

Influencia de la altitud sobre la velocidad de deflagración del gas natural

*Andrés Amell Arrieta**, *Jorge Mario García Posada***, *Arvey Quilindo Valencia**** y *Diego Alberto Henao Vallejo*****

(Recibido el 10 de febrero de 2004. Aceptado el 23 de octubre de 2004)

Resumen

Por la creciente utilización del gas natural en ciudades de América Latina situadas a grandes altitudes, es necesario estudiar de qué manera la altitud afecta algunos fenómenos de combustión. Uno de los parámetros que se afecta es la velocidad de deflagración.

En este trabajo se estudia experimentalmente el comportamiento de la velocidad de deflagración con la altitud, para lo cual se realizaron ensayos en sitios con altitudes de 40, 550, 1.550, 2.040 y 2.550 m, encontrándose que las variaciones son leves.

----- *Palabras clave:* grandes altitudes, velocidad de deflagración, quemadores atmosféricos.

Influence of the altitude on the burning velocity of the natural gas

Abstract

By the increasing use of natural gas in cities of Latin America located to high altitude, is necessary to study the effect of the altitude on the combustion, for example the burning velocity.

This work is an experimental study of as it changes to the burning velocity with the altitude, being made test in sites with altitude of 40, 550, 1.020, 1.550, 2.040 and 2.550 meters. The result was that the variations are slight.

----- *Key words:* high altitude, burning velocity, atmospheric burner.

* Ingeniero mecánico. Ms.C. en Economía de la Energía. Coordinador del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. anamell@udea.edu.co.

** Estudiante de Ingeniería Mecánica. Integrante del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. jmgp076@hotmail.com.

*** Ingeniero mecánico. Integrante del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

**** Ingeniero mecánico. Integrante del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Antecedentes

Por razones económicas y ambientales el gas natural comienza a tener una participación importante en ciudades latinoamericanas, situadas a grandes altitudes: La Paz (3.632 msnm), Bogotá (2.600 msnm), Ciudad de México (2.240 msnm), Manizales (2.216 msnm), Medellín (1.550 msnm), Cali (995 msnm) y otros. Por su bajo costo y facilidad de operación, los quemadores atmosféricos con llamas de premezcla parcial se están utilizando en el sector residencial y comercial como sistemas de combustión.

Debido a que el gas natural históricamente se ha venido utilizando en el mundo en regiones ubicadas a baja altitud o próximas al nivel del mar, exceptuando algunas ciudades de Estados Unidos [1], los estudios acerca de la incidencia de la altitud sobre los parámetros característicos de una llama de premezcla no abundan en la literatura.

La importancia de estudiar el efecto de la altitud sobre los parámetros característicos de una llama de premezcla es que permite definir criterios apropiados para el diseño, normalización y estudio de intercambiabilidad de gases para regiones situadas a grandes altitudes. Uno de los parámetros que tiene una fuerte incidencia sobre la estructura y estabilidad de una llama de premezcla es la velocidad de deflagración.

Los análisis teóricos [2, 3] a partir del modelo de propagación de llama por efectos térmicos muestran que la velocidad de deflagración tiene una dependencia con la presión del orden de $P^{-0.5}$; sin embargo, para presiones menores que 1 atm y que resultan comparables a las presiones atmosféricas de lugares situados a grandes altitudes, la literatura registra un comportamiento diferente, proponiendo algunos trabajos una dependencia de la forma $P^{-0.11}$ para mezcla rica de metano aire y atmósfera isotérmica [2, 4, 6].

Debido a que la velocidad de deflagración de una mezcla hidrocarburo-aire depende en general de la presión donde se realiza la combustión y de la

temperatura de la premezcla, y en sistemas de combustión atmosférica estos parámetros son dependientes de la altura sobre el nivel del mar, en este trabajo se examina experimentalmente si existen variaciones significativas de la velocidad de deflagración con la altitud, para lo cual se realizaron ensayos a 40, 550, 1.020, 1.550, 2.040, 2.550 msnm.

Consideraciones teóricas

Estructura de una llama de premezcla

Una llama de premezcla está constituida por una zona primaria de combustión en el frente de llama y una zona secundaria de combustión generada por la difusión del oxígeno de los alrededores, el cual reacciona con los elementos combustibles que salen del frente de llama. En la figura 1 se muestra esquemáticamente la estructura de una llama de premezcla parcial.

