, se ha logrado obtener la gráfica de estabilidad de llama para el Biogás estudiado. Se ha encontrado que la presencia de dióxido de carbono tiene un efecto negativo en la estabilidad de llama ya que se disminuye significativamente la velocidad de deflagración laminar y así, el rango de estabilidad en los quemadores en los cuales se utilice Biogás por la aparición del fenómeno de desprendimiento de llama.

Palabras Clave: Biogás, estabilidad de llama, gradientes críticos de velocidad, llamas de premezcla.

Abstract

Utilization of new renewable energy sources have had a special interest in last years looking for decrease the dependence of fossil fuels and the environmental impact generated for them. This work studies experimentally the flame stability of a simulated biogas with a volumetric composition of 60% methane and 40% carbon dioxide. The objective of this study is to obtain information about design and interchangeability of gases in premixed combustion systems that operate with different fuel gases. The critical velocity gradient was the stability criteria used. Utilization of this criteria and the experimental method followed, using a partial premixed burner, stability flame diagram of biogas studied had been obtained. Presence of carbon dioxide has a negative effect in flame stability, decreasing significantly the laminar flame speed and consequently, the stability range of biogas burners because of apparition of blow-off.

Keywords: Biogas, flame stability, critical velocity gradient, premixed flames.

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 (Caine, 2000).

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 (Lafay, Cabot, Boukhalfa, 2006) & (Quin, Egolfopoulos, Tsotsis, 2001). 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 (2002) donde se estudió los efectos del dióxido de carbono en la velocidad de deflagración laminar. Quin, Egolfopoulos y Tsotsis (2001) realizaron su estudio sobre los diferentes aspectos del uso del Biogás en sistemas de generación de potencia. Lee & Hwang (2007) 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 (1957) 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 la estabilidad de llama en 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. El principal objetivo de este estudio es encontrar los límites de estabilidad en cuanto a retrollama y desprendimiento de un Biogás simulado en un sistema de premezcla parcial atmosférico utilizando el criterio de los gradientes críticos de velocidad como también información para la operación o diseño de quemadores en donde se utilice este recurso.

2. ACERCA DE LA ESTABILIDAD DE LLAMA EN UN SISTEMA DE PREMEZCLA

Un sistema de combustión de premezcla es aquel en donde se realiza una mezcla previa entre el combustible y el comburente antes de presentarse la combustión en el puerto del quemador. Los quemadores de premezcla atmosféricos pueden ser de gas inductor cuando este, por su energía cinética arrastra al aire atmosférico o de aire inductor cuando el aire arrastra al gas, que generalmente se encuentra a presión nula. Se les llama atmosféricos debido a que el aire es arrastrado desde la atmósfera por el gas y también porque la combustión sucede a presión atmosférica. (Amell, Gil, Cadavid, 1999).

Cuando la mezcla de gases fluye en una dirección opuesta a la de la propagación de la combustión y con una velocidad igual a la velocidad de deflagración del gas, la onda de combustión se estabiliza en una posición con respecto al quemador. El borde del puerto del quemador juega un importante papel en la estabilización del la llama; este actúa como un destructor de radicales de propagación de la combustión y como fuente de pérdidas de energía. (Mallens, De Goey, 1997), (Kurdymov et al, 2007). Así, la llama se estabiliza en el puerto del quemador bajo ciertas condiciones de flujo.

El principio de estabilización se ilustra en la Figura 1. En la posición 1, la velocidad de deflagración S_{Uo} es menor que la velocidad del flujo por las pérdidas de calor y la destrucción de radicales, lo que hace que la onda de combustión se aleje, llegando a una posición

2, donde estas velocidades son iguales y logrando la estabilización. En la posición 3, la velocidad de deflagración es mayor a la velocidad del flujo ya que hay menos pérdidas de calor y destrucción de radicales, entonces, la onda de combustión vuelve nuevamente a la posición estable 2.

