

# MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LLAMAS PREMEZCLADAS DE METANO-AIRE Y GAS NATURAL GUAJIRA –AIRE UTILIZANDO EL MÉTODO DEL ÁNGULO DEL CONO

PEDRO NEL BENJUMEA HERNÁNDEZ

*Escuela de Procesos y Energía. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín*

CARLOS MARIO HIGUITA BEDOYA

*Ingeniero de Petróleos. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín*

CAMILO ANDRÉS CORDOBA PÉREZ

*Ingeniero de Petróleos. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín*

Recibido para revisar 26 de Febrero de 2003, aceptado 24 de Abril de 2003, versión final 20 de Agosto de 2003

**RESUMEN:** En este trabajo se midió la velocidad de propagación de llamas premezcladas de metano –aire y gas natural Guajira – aire, utilizando el método del ángulo del cono con un quemador Bunsen cilíndrico.

En el desarrollo de las pruebas se utilizaron mezclas gas combustible –aire con un intervalo de concentración entre el 9% y el 11% por volumen de gas combustible, registrándose los máximos valores de velocidad de propagación de llama,  $V_u$ , en mezclas un poco más ricas que las correspondientes al punto estequiométrico. Para el metano esta velocidad fue de 44.1 cm/s y para el gas natural Guajira de 43.1 cm/s. Se observó que el contenido de inertes en el gas natural Guajira hace que su  $V_u$  sea menor que la del metano, a pesar de contener pequeñas cantidades de hidrocarburos más pesados como propano, butano y pentano.

Las pruebas arrojaron valores de  $V_u$  para el metano siguiendo la misma tendencia de los reportados en la literatura. Las desviaciones de los resultados experimentales con respecto a los teóricos se pueden atribuir fundamentalmente al método utilizado para la medición de la velocidad de la mezcla inflamable a la salida del quemador.

**PALABRAS CLAVES:** Combustión, llamas Laminas, Velocidad de Propagación.

**ABSTRACT:** In this work, the burning velocity of premixed laminar flames of methane –air and Guajira natural gas– air mixtures was measured by the cone's angle method using a cylindrical Bunsen burner.

In the development of the experiments, a fuel concentration in the fuel – air mixture ranging from 9% - 11% was taken. The maximum value of the burning velocity was obtained for mixtures a little bit richer than the stoichiometric case. For methane, