

Determinación experimental de la velocidad de deflagración y altura de cono azul para gas natural de Guajira y de Cusiana

*Alejandro Fernández Martínez**, *Carlos Andrés Piza Molina** y *Gilmar Adoni Vanegas Jaramillo**

(Recibido el 9 de julio de 2001)

Resumen

En este proyecto se implementó el método de la llama cónica para la medición de la velocidad de deflagración y el método de la fotografía directa para la medición de la altura de cono azul, para los gases naturales con composición de los pozos Guajira y Cusiana. Y además, se determinó la relación existente entre ambas variables.

La información obtenida en este trabajo es fundamental, ya que proporciona un método experimental, que aplicado a condiciones reales, permite la caracterización de algunas propiedades de los gases naturales de Guajira y de Cusiana, las cuales posteriormente serán de utilidad para definir criterios de diseño e intercambiabilidad en los sistemas de combustión de uso comercial e industrial.

----- *Palabras clave:* velocidad de deflagración, altura de cono azul, llamas de premezcla.

Experimental determination of deflagration velocity and blue cone height for natural gases from Guajira and Cusiana

Abstract

In this project the conical flame method was implemented to measure deflagration rate and a direct photography method to measure the height of blue cone for natural gases with Guajira and Cusiana composition. Besides of these the existent relation among both variables was determined.

The information obtained in this work is fundamental, as long as it provides an experimental method that applied to real conditions, allows the characterization of the natural gases of Guajira and Cusiana, wich will be of utility to define criterions of desing and interchangeability in the comercial and industrial combustion systems.

-----*Key words:* deflagration rate, height of blue cone, premixed flames.

* Estudiantes Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia.
alejo1276@latinmail.com, cpiza@starmedia.com.

Introducción

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos ligeros entre los que se destaca el metano (CH_4). Tal como se extrae de los yacimientos, el gas natural es un producto incoloro e inodoro, no tóxico y más ligero que el aire [1]. Para el aprovechamiento eficiente del gas es necesario conocer sus propiedades y los fenómenos característicos de la combustión, la cual es una reacción entre el gas combustible y el gas comburente, que tiene lugar en una zona o región denominada llama [9]. La inflamación de una mezcla previa de combustible y comburente con salida de llama, que se efectúa libremente en la atmósfera y con la proporción de comburente suficiente, presenta tres regiones importantes: una primera región de reacción primaria, donde el comburente incorporado previamente reacciona con el combustible, y se forman la mayoría de los compuestos intermedios. La segunda región se caracteriza, porque en ésta se produce la combustión primaria dentro de un frente de llama de color azulado de muy pocos milímetros de espesor [5]. La tercera región es un penacho en el que se da la combustión secundaria, donde el CO es oxidado a CO_2 con el aire atmosférico como comburente, también se da una recombinación de los radicales libres. En esta última región la concentración de las especies presentes se aproxima a las condiciones de equilibrio térmico [4]. Si la sección a la salida de la boquilla es circular la zona donde se efectúa la combustión primaria prácticamente toma la forma de un cono. En general, el cono interno tiene color azul, de ahí su nombre de cono azul, debido a la presencia de radicales OH. Pero en mezclas con poco aire la tonalidad es verde [9].

La altura de cono azul depende de varios factores: el diámetro y la forma del orificio quemador, la naturaleza del gas, la velocidad de deflagración, la tasa de aireación primaria y la temperatura [8].

La definición de velocidad de deflagración relaciona el modelo unidimensional y da una indicación de la tasa de propagación del frente de llama en una llama laminar de premezcla. En este contexto la velocidad de deflagración puede ser defi-

nida como la velocidad de un plano normal frontal al mismo y relativo a los reactivos no quemados; en otras palabras, la rapidez con que se transmite la combustión desde la zona quemada a la zona no quemada. La velocidad de deflagración así definida es una característica invariable de una mezcla combustible dada. Esta es independiente de la geometría de la llama, el tamaño del quemador y la tasa de flujo; y depende solamente de la temperatura inicial, la presión y la composición de la mezcla de gas natural, la velocidad de deflagración es importante además en la estabilización de llamas, y en el modelo de propagación de llama [8].

El objetivo general de este trabajo es evaluar la velocidad de deflagración (implementando el método de la llama cónica), la altura de cono azul (implementando el método de la fotografía directa); y determinar la relación existente entre la variación del cono azul y la velocidad de deflagración en llamas estables de premezcla.