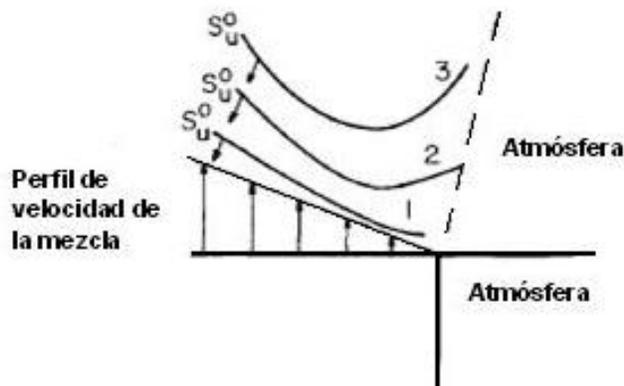


Figura 1. Principio de estabilización en un quemador bunsen. (Irvine, 1996)

Cuando el flujo se aumenta aun más, el frente de llama se aleja lo suficiente del borde del quemador para permitir la entrada de aire exterior diluyendo la mezcla, con lo que la velocidad de deflagración disminuye alcanzando el límite de desprendimiento de llama.

De la misma manera, si se reduce la velocidad del flujo, se alcanzará un punto en el cual la velocidad de deflagración será mayor a la del flujo. De esta forma, la llama se propagará hacia dentro del quemador, alcanzando el límite de retrollama. (Irvine, 1996), (Law, 2006). Adicionalmente, las condiciones ambientales influyen en la velocidad de deflagración laminar (Amell, García, Quilindo, Henao, 2004) Cuando el diámetro del tubo del quemador es lo suficientemente grande en relación a las distancias críticas de enfriamiento, (Mallens, De Goey, 1997), el perfil de velocidad del flujo se puede asumir como lineal en la cercanía de la pared. Así, se puede escribir la siguiente ecuación para la velocidad:

$$V_{mezcla} = gy \quad (1)$$

Donde y es la distancia desde la pared y g es una constante llamada gradiente de velocidad.

Si el flujo de gas es reducido, g se reduce igualmente

y la posición 2 de equilibrio de la Figura 1 se alcanza. Si se reduce más el flujo, se alcanza la condición descrita anteriormente en donde la velocidad de deflagración es mayor a la del flujo y se produce el fenómeno de retrollama y el valor crítico de g en el cual esta condición se obtiene se denomina gradiente crítico de retrollama o flashback y se denota g_F . Análogamente, cuando se tiene la condición de desprendimiento de llama, el valor crítico de g se denomina gradiente crítico de desprendimiento o blow-off y se denota g_B .

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En las Figuras 2 y 3 se muestran un esquema del quemador utilizado y el montaje experimental utilizado respectivamente para el estudio de la estabilidad de llama en este trabajo. El Biogás utilizado se ha adquirido a la empresa AGAFANO y su contenido igualmente ha sido certificado. La composición en volumen del Biogás usado es de 60% metano y 40% dióxido de carbono. A continuación se definen las principales propiedades de combustión del Biogás utilizado y en la Tabla 1 se presentan sus valores, calculadas con la aplicación de los programas de cálculos Combugás e Isogas, desarrollados por el grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la energía GASURE, de la Universidad de Antioquia.

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.

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 $\%_{CO_2}$ 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.

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.

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.

Tabla 1. Principales propiedades de combustión del Biogás utilizado.

| Propiedad | Valor | Unidades |
|--------------------------------|-------|--------------------------|
| Volumen teórico de aire | 5,712 | m^3_{aire} / m^3_{gas} |
| Volumen de humos secos | 6,715 | m^3_{hs} / m^3_{gas} |
| Volumen de humos húmedos | 5,512 | m^3_{hh} / m^3_{gas} |
| Volumen de agua | 1,2 | m^3_{agua} / m^3_{gas} |
| Volumen de dióxido de carbono | 1 | $m^3_{CO_2} / m^3_{gas}$ |
| % máximo de dióxido de carbono | 18,14 | % Vol. |
| Poder calorífico inferior | 20,35 | MJ / m^3_{gas} |
| Poder calorífico superior | 22,64 | MJ / m^3_{gas} |
| Densidad relativa | 0,94 | |
| Índice de Wobbe inferior | 20,99 | MJ / m^3_{gas} |
| Índice de Wobbe superior | 23,36 | MJ / m^3_{gas} |

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 Tabla 2 se muestran las principales dimensiones.