Acerca de la velocidad de deflagración

La velocidad de deflagración es una propiedad de combustión que caracteriza a toda mezcla de combustible y aire, se define como la rapidez con que se transmite la combustión desde la zona quemada hasta la zona no quemada. En cada punto del frente de llama la combustión se transmite perpendicularmente, estableciéndose un campo de velocidad de deflagración distribuido a lo largo del frente de llama. En la figura 2 se presenta el comportamiento de la velocidad de deflagración con respecto a la distancia al eje de la llama, como puede observarse en la zona próxima al puerto su magnitud es muy baja, existe un largo trayecto en que permanece constante y en la parte superior es muy alta [6]. Cuando en la literatura se registra la velocidad de una mezcla hidrocarburo-aire, se realiza como un valor promedio de la distribución descrita. Para los parámetros en la figura 2 se definen los siguientes términos:

V_f : velocidad de deflagración promedio.

v_0 : velocidad de deflagración en la zona en que esta es constante.

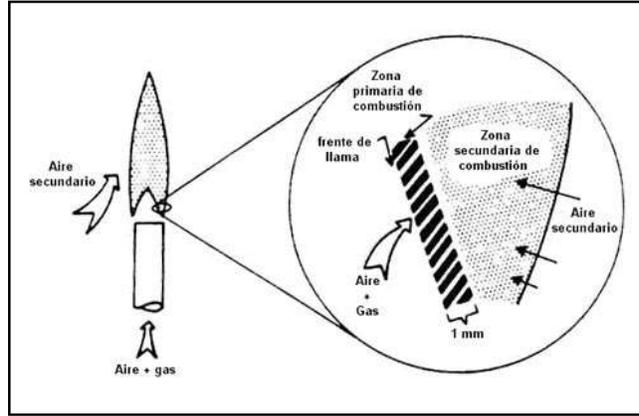


Figura 1 Estructura de una llama de mezcla parcial

v_f : velocidad local de deflagración en un punto determinado del frente de llama.

V : velocidad de un hilo de corriente de la mezcla.

α : ángulo entre la velocidad de deflagración y la velocidad de la corriente.

R : radio del puerto donde se desarrolla la llama.

h : altura de cono azul.

Los factores que afectan la velocidad de deflagración son los siguientes:

- La naturaleza del combustible.
- El régimen de la mezcla, en régimen turbulento se hace mayor.
- El factor de aireación, para hidrocarburos tiende a ser máxima próximo al valor estequiométrico.
- La temperatura de la mezcla, aumentando cuando esta aumenta [8]:

$$V_f = V_{f0} \times \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.74} \quad (1)$$

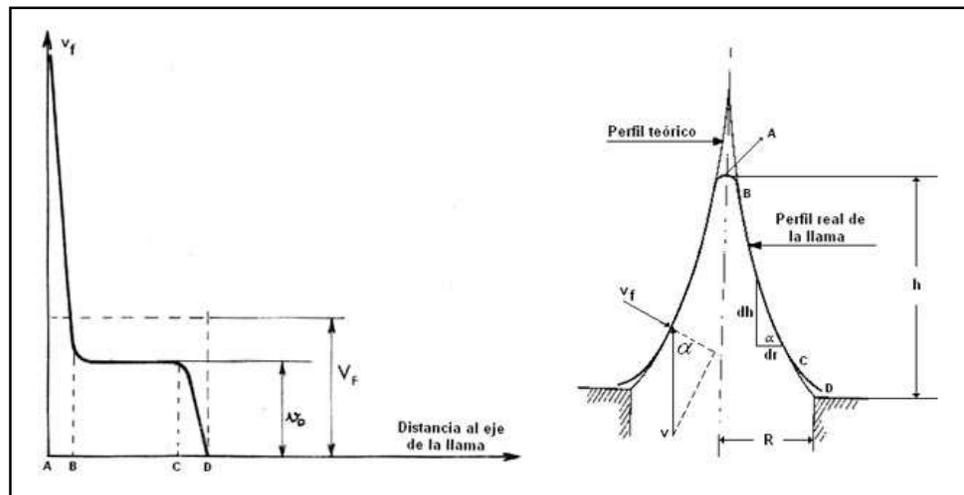


Figura 2 Distribución de la velocidad de deflagración a lo largo del frente de llama [7]

Donde:

V_f : velocidad de deflagración una temperatura T .

V_{f0} : velocidad de deflagración a una temperatura T_0 .