1. Consideraciones teóricas

1.1 Velocidad de llama

La velocidad de llama es la velocidad lineal a la cual viaja la llama a través de una mezcla gas y aire estática. Esta velocidad es una variable importante en el diseño de un quemador. Si la velocidad de la mezcla gas-aire en el quemador es menor que la velocidad de llama, esta última se propagará de vuelta hacia el interior del quemador, esto es, habrá un retroceso momentáneo de la llama hacia adentro del quemador (retrollama). Por otra parte, si el gas que sale del quemador lo hace a una velocidad muy por encima de la velocidad de la llama, ésta se apagará (desprendimiento).

La velocidad del frente de llama puede descomponerse en dos: velocidad de deflagración y velocidad del combustible. La velocidad de llama es aquella con la cual el frente de llama se mueve desde el combustible quemado al combustible sin quemar, se mide en dirección normal a la superficie del frente de llama (véase figura 1). En otras palabras, si el flujo de masa del combustible pu-

diera ser detenido, entonces la velocidad de transformación, sería la velocidad real de avance de la llama en el combustible sin quemar.

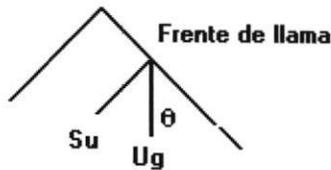


Figura 1 Vectores de velocidad en una llama de premezcla

Donde:

Su : Velocidad de deflagración.

Ug : Velocidad de la mezcla no quemada.

La velocidad a la cual un combustible sin quemar se aproxima a la zona de combustión se llama velocidad del combustible. La velocidad del frente de llama es el vector suma de las velocidades del combustible y de la llama. En el caso de una llama estacionaria, la velocidad del frente es cero.

1.2 Efectos de las variables químicas y físicas sobre la velocidad de deflagración

1.2.1 Variables químicas

1.2.1.1 Efecto de la relación combustible comburente. La variación de la velocidad de deflagración de llama laminar con la relación combustible comburente está gobernada primordialmente por la variación de la temperatura. Para los hidrocarburos el pico de la velocidad de llama se alcanza en mezclas estequiométricas o ligeramente enriquecidas con combustible. Generalmente se acepta que una mezcla con temperatura máxima de llama es también una mezcla con máxima velocidad de llama. En mezclas muy pobres o muy ricas, es imposible propagar una llama, debido a que existe muy poco combustible u oxidante para mantener una onda de deflagración estable [1]. Para explicar la incidencia del contenido de oxígeno en el aire sobre la velocidad de deflagración, trabajos franceses expresan que [5]:

$$Su = Su_0 \left(14,4 \times \frac{O_2}{O_2 + N_2} - 2 \right)$$

Donde:

Su_0 : Velocidad de deflagración cuando el comburente es aire.

O_2 y N_2 : Porcentaje de oxígeno y nitrógeno, presentes en otro comburente.

1.2.1.2 Efecto de la estructura molecular. Se ha determinado que a medida que el peso molecular aumenta, el rango de inflamabilidad disminuye; se ha encontrado también que el número de grupos metil sustituidos y la estructura molecular del combustible tiene fuerte influencia sobre la velocidad de llama. Algunos estudios han concluido que la variación en la velocidad de llama con respecto a las sustituciones se debe más a la temperatura de llama que a la estructura molecular. Las diferencias en la velocidad de llama de diferentes combustibles con diferente número de átomos de carbono se debe principalmente a los cambios en la difusividad térmica, la cual es una función del peso molecular del combustible [1].

1.2.2 Variables físicas

1.2.2.1 Efecto de la presión. Los estudios realizados han encontrado una poderosa ley que relaciona la velocidad de llama con la presión. La velocidad de llama es directamente proporcional a la presión elevada a un exponente n . Cuando la velocidad es menor de 50 cm/s, el n es usualmente negativo, implicando que la velocidad aumenta con la disminución en la presión. Para velocidades entre 50 y 100 cm/s la velocidad es independiente de la presión, y cuando la velocidad es mayor de 100 cm/s la velocidad aumenta al aumentar la presión [1].

1.2.2.2 Efecto de la temperatura inicial. Los estudios han concluido que la velocidad es directamente proporcional a la temperatura elevada a un exponente m , donde m varía entre 1,5 y 2. El incremento de la velocidad con la temperatura inicial se debe principalmente al efecto de

precalentamiento [1]. Un incremento de la temperatura inicial de la mezcla aumenta la velocidad de deflagración. La relación entre la velocidad de deflagración y la temperatura inicial de la premezcla esta dada por la fórmula empírica [5]:

$$Su_{(T_0 K)} = Su_{(298 K)} \times (T_0 / 298)^{1.74} \quad (\text{Para } T \text{ 20 a } 40 \text{ } ^\circ\text{C})$$

Donde:

$Su_{(298 K)}$: Velocidad de deflagración a 298 K.

T_0 : Temperatura absoluta de la mezcla.