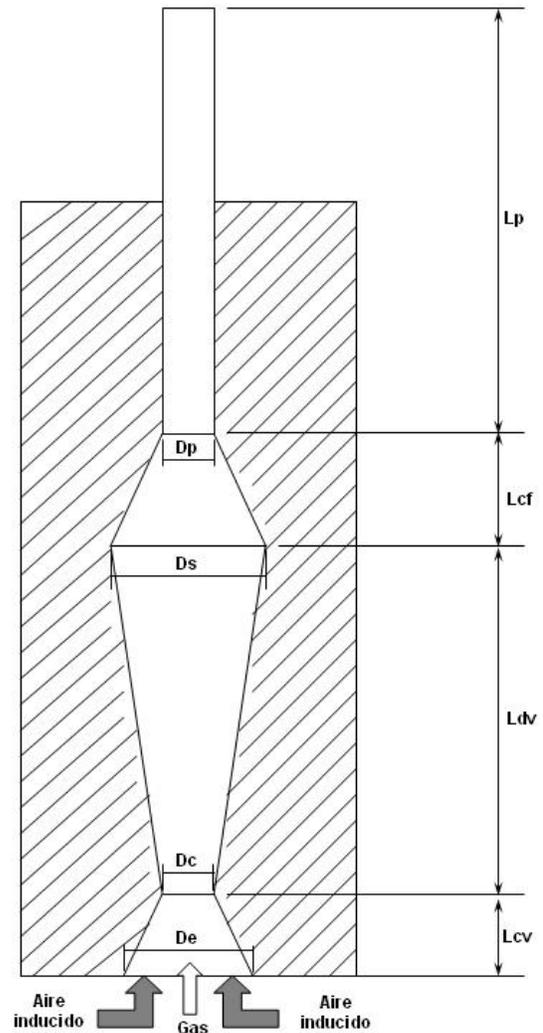


Figura 2. Esquema del quemador utilizado.

Tabla 2. Principales dimensiones del quemador utilizado.

| Dimensiones del quemador | Valor | unidades |
|---|-------|----------|
| Diámetro de entrada al venturi D_e | 33 | mm |
| Diámetro del cuello del venturi D_c | 16 | mm |
| Diámetro de salida del venturi D_s | 34 | mm |
| Diámetro del puerto D_p | 17 | mm |
| Largo de la zona convergente venturi L_{cv} | 38 | mm |
| Largo de la zona divergente venturi L_{dv} | 132 | mm |
| Largo de la zona convergente final L_{cf} | 44 | mm |
| Largo del puerto L_p | 150 | 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.

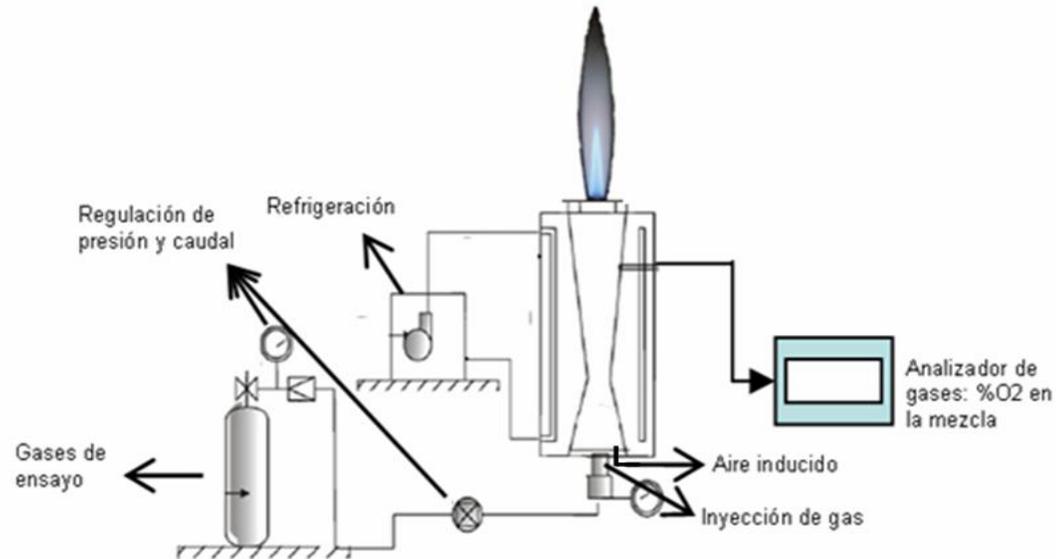


Figura 3. Esquema del montaje experimental utilizado.

El quemador cuenta con un sistema de refrigeración por agua y la determinación del factor de aireación se realiza tomando la lectura de la composición 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. Esta tasa de aireación primaria es la relación entre las cantidades de aire usado en la combustión y la cantidad estequiométrica. Amell (2002). Se denomina primaria ya que en el proceso real de combustión en un sistema de premezcla parcial, como el de este estudio, no todo el aire utilizado se suministra en la premezcla. Se determina con la siguiente formula:

$$n = \frac{y_{\text{oxígeno}}^m}{V_a (y_{\text{oxígeno}}^{\text{atm}} - y_{\text{oxígeno}}^m)} \quad (2)$$

Donde:

n : Tasa de aireación primaria, determinada experimentalmente.

$y_{\text{oxígeno}}^m$: Fracción volumétrica de oxígeno en la mezcla, determinada experimentalmente.

$y_{\text{oxígeno}}^{\text{atm}}$: Fracción volumétrica de oxígeno en el aire atmosférico.

V_a : Volumen estequiométrico de aire del gas combustible.

Para el estudio de la estabilidad de llama, se estabiliza la llama en el puerto del quemador a una tasa de aireación primaria inicial para cada presión de suministro de gas y por lo tanto, caudal de gas. Seguidamente se empieza a modificar el caudal de gas para lograr el aumento del caudal de mezcla hasta que se presenta el fenómeno de desprendimiento de la llama y su apagado. En ese punto se mide el caudal de gas y la tasa de aireación primaria. En la Figura 4 se ilustra este proceso. Mediante la correlación de Lewis & Von Elbe (1987) se logra obtener el valor del gradiente crítico de velocidad de desprendimiento de llama como:

$$g_B = \left(\frac{4}{\pi}\right) \frac{V_{desp}}{R^3} \quad (3)$$

Donde g_{desp} es el gradiente crítico de velocidad de desprendimiento de llama, V_{desp} es la velocidad promedio de la mezcla para esa condición y R es el radio del puerto del quemador que es constante en ambos casos y es de 17 mm. La ecuación para determinar la velocidad de la mezcla en el puerto del quemador es la siguiente:

$$V = \frac{Q_g (nV_a + 1)}{A_p} \quad (4)$$

Donde:

Q_g : Caudal estándar de gas combustible descargado por el inyector, el cual se determina experimentalmente.
 n : Tasa de aireación primaria, la cual se determina experimentalmente.

V_a : Volumen estequiométrico de aire del gas combustible.

A_p : Área del puerto del quemador

El estudio del fenómeno de retrollama se realiza mediante la disminución de la tasa de aireación primaria a partir de un valor donde se tiene llama estable hasta que se presenta el retroceso de la llama hacia dentro del quemador. La expresión para determinar el valor de este gradiente es la siguiente (Lewis & Von Elbe, 1987):

$$g_F = \left(\frac{4}{\pi}\right) \frac{V_{ret}}{R^3} \quad (5)$$

Donde análogamente se tiene la velocidad promedio de la mezcla para esa condición. Para cada una de las condiciones de aireación se realizaron al menos nueve observaciones y en este artículo se reporta el valor promedio obtenido.

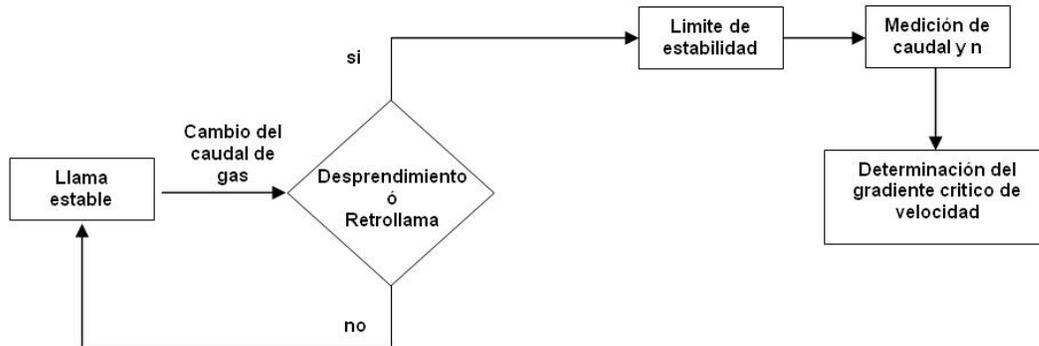


Figura 4. Diagrama del proceso de medición realizado.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este trabajo han sido obtenidos en un rango de factores de aireación desde 0.86 hasta 1.219 para la condición de retrollama y desde 0.667 hasta 1.219 para la condición de desprendimiento. El diagrama de estabilidad obtenido se muestra en la Figura 5. Se incluyen las desviaciones estándar en cada punto.

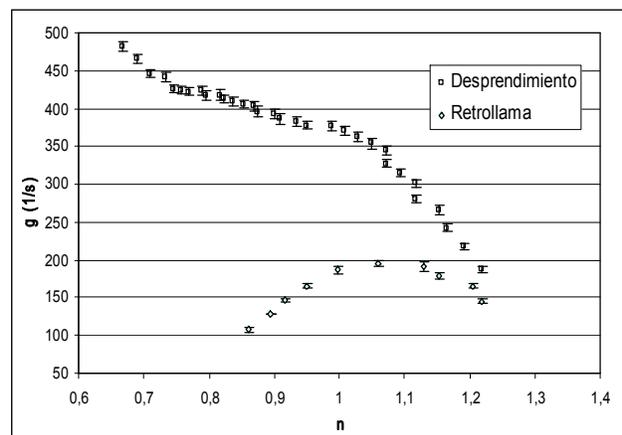


Figura 5. Diagrama de estabilidad de llama obtenido en este trabajo.

Al examinar la grafica obtenida, se observa que el comportamiento del Biogás en cuanto a estabilidad de llama, presenta una tendencia similar a la de los demás combustibles gaseosos, es decir, cerca de la mezcla estequiométrica se presenta el valor máximo para el gradiente crítico de retrollama y que a medida que la mezcla se enriquece, se aumenta el valor para el gradiente crítico de desprendimiento. Sin embargo, al comparar estos resultados con la literatura sobre este tema de gas natural como los trabajos de Mishra y Lewis & Von Elbe, se tiene que el valor máximo del gradiente crítico de retrollama se tiene en la zona de mezcla pobre mientras que para gas natural se da en la zona de mezcla rica. Aun más notoria es la diferencia en la magnitud de los valores de estos gradientes. Mientras que para gas natural los gradientes críticos de desprendimiento tienen valores mayores a 1000 s^{-1} , en Biogás, el valor de estos gradientes no llega a los 500 s^{-1} en su mayor valor. La diferencia en la zona de retrollama es más notoria.

A continuación, y con el fin de establecer una comparación entre los valores obtenidos en cada trabajo, se muestran los resultados obtenidos por Mishra (2007) para gas natural, utilizando el mismo criterio de estabilidad de este trabajo. Se observa que los valores de los gradientes críticos de velocidad en el punto de mezcla estequiométrica presentan valores mucho más grandes e igualmente un rango mayor que para el biogás. Según este autor, para gas natural el gradiente crítico para retrollama tiene un valor cercano a los 900 s^{-1} y para desprendimiento un valor cercano a los 1400 s^{-1} .

Estas diferencias se explican por la influencia del dióxido de carbono en las propiedades de combustión del metano ya que al aumentar el contenido de dióxido de carbono, se disminuye la velocidad de deflagración laminar (Qin et al, 2001) y esto hace que la velocidad promedio de la mezcla en el puerto del quemador deba ser menor.

5. CONCLUSIONES

Mediante un estudio experimental, se han obtenido los límites de estabilidad de un Biogás simulado en un quemador de premezcla tipo bunsen. Se ha mostrado que los gradientes críticos de velocidad siguen siendo un parámetro válido en la determinación de la estabilidad de llama de los combustibles gaseosos y en este caso, mediante este parámetro, se han identificado las zonas de estabilidad, retrollama y desprendimiento para el Biogás utilizado. Se ha encontrado que el comportamiento del Biogás sigue la tendencia de los combustibles gaseosos tradicionales aunque con valores muy por debajo de estos, debido a la influencia del dióxido de carbono en la disminución de la velocidad de deflagración laminar. Se muestra también que el rango de estabilidad en un quemador que trabaje con Biogás es menor que si trabaja con gas natural u otro combustible gaseoso, esto indica serios problemas de intercambiabilidad entre el Biogás y los demás combustibles gaseosos aunque los resultados de este trabajo son útiles como información para modificación o rediseño de sistemas de combustión que tengan la posibilidad de la utilización de Biogás.

Un llama de premezcla de biogás, debido a sus bajos gradientes críticos de desprendimiento, como consecuencia de su baja velocidad de deflagración debido al alto contenido de dióxido de carbono, es muy sensible a la inestabilidad por desprendimiento, especialmente en condiciones de mezcla pobre. Por lo anterior, por razones de seguridad y eficiencia energética, los quemadores de premezcla para biogás deben diseñarse con estabilización de llama.

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 sistema de premezcla, del cual hacen parte los resultados que se presentan en este artículo.

REFERENCIAS

1. Amell, A., 2002. Estimación de las propiedades de combustión de combustibles gaseosos. Universidad de Antioquia. Facultad de ingeniería. Centro de Extensión Académica CESET. Medellín. 76 P.
2. Amell, A., 2004. Influencia de la altitud sobre la velocidad de deflagración del gas natural. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. No. 32. pp. 72-81.
3. Amell, A., Gil, E. y Cadavid, F., 1999. Incidencia de factores geométricos y de flujo sobre la aireación primaria de un quemador atmosférico a gas. Energética No. 21. pp. 65-81.
4. Glassman, I., 1996. Combustion. 3a ed. USA. Academic Press. pp. 119-218.
5. <http://www.iea.org/>
6. Kurz, P.F., 1957. Some Factors Influencing Stability Limits of Bunsen Flames. Combustion and Flame. Vol. 1. pp. 162-178.
7. Law, Chung K., 2006. Combustion Physics. USA. Cambridge University Press. pp. 346-362.
8. Lewis, B. y Von Elbe, G., 1987. Combustion, Flames and Explosions of Gases. 3a ed. USA. Academic Press. pp. 215-395.
9. Lafay Y., Cabot G. y Boukhalfa A., 2006. Experimental study of biogas combustion in a gas turbine configuration. 13th Int. Symp. On Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal.
10. Lee C.E., Oh C.B., Jung I.K. y Park J., 2002. A study on the determination of burning velocities of LFG and LFG-mixed fuels. Fuel. Vol. 81. pp. 1679-1686.
11. Lee C.E. y Hwang C.H., 2007. An experimental study on the flame stability of LFG and LFG-mixed fuels. Fuel. Vol. 86. pp. 649-655.
12. M. Caine., 2000. International Energy Agency. Biogas Flares: State of the Art and Market review. Topic report of the IEA Bioenergy Agreement Task 24 - Biological conversion of municipal solid waste. 9 P.
13. Mishra D.P., 2007. Experimental studies of flame stability limits of CNG-air premixed flame. Energy Conversion and Management. Vol. 48. pp. 1208-1211.
14. Qin W., Egolfopoulos F.N. y Tsotsis T.T., 2001. Fundamental and environmental aspects of landfill gas utilization for power generation. Chem. Eng. J. Vol. 82. pp. 157-172.