- La presencia de diluyentes como el agua, los inertes CO_2 y N_2 , disminuyendo cuando en su orden se incrementan en la premezcla los porcentajes de H_2O , CO_2 y N_2 [9, 10].
- Para mezclas metano-aire a presiones mayores que 1 atm, la velocidad de deflagración tiene una dependencia con la presión del orden de $P^{-0.5}$ [2, 3]; sin embargo, para presiones menores que 1 atm y que resultan comparables a las presiones atmosféricas de lugares situados a grandes altitudes, la literatura registra un comportamiento diferente; algunos trabajos proponen una dependencia de la forma $P^{-0.11}$ para mezcla rica de metano aire y atmósfera isotérmica [2, 4, 5, 6].

La presión a la que se encuentra la zona de combustión y la temperatura de la premezcla dependen de la altitud del sitio donde se desarrolle la llama, por lo anterior habrá de esperarse una dependencia entre la velocidad de deflagración y la altitud. Esta dependencia se refleja, por un lado, con el aumento de la velocidad de deflagración cuando la presión atmosférica se disminuye, por otro lado, la disminución con la temperatura cuando esta se reduce, esto es, cuando la altitud se incrementa.

Relación entre la velocidad de deflagración, tasa de aireación, altura del cono azul y potencia térmica en una llama de premezcla parcial

Si se asume que en todo punto del frente de llama, de acuerdo con la ley de Gouy, existe equilibrio entre la velocidad local de deflagración y la componente perpendicular de la velocidad de la corriente de premezcla (véase figura 2) se establece:

$$V_f = V_m \times \cos \alpha \quad (2)$$

Donde

v_f : velocidad local de deflagración en un punto determinado del frente de llama (cm/s).

v_m : velocidad de un hilo de corriente de la premezcla (cm/s).

α : ángulo entre la velocidad de deflagración y la velocidad de la corriente.

En la figura 2 se observa que:

$$dh = \tan \alpha \cdot dr \quad (3)$$

$$\tan \alpha = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1} \quad (4)$$

$$dh = \sqrt{\frac{v_m^2}{v_f^2} - 1} \cdot dr \quad (5)$$

Donde

dh : elemento diferencial de la altura de cono azul.

dr : elemento diferencial del radio donde se desarrolla la llama.

Teniendo en cuenta la ecuación (5), se pueden considerar dos situaciones:

Si se desprecian las variaciones de la velocidad de la premezcla en la sección del tubo y la velocidad de deflagración se supone constante en todo el frente de llama.

Si la velocidad de deflagración se asume constante en todo el frente de llama y la velocidad del flujo varía de acuerdo con la ley de Poiseuille para régimen laminar, esto es:

$$v_m = \cdot 2V_m \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (6)$$

Donde

V_m : velocidad media de la premezcla, igual a (cm/s).

R : Radio del puerto de área (cm²).

Q_m : Caudal de la premezcla, igual a (cm^3/s).

Q_g : caudal del gas descargado por el inyector (cm^3/s).

Q_a : Caudal de aire primario inducido por el gas (cm^3/s).

Para la primera situación, teniendo en cuenta las ecuaciones (2) y (3) se obtiene la siguiente expresión para la altura del cono azul:

$$h = \frac{Q_g \cdot (n \cdot V_A + 1)}{\sqrt{\pi \cdot A_p \cdot V_f}} \quad (7)$$

Donde

V_A : volumen estequiométrico de aire del gas utilizado.

n : tasa de aireación primaria.

Para la segunda situación se obtiene:

$$\int_{h_0}^h dh = \int_{R_0}^R \sqrt{4 \frac{Vm^2}{V_f^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)} - 1 \cdot dr \quad (8)$$

Método experimental

Método de estimación de la velocidad de deflagración

En cada sitio de ensayo se midieron experimentalmente la altura del cono azul, la tasa de aireación primaria y el caudal de gas descargado por el orificio. Como se conocía la composición química del gas de ensayo, la cual se mantiene constante, se determinó el volumen estequiométrico de aire.

Con la información anterior se estimó la velocidad de deflagración en cada altitud con la expresión:

$$V_f = \frac{Q_g \cdot (n \cdot V_A + 1)}{\sqrt{\pi \cdot A_p \cdot h}} \quad (9)$$

Equipos

En la figura 3 se presenta el montaje experimental implementado. El quemador de ensayo

(véase figura 4) es atmosférico de aire inducido, con un diámetro del inyector de 1,15 mm y un diámetro de puerto de 17 mm, longitud del tramo divergente 170 mm, donde el gas combustible se descarga a 20 mbar. El mezclador se refrigeró por un circuito de agua para evitar su calentamiento y así eliminar el efecto sobre la variación de la tasa de aireación primaria.

La tasa de aireación primaria en cada ensayo se monitoreó al conocer la composición de metano en la premezcla aire-gas, lo cual se realiza mediante un analizador de gases infrarrojo marca Maihak-Multor 620.

Para evitar la interferencia de la luz de los alrededores en la captura de imágenes, la zona de combustión se encerró con una caja rectangular de acrílico de 30 x 30 x 50 cm y un orificio de 22.5 cm de diámetro situado en la parte superior para la evacuación de los gases de combustión, las paredes fueron forradas con cartulina negra.

Las imágenes del cono azul fueron capturadas a través de una cámara digital de registro de imágenes marca Pixera, las cuales eran almacenadas, para posteriormente por intermedio del *software* Matrox Inspector de tratamiento de imágenes, determinar la altura del cono azul de cada ensayo a las diferentes altitudes.

El caudal de gas se midió por medio de un medidor de sello húmedo marca Elster ($Q_{\text{máx}} = 0,2 \text{ m}^3/\text{h}$ y $Q_{\text{mín}} = 0,002 \text{ m}^3/\text{h}$). El medidor tiene incorporado un termómetro para medir la temperatura del gas y un manómetro de columna para medir la presión de suministro.

Las condiciones atmosféricas temperatura, presión atmosférica y humedad relativa, se monitorearon con una estación meteorológica marca Multilog.

Sitios de ensayo

Los ensayos fueron representativos del piso térmico colombiano. En la tabla 1 se presentan la altitud, presión atmosférica, temperatura y humedad relativa promedio en el momento en que fueron realizados los ensayos.

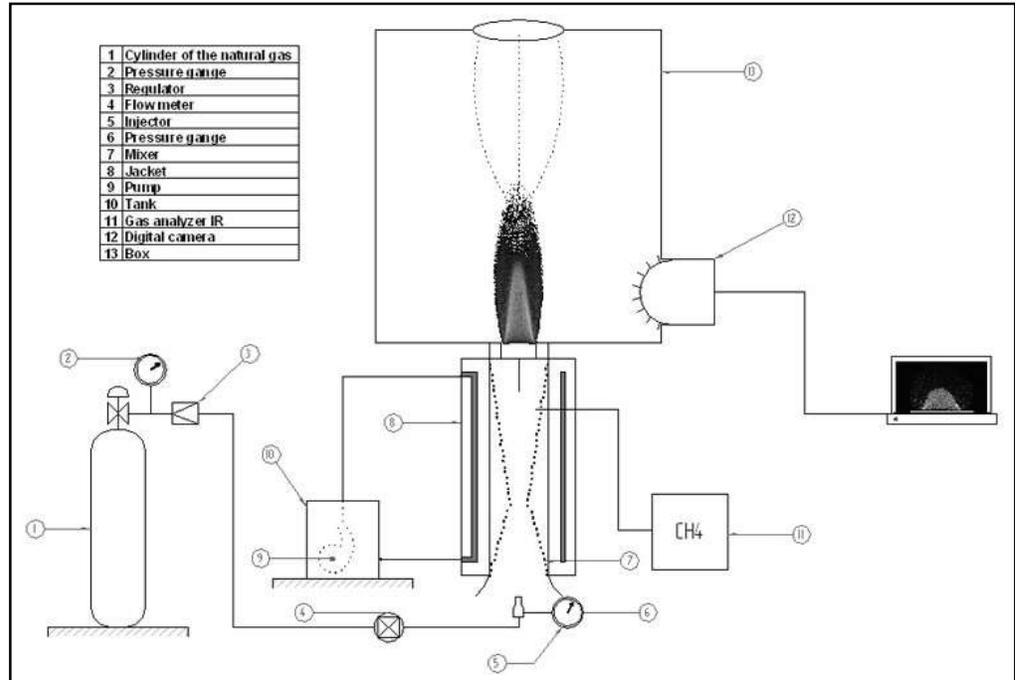


Figura 3 Representación esquemática del montaje experimental

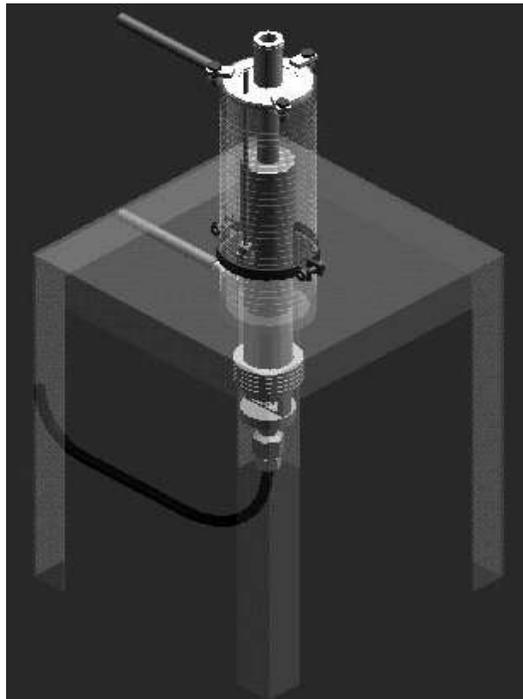


Figura 4 Quemador de ensayos

Como puede observarse el piso térmico colombiano no presenta una atmósfera isotérmica. La humedad relativa registrada es alta y presenta diferencias significativas entre los diferentes sitios. Estas variables son variables no controlables, pudiendo generar efectos térmicos y cinético-químicos en la combustión con incidencia en la estructura de llama.

Procedimiento de ensayos

En cada sitio de ensayos se realizan tres réplicas, manteniendo constante las siguientes variables:

- Composición química del gas, utilizando un gas natural con un contenido de metano de 97%, de N₂ de 1,39% y de CO₂ de 0,37%.
- La presión de descarga del gas en el inyector a 20 mbar.
- El diámetro del inyector en 1,15 mm, la geometría del mezclador y el diámetro del puerto en 17 mm.

Tabla 1 Altitud, presión atmosférica, temperatura y humedad relativa promedio

Nombre	Altitud (m)	Presión atmosférica (bar)	Temperatura (°C)	Humedad relativa
Caucasia	40	997	28,03 ± 0,45	81,63 ± 1,85
Puerto Valdivia	550	948	28,67 ± 0,76	66,53 ± 1,65
Cisneros	1.020	895	24,97 ± 0,06	52,23 ± 0,32
Medellín	1.550	852	23,77 ± 0,80	59,27 ± 6,44
Yarumal (Candelaria)	2.040	789	22,63 ± 0,71	75,73 ± 0,46
Santa Rosa de Osos	2.550	744	17,17 ± 0,58	66,17 ± 6,36

El procedimiento que se realizó fue el siguiente:

- Una vez se pone a punto el montaje experimental, se inicia el suministro de gas y se enciende el quemador. Transcurridos 10 min desde cuando se alcanza el equilibrio térmico, se introduce la sonda en el mezclador para determinar la composición de metano en la premezcla con el analizador IR, monitoreando así la tasa de aireación primaria.
- Terminada la medición anterior se inicia la captura de imágenes de la estructura de llama por medio de la cámara de registro digital Pixera, para almacenarla y posteriormente realizarle el respectivo tratamiento de imágenes con el *software* de tratamiento Matrox Inspector, lo cual permite obtener la altura del cono azul. En cada réplica se programa el registro de tres imágenes, por lo que en cada

sitio de ensayo se obtienen 9 mediciones para el análisis estadístico, el cual se realiza con la ayuda del *software* Statgraphics versión 4.0.

- Finalizado el registro digital de imágenes se mide el caudal de gas descargado por medio del medidor de sello húmedo.

Resultados y análisis de resultados

Resultados

En la tabla 2 se presentan los valores promedio de la altura del cono azul, tasa de aireación primaria, caudal del gas y velocidad de deflagración con sus respectivas desviaciones estándar o errores propagados.

En la figura 5 se presenta la variación de la presión atmosférica con la altura en los diferentes

Tabla 2 Valores promedio de altura de cono azul, tasa de aireación, caudal de gas y velocidad de deflagración para cada altura evaluada

Altura	Altura de cono azul (cm)	Tasa de aireación	Caudal de gas (cm³/s)	Vel. de deflag. (cm/s)
Caucasia (40 msnm)	8.776 ± 0,060	0,816 ± 0,0076	71,89 ± 0,070	26,69 ± 0,29
P. Valdivia (550 msnm)	9.013 ± 0,226	0,804 ± 0,0190	72,62 ± 0,030	25,92 ± 0,85
Cisneros (1.020 msnm)	9.240 ± 0,066	0,788 ± 0,0043	74,72 ± 0,052	25,54 ± 0,22
Medellín (1.550 msnm)	9.477 ± 0,114	0,756 ± 0,0120	75,96 ± 0,030	24,42 ± 0,46
Yarumal (2.040 msnm)	9.801 ± 0,081	0,793 ± 0,0030	80,36 ± 0,061	26,04 ± 0,23
Santa Rosa de Osos (2.550 msnm)	9.962 ± 0,097	0,813 ± 0,0042	81,59 ± 0,060	26,61 ± 0,29

sitios de ensayo. Como puede observarse en el rango de altitudes considerada, la presión atmosférica experimenta variaciones importantes.

En la figura 6 se presenta la variación de la temperatura ambiente con la altitud en los diferentes sitios de ensayo. Para una altitud determinada se registran las temperaturas obtenidas en cada réplica. Se observan variaciones importantes de la temperatura a medida que la altura se incrementa, y se obtiene una diferencia de temperatura de 11 °C entre 40 y 2.550 msnm. Conviene aclarar que estos valores de temperatura son válidos para la hora en que se realizaron los ensayos en cada sitio.

Comportamiento de la velocidad de deflagración con la altitud

Para determinar el comportamiento de la velocidad de deflagración con la altura, se realiza un análisis de varianza (ANOVA) entre la velocidad de deflagración (cm/s) como variable dependiente y la altura sobre el nivel del mar (msnm) en cada sitio de ensayo como factor de estudio, con los niveles descritos en el numeral *sitios de ensayo*.

En la figura 7 se grafican los valores medios de velocidad de deflagración con sus respectivos intervalos de confianza, para las altitudes evaluadas. Como puede observarse, entre 40 y 1.550 msnm se presenta una tendencia a una leve disminución. A partir de 1.550 msnm la velocidad de deflagración se incrementa, también de manera muy leve. No obstante estas tendencias, el

análisis de varianza nos presenta los siguientes resultados estadísticos:

- El valor P de la prueba de significancia es de 0,151, lo cual nos informa con un 95% de confiabilidad que no existen variaciones estadísticamente significativas de la velocidad de deflagración con la altitud, para el rango de alturas estudiadas y de temperaturas registradas.
- La verificación de los residuos nos presenta una distribución normal.
- Al realizar la prueba por comparaciones múltiples o grupos homogéneos, el resultado con la prueba LSD, son dos grupos homogéneos, uno formado por las altitudes 40, 550, 1.020, 1.550 y 2.040 msnm y otro grupo homogéneo solo con la altura de 2.550 msnm, teniéndose entonces que la velocidad de deflagración a 2.550 msnm su variación estadística es significativa con respecto a las otras alturas.

El no tener una temperatura ambiente igual o con variaciones no despreciables en las diferentes altitudes, explica el comportamiento irregular de la dependencia de la velocidad de deflagración con la altitud. Hasta la altitud de 1.550 msnm, si la atmósfera hubiese sido isotérmica, la velocidad de deflagración debería incrementarse, el efecto de disminución de la temperatura sobre la velocidad de deflagración pareciera que atenúa el efecto de la presión atmosférica. La diferencia significativa observada entre la velocidad de de-

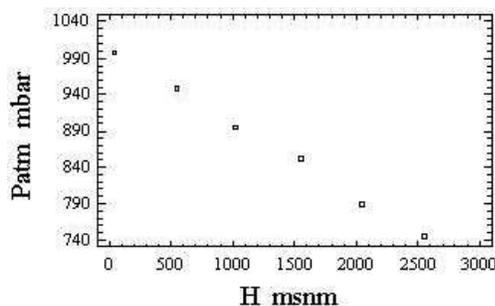


Figura 5 Variación de la presión atmosférica (mbar) con la altitud (msnm)

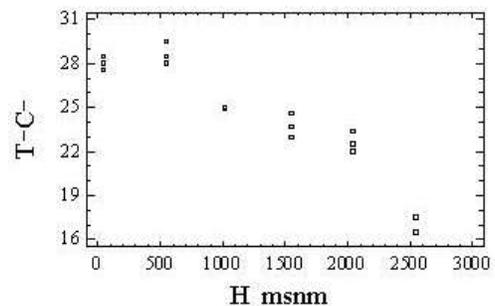


Figura 6 Variación de la temperatura ambiente (°C) con la altitud (msnm)