1.2.2.3 Efecto de la temperatura de llama. El efecto de la temperatura de llama sobre la velocidad de deflagración es muy marcado; la magnitud de la velocidad de deflagración es determinada esencialmente por el valor de la temperatura de llama [8]. A altas temperaturas de llama las reacciones de disociación se favorecen, estas reacciones pueden introducir numerosos radicales libres hacia la llama, y estos actúan como propagadores de cadena para promover la reacción y por tanto la propagación de la llama [1].

1.2.2.4 Efecto de la difusividad térmica. La velocidad de deflagración en mezclas enriquecidas con helio es mayor que en mezclas enriquecidas con argón. Esto, debido al hecho que la difusividad térmica del helio es mucho mayor que la del argón, porque el peso molecular del helio es mucho más pequeño, de esto se puede decir, que en mezclas con igual temperatura de llama, la mezcla con mayor difusividad térmica tendrá mayor velocidad de deflagración [8].

1.3 Método de llama cónica

Muchos de los intentos iniciales para deducir la velocidad de deflagración a partir de mediciones sobre llamas cónicas se basaron en mediciones del área del cono de llama A_f , utilizando la ecuación: $Su = Vu/A_f$.

Donde:

Vu : Tasa de flujo volumétrico de la mezcla no quemada.

A_f : Área de cono de llama.

Su : Velocidad de deflagración.

El área del cono de la llama se puede obtener asumiéndola como un cono geométrico real y midiendo su altura o más acertadamente por una integración gráfica de fotografía.

La medición del área del cono sufre de dos grandes desventajas, la primera: el método produce un valor promedio sobre el cono total, incluyendo la base perturbada y los extremos, esto puede reducirse al usar quemadores grandes, pero el número de Reynolds usualmente limita esta solución. La segunda desventaja es más seria y depende de a qué plano de la llama deberá medirse A_f .

En la definición de velocidad de deflagración se relaciona el gas no quemado, con la superficie de referencia, que debería estar en el punto del primer aumento de temperatura perceptible. Las dificultades desaparecen si en lugar de medir el área de la llama se mide el ángulo del cono, entonces la velocidad de deflagración se puede determinar por:

$$Su = U_g \text{ Sen } \theta$$

Donde:

U_g : Velocidad axial del gas no quemado.

Su : Velocidad de deflagración.

θ : Ángulo entre el eje del quemador y el frente de llama.

Otra de las dificultades, que se origina en la aplicación de este método de ángulo de cono; es la determinación precisa de U_g .

1.4 Método de la fotografía directa

Una fotografía de una llama de premezcla muestra la formación de un cono que se divide en dos partes, la parte exterior correspondiente al cono visible, y la parte interior correspondiente al cono "schlierin" (mezcla no quemada). Estas fotografías indican claramente que hay una región cóni-

ca luminosa dentro de la cual la reacción y el calor liberado están tomando lugar. Inmediatamente debajo del cono luminoso, la mezcla no quemada es calentada hasta la temperatura crítica dando comienzo a rápidas reacciones químicas. Al implementar el método de la fotografía directa, para la medición del cono azul en llama de premezcla, primero se debe determinar la superficie en el quemador a partir del cual se tomarán las medidas (posición inicial del frente de llama). La parte luminosa de la llama es fotografiada, y corresponde a la zona de reacción en dirección a la mezcla no quemada (cono superior) [8].

2. Procedimiento experimental

2.1 Parte experimental

Para cumplir con los objetivos planteados en la investigación se realizaron dos conjuntos de pruebas, que buscan determinar experimentalmente la velocidad de deflagración y la altura de cono azul, para los gases naturales de composición Guajira y Cusiana, provistos por Transmetano y Agafano respectivamente (tabla 1). En cada conjunto de pruebas se tomaron datos de flujo de gas, tasa de aireación, presión de suministro, temperatura y presión ambiental, se fotografió el frente de llama y se midió la altura y el ángulo de cono azul. El sistema de experimentación en que se realizaron las pruebas consiste de un quemador tipo unipuerto, con un codo fijo que permite cambiar las cabezas, que son tubos cilíndricos de diferente diámetro, con una altura que equivale a 20 veces su diámetro, esto con el fin de garantizar un flujo en régimen laminar ($Reynolds < 2300$), y así obtener llamas cónicas. En el desarrollo de la experimentación se trabajó a presiones de suministro de 5, 10 y 15 mbar utilizando cuatro diámetros diferentes de cabeza de quemador.

Un sistema de aire a presión constituido por un dispositivo que se ubica en una cámara anterior al venturi que se encarga de suministrar el aire que viene del compresor a través de un conjunto

Tabla 1 Composición del gas natural*

<i>Compuesto</i>	<i>% en gas Guajira</i>	<i>% en gas Cusiana</i>
Metano	97,76	76,55
Etano	0,38	10,86
Propano	0,20	5,36
I-butano	0,00	0,68
N-butano	0,00	0,78
I-pentano	0,00	0,13
N-pentano	0,00	0,08
Hexano	0,00	0,05
Heptano	0,00	0,00
Nitrógeno	1,29	0,44
Dióxido de carbono	0,37	5,07
Agua	0,00	0,00

* Proveedor gas Guajira, Transmetano. Proveedor gas Cusiana, Agafano (certificado) y presenta mayor contenido de CO₂ que el gas real.

Tabla 2 Descripción de las cabezas del quemador

<i>Parámetros geométricos</i>	<i>Tubo 1</i>	<i>Tubo 2</i>	<i>Tubo 3</i>	<i>Tubo 4</i>
Φ puerto (mm)	7,30	8,95	12,95	16,6
Longitud (cm)	25,00	25,00	25,00	25,00
No. de puertos	1,00	1,00	1,00	1,00

de mangueras situadas alrededor del inyector, permite variar el flujo de aire para obtener las distintas tasas de aireación necesarias para la experimentación. Además, la cámara junto con el venturi permiten una buena homogeneización de la mezcla aire gas.

2.2 Equipo e instrumentos de medición empleados

- Cilindros de composición Cusiana y Guajira.
- Medidor de flujo de gas natural tipo hilo caliente. Mide el flujo volumétrico de gas natural para determinar la velocidad del gas no quemado.

- Analizador de gases de infrarrojo del tipo no dispersivo (NDIR) "MULTOR 610". Este equipo fue utilizado para medir la concentración de metano y oxígeno en la premezcla, necesarios para la determinación de la tasa de aireación.
- Compresor de aire. Usado en el sistema para inyectar el aire necesario para variar la tasa de aireación.
- Rotámetro para aire P/N 60920. Para determinar el flujo de aire suministrado a la premezcla.
- Cámara digital Panasonic PVL-850. Para tomar fotografías digitales de cada corrida experimental.
- Programa digital Photoshop. Usado para capturar las fotografías en el PC.
- Programa Corel Draw 8. Para medir los ángulos y altura de cada llama.
- Quemador atmosférico de premezcla, unipuerto (véase anexo 2).
- Cuatro cabezas para quemador unipuerto de diámetro diferente.

3. Resultados y discusión

3.1 Efecto de la tasa de aireación sobre la velocidad de deflagración a diferente presión de suministro, para cada cabeza de quemador utilizada (tubo)

Al observar las figuras 2, 3 y 4 para gas natural de Guajira y Cusiana, se puede decir: las curvas tienen todas las mismas tendencias, al aumentar la tasa de aireación aumenta la velocidad de deflagración hasta un límite superior, donde tiende a ser constante y luego a una disminución de la velocidad. En este estudio se encontró que la velocidad de deflagración varía entre 5,8 cm/s a una tasa de aireación de 0,5790 y 37,89 cm/s a una aireación de 0,982 para gas natural de Guajira, y entre 3,93 cm/s a una aireación de 0,4960 y 33,19 cm/s a una tasa de aireación de 0,9070 para gas natural de Cusiana. Al comparar las ve-

locidades de deflagración para ambos gases a una misma tasa de aireación y presión de suministro, en el gas natural de Guajira se observa una tendencia a la mayor velocidad de deflagración y a ser constante o a disminuir muy lentamente a altas aireaciones, mientras que en el gas natural de Cusiana se observa una tendencia a ser menor la velocidad y a disminuir ésta bruscamente con el aumento de la tasa de aireación primaria. También se observa que la tendencia de las curvas n vs S_u es la misma, confirmando que el diámetro de la cabeza del quemador no influye en la velocidad. Las variaciones en la forma o rangos de crecimiento de la velocidad con la aireación a diferentes presiones de suministro, son limitadas y dadas por las características del quemador, se encontró, como en el caso del tubo 3, que presentó mayor flexibilidad permitiendo operar en rangos amplios de aireación. La no uniformidad de las curvas se debe a que la flexibilidad del quemador se ve afectada por los cambios en la potencia, lo que origina la inestabilidad de llama y limita el rango de operación de aquel para obtener datos experimentales.

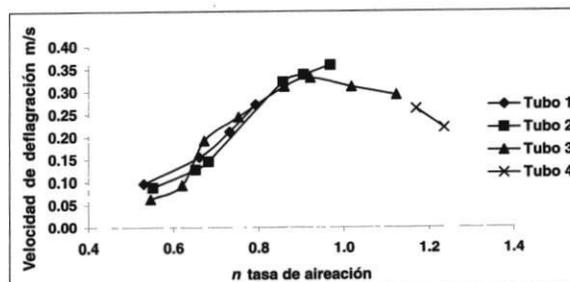


Figura 2 Variación de la velocidad de deflagración con la tasa de aireación a $P_s = 5$ mb. Para gas natural de Guajira

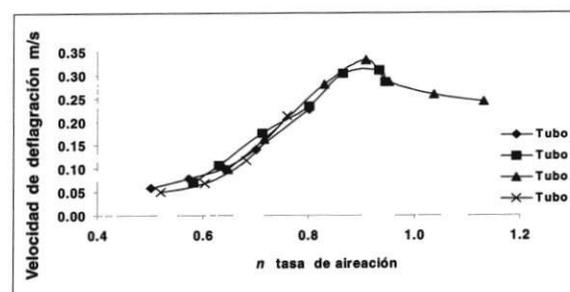


Figura 3 Variación de la velocidad de deflagración con la tasa de aireación a $P_s = 5$ mb. Para gas natural de Cusiana

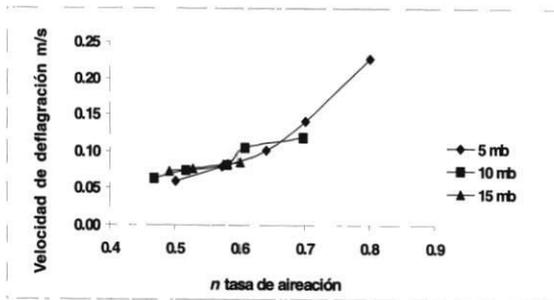


Figura 4 Variación de la velocidad de deflagración con la tasa de aireación para tubo 1, a Ps = 5, 10, 15 mb. Para gas natural de Cusiana

3.2 Efecto del porcentaje en volumen de metano sobre la velocidad de deflagración a diferente presión y quemador utilizado (tubo)

Al observar las figuras 5 y 6 para gas natural de Guajira y de Cusiana se determinó que: las curvas conservan todas una misma tendencia, a concentraciones bajas de CH_4 se alcanzaron velocidades de deflagración moderadas, y al aumentar la concentración se alcanza un punto máximo en la velocidad de deflagración, cercano al punto estequiométrico donde se presenta combustión completa. Para el gas natural de Guajira la máxima velocidad de deflagración es de 37,89 cm/s a una concentración en volumen de metano de 9,54% y una tasa de aireación de 0,982 y para el gas natural de Cusiana se obtuvo una velocidad de deflagración máxima de 33,19 cm/s a una concentración en volumen de metano de 8,27% y una tasa de aireación de 0,9070. De los resultados se observó que la velocidad de deflagración para un mismo porcentaje en volumen de metano es mayor para el gas natural de Guajira. Esto puede explicarse porque, a diferencia de otras propiedades de combustión, la velocidad de deflagración para mezclas no se puede derivar en forma simple de las velocidades de los constituyentes combustibles gaseosos puros, cuanto mayor es el número de átomos de carbono en la cadena, menor es la velocidad de deflagración laminar, pero el efecto de la estructura molecular para hidrocarburos saturados como metano, propano, butano, pentano y hexano es poco notable

y prácticamente independiente del número de átomos de carbono en la molécula. Además se sabe que la composición del combustible afecta la temperatura adiabática de llama, la energía de activación y los coeficientes de difusión máscicos y térmicos. Hay que tener en cuenta que cuando la temperatura adiabática de llama aumenta, también aumenta la concentración de radicales libres (aumenta la disociación), lo cual por una parte, incrementa el valor de los coeficientes de difusión, y por otra, induce el desencadenamiento de nuevas reacciones, lo que por su parte también contribuye en aumentar la velocidad de deflagración. La temperatura adiabática de llama de un determinado proceso de combustión depende de la fracción molar de oxígeno que tiene el oxidante en la reacción. Ésta tiene gran influencia sobre la velocidad de deflagración como se dijo anteriormente; por esto se nota que las velocidades de los gases varían en un amplio rango. La velocidad de deflagración del gas natural de Cusiana se ve afectada por la presencia del dióxido de carbono (CO_2), especie de gran difusividad, insensible a la temperatura adiabática de llama, debido a que la mayor movilidad de esta molécula provoca uniformidad de temperatura y de especies que minimizan el efecto de cualquier aumento de la temperatura adiabática de llama, además la presencia de especies inertes como el N_2 y el CO_2 que están presentes en la mezcla combustible inicial, rebajan la velocidad de deflagración, al robar calor a los productos de combustión y no dejan alcanzar la temperatura adiabática de llama [8].