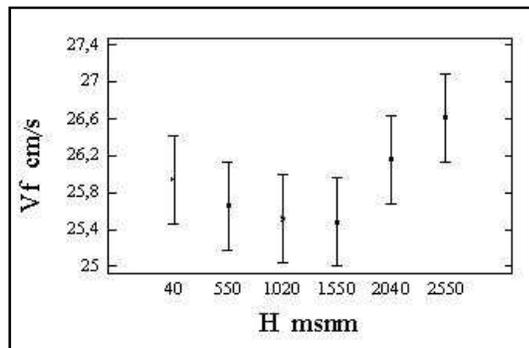


Figura 7 Valores medios e intervalos de confianza de la velocidad de deflagración para cada altura evaluada

flagración a 2.550 msnm y las otras altitudes, se explica porque prevalece el efecto de la presión atmosférica sobre el de la temperatura.

Conclusiones

- Para una mezcla rica de gas natural y aire (factor de aireación = 0,79), conservando la composición química del gas (97% metano, 1,39% N₂ y 0,37% CO₂) y régimen laminar de la premezcla, se encontró que la velocidad de deflagración varía levemente con la altitud, por lo que no se presentan variaciones estadísticamente significativas. Ello se explica porque la presión atmosférica y temperatura ambiente, tienen efectos contrarios sobre ella. Por un lado, al disminuirse la presión atmosférica, la velocidad de deflagración aumenta, pero al disminuirse la temperatura, la velocidad de deflagración se disminuye.
- Si bien no existe una variación estadísticamente significativa de la velocidad de deflagración con la altura en el rango en el que se realizaron los ensayos, el comportamiento presenta una tendencia irregular, disminuye hasta 1.550 msnm y a partir de esta altitud se incrementa.
- El registro digital y procesamiento de imágenes, es una técnica confiable y precisa para medir experimentalmente parámetros característicos en una llama de premezcla,

como la velocidad de deflagración utilizando el método del quemador con registro del perfil de la llama.

Agradecimientos

Los autores de este proyecto expresan sus más sinceros agradecimientos al Comité para el Desarrollo de la Investigación de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Antioquia, que con recursos de la modalidad Codi menor cuantía financió este proyecto. También agradece al Centro de Investigaciones Ambientales de la Facultad de Ingeniería por su apoyo logístico y administrativo. Agradecen también al profesor de la Facultad de Ingeniería Juan Delgado Lastra por sus orientaciones metodológicas en el análisis estadístico.

Referencias

1. American Gas Association. "Effect of altitude on gas appliance performance". En: *Report N.º 1004-A*. Cleveland. February, 1944.
2. Andrews, G. y Bradley, D. *Combustion and Flame* 20. 1973. pp. 77-89.
3. Bartok, W. y Sarotin, A. *Fossil Fuel Combustion*. John Wiley. 1991. p. 866.
4. Tsatsaronis, G. "On the effect of pressure in methane-air flame". *German Chemical Engineering*. N.º 2. 1979. p. 86-94.
5. Diedrichsen, J. y Wolfbald, H. "The burning velocity of methane flame at high pressure". En: *Transaction Faraday Society*. N.º 52. 1956. pp. 1102-1109.
6. Bradley, D. y Hundy, G. F. "Burning velocities of methane-air mixtures using hot-wire anemometers in closed-vessel explosions". En: *13 Symp (INT) on combustion*. 1971. pp. 575-583.
7. Lewis, B. and Vol Elbe, G. *Combustion, flame and explosions of gases*. New York y Londres. Academic Press Inc. 1961.
8. Perthuis, Edmond. *La combustion industrielle*. Editions Technip. Paris. 1983.
9. France, D. H. y Pritchard, R. "Burning velocity measurements of multicomponent fuel gas mixtures". En: *Gas Wearne International*. Vol. 26. N.º 12. 1977. pp. 594-599.

10. Muller-Dethlefs, K. y Schlader, A. F. "The effect of steam on flame temperature, burning velocity and carbon formation in hydrocarbon flames". En: *Combustion and Flame*. N.º 27. 1976. pp. 205-215.