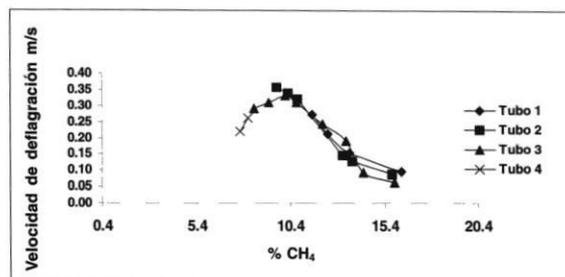


Figura 5 Variación de la velocidad de deflagración con el porcentaje en volumen de metano a Ps = 5 mb. Para gas natural de Guajira

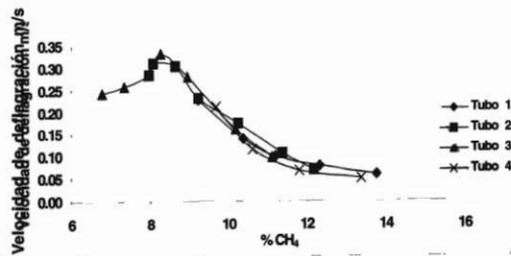


Figura 6 Variación de la velocidad de deflagración con el porcentaje en volumen de metano a Ps = 5 mb. Para gas natural de Cusiana

3.3 Relación entre el ángulo de cono azul y la velocidad de deflagración a diferente presión de suministro, para cada cabeza de quemador utilizada (tubo)

Al observar las figuras 7 y 8 para gas natural de Guajira y de Cusiana, se puede decir que: las curvas obtenidas tienen la misma tendencia, lo cual indica que la velocidad de deflagración es proporcional al ángulo, a medida que aumenta el ángulo aumenta la velocidad de deflagración y viceversa, con un máximo cercano a la composición estequiométrica. Esto puede ser observado en el comportamiento de las curvas en los tubos 2 y 3.

Es importante señalar que los valores más desviados de la velocidad de deflagración se presentan en los límites de la estabilidad de la llama, debido que cuando la aireación es muy poca las llamas presentan mucha inestabilidad en la forma del cono y a altas tasas de aireación la llama presenta mucha oscilación, que hace que los ángulos sean más difíciles de determinar.

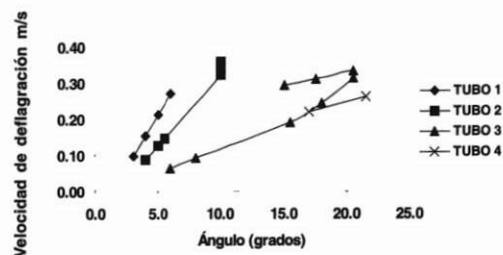


Figura 7 Relación entre la velocidad de deflagración y el ángulo de cono azul a Ps = 5 mb. Para gas natural de Guajira

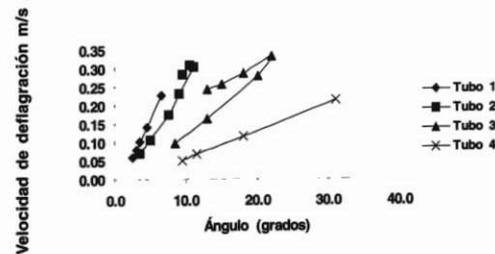


Figura 8 Relación entre la velocidad de deflagración y el ángulo de cono azul a Ps = 5 mb. Para natural de Cusiana

3.4. Efecto de la tasa de aireación sobre la altura de cono azul a diferente presión de suministro, para cada cabeza de quemador utilizada (tubo)

Al observar las figuras 9 y 10 para gas natural de Guajira y de Cusiana se determinó que: al aumentar la tasa de aireación disminuye la altura de cono azul, para una presión de suministro dada, a menor diámetro de tubo (cabeza de quemador) se obtienen mayores alturas de cono azul, y a mayor presión de suministro para un tubo dado se obtiene mayor altura de cono. Para el gas natural de Guajira se obtuvo máxima altura de 12,9 cm con el tubo 1 a Ps 15 mb y altura mínima de 1,72 cm con el tubo 3 a Ps 5 mb, mientras que el tubo 4 no permitió mucha flexibilidad en la experimentación; y la altura cercana al punto estequiométrico es de 3,24 cm con el tubo 3 a Ps 15 mb. Para el gas natural de Cusiana se obtuvo máxima altura de 10,51 cm con el tubo 1 a una Ps de 15 mb y altura mínima de 1,38 cm con el tubo 4 a Ps de 5 mb, y la altura cercana al punto estequiométrico es de 1,51 cm con el tubo 3 a Ps 5 mb. Estos resultados son consistentes con el concepto teórico de altura de llama, la que depende de factores tales como diámetro de orificio, composición del gas y tasa de aireación.

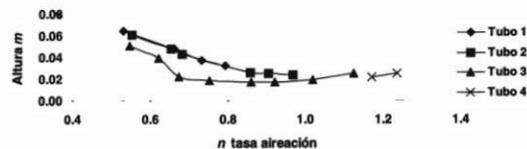


Figura 9 Relación entre la altura de cono azul y la tasa de aireación a Ps = 5 mb. Para gas natural de Guajira

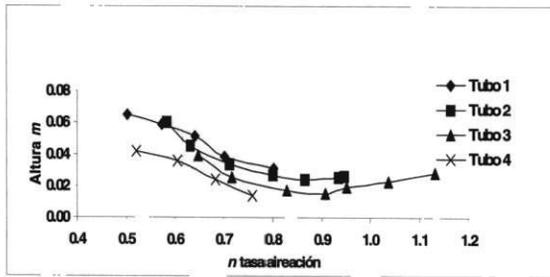


Figura 10 Relación entre la altura de cono azul y la tasa de aireación a Ps = 5 mb. Para gas natural de Cusiana

3.5 Efecto de la velocidad de deflagración sobre la altura de cono azul a diferente presión de suministro, para cada cabeza de quemador utilizada (tubo)

Al observar las figuras 11 y 12 para gas natural de Guajira y de Cusiana, se determinó que: las figuras tienen todas la misma tendencia, claramente se puede observar que el diámetro no influye en la variación de la velocidad de deflagración, corroborando lo expuesto anteriormente. Además se observa que la altura se ve afectada por el diámetro de la cabeza del quemador, al disminuir el diámetro se incrementa la altura y viceversa. De los resultados obtenidos experimentalmente también se puede encontrar que hasta el punto estequiométrico:

- Si la tasa de aireación aumenta, la velocidad de deflagración aumenta.
- Si la tasa de aireación aumenta, disminuye la altura de cono azul.
- Si la velocidad de deflagración aumenta, disminuye la altura de cono azul.

Mientras que por encima del punto estequiométrico se tiene que:

- Si la tasa de aireación aumenta, la velocidad de deflagración tiende a disminuir.
- Si la tasa de aireación aumenta, la altura de cono azul tiende a aumentar.
- Si la velocidad de deflagración disminuye, la altura del cono tiende a aumentar.

Esto se puede explicar a partir de la siguiente expresión:

$$h = \frac{Q_g}{\pi r} \cdot \frac{(1 + nV_a)}{Su_{(n)}}$$

Donde:

h = Altura de cono azul.

n = Tasa de aireación.

r = Radio de la boquilla.

Q_g = Caudal del gas.

V_a = Volumen del aire teórico.

De los resultados experimentales se sabe que cuando n tiende a 1, Su aumenta, y la altura disminuye. Basándonos en la expresión anterior esto puede explicarse a partir de que el aumento de Su es mayor que el de n , hasta el punto estequiométrico donde se lleva a cabo la combustión completa, y Su se hace máximo. Cuando n es mayor que 1, Su comienza a disminuir (debido a que se presenta combustión incompleta, enfriamiento de los productos por el exceso de aire), produciendo aumento en la altura de cono azul debido a que la disminución en Su es mayor que el aumento de n . De todo esto podemos decir que la velocidad de deflagración tiene mayor efecto sobre la altura de cono azul que la tasa de aireación. Una llama de baja velocidad de deflagración se caracteriza por ser larga y se estrecha, entre tanto una llama con alta velocidad de deflagración es corta y ancha.

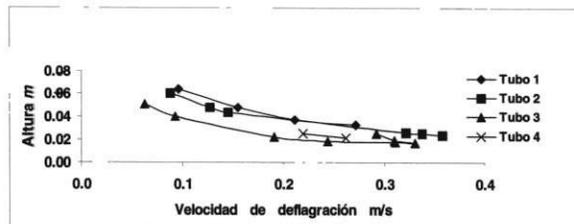


Figura 11 Variación de la altura de cono azul con la velocidad de deflagración a Ps = 5 mb. Para gas natural de Guajira

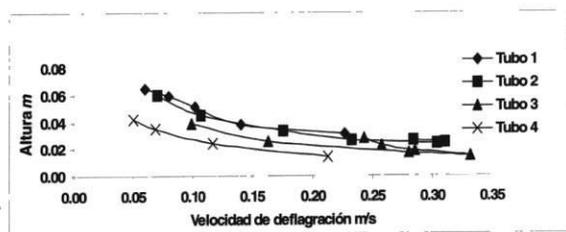


Figura 12 Variación de la altura de cono azul con la velocidad de deflagración a. $P_s = 5$ mb. Para gas natural de Cusiana

Conclusiones

- Si bien los experimentos fueron realizados bajo condiciones de estudio de laboratorio, los resultados obtenidos de velocidad de deflagración y la altura de cono azul son aceptablemente coherentes de acuerdo con las técnicas utilizadas, las imprecisiones obtenidas son inherentes de los métodos cónicos.
- Se puede concluir que la velocidad de deflagración es independiente del diámetro de la cabeza del quemador mientras que la altura de cono azul es dependiente de éste. Pero a su vez se determinó que la velocidad de deflagración está relacionada con la altura, dado que al aumentar la velocidad de deflagración disminuye la altura del cono azul para llamas de premezcla aire-gas natural en régimen laminar.
- A condiciones idénticas de presión de suministro (flujo de combustible) y de aireación se puede concluir que la velocidad de deflagración para gas de Guajira es mayor que para gas natural de Cusiana. Esto se debe principalmente a la presencia de compuestos inertes en el gas de Cusiana, como el CO_2 , que inhiben la combustión y no permiten alcanzar las temperaturas de llama adiabática que afectan directamente la velocidad de deflagración.
- Expresando los resultados en el estado de referencia estándar se encuentra que la máxima velocidad de deflagración obtenida para Guajira que posee un porcentaje en volumen de metano de 97,76%, es de 37,84 cm/s, y la velocidad de deflagración máxima obtenida para

gas de Cusiana que posee un porcentaje en volumen de metano de 77% es de 33,19 cm/s. Estos resultados comparados con los obtenidos en la literatura francesa [5] que reportan que para un gas de 100% en metano, la velocidad de deflagración a iguales condiciones de presión y temperatura es de 35 cm/s, muestran que el método utilizado está acorde con la realidad.

- La velocidad de deflagración máxima alcanzada para mezclas gaseosas va decreciendo al disminuir el contenido de metano en ellas, y por el aumento de componentes inertes de ésta.
- De los resultados experimentales obtenidos se confirmó que:
 - Al aumentar la tasa de aireación, aumenta la velocidad de deflagración hasta un máximo cercano al punto estequiométrico donde la velocidad es máxima, y empieza a decrecer.
 - Al aumentar la tasa de aireación disminuye la altura de cono azul, para una presión de suministro dada hasta un punto cercano al estequiométrico.
 - Por encima del punto estequiométrico al aumentar la tasa de aireación se presenta una tendencia de disminuir la velocidad de deflagración y a aumentar la altura de cono azul.
 - Al aumentar el ángulo de cono, se tiene mayor velocidad de deflagración.
 - Al aumentar la altura de cono disminuye el ángulo de cono azul.
 - A mayor diámetro de cabeza de quemador se forman mayores ángulos.
 - La altura se ve afectada por el diámetro de la cabeza del quemador, al disminuir el diámetro se incrementa la altura y viceversa.
 - La velocidad de deflagración tiene mayor efecto sobre la altura de cono azul que la tasa de aireación.

Agradecimientos

El proyecto se realizó gracias al apoyo financiero del Comité para el Desarrollo de la Investigación (Codi) y al apoyo logístico del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía.

Referencias bibliográficas

1. Amell, A. *et al.* *Tecnología de la Combustión de Gases y Quemadores Atmosféricos de Premezcla*. Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas. Universidad de Antioquia, 1994.
2. Amell, A. *et al.* "Herramientas para el uso eficiente del gas: Diagramas de Combustión". *Revista Facultad de Ingeniería*. No 15. Medellín.
3. Amell, A. *et al.* "Características de la Combustión de los gases colombianos". *Revista Facultad de Ingeniería*. Vol. 8. Noviembre de 1996, Medellín.
4. Association Technique Combustible Gaseux et Principes de la combustion. A.G.A. "Principles of Secondary Aeriation of Atmospheric Gas Burners". *Research Bulletin* No. 84, 1960. France.
5. Association Technique De L industrie Du Gaz en France (ATG). "Combustibles Gaseux et Principes de la Combustion". BT No. 104, Edition 1992. Gaz de France, Paris.
6. Bechtel, J. H. *et al.* "Atmospheric Pressure Premixed Hydrocarbon-Air Flames: Theory and Experiment". *Combustion and Flame*. Vol. 42. pp. 197-213, 1981.
7. Edmondson, Heap and Pritchard, R. "Ambient atmosphere effect in flat-flame Measurements of Burning Velocity". *Combustion and Flame*. Vol. 14, 1970.
8. *Glassman Combustion*. Academic Press. New York, 1977. Charter 4- 5.
9. Márquez, M. *Combustión y Quemadores*. Serie Prodúctica. Marcombo S.A. Barcelona, Espada, 1992.
10. www.ecopetrol.com.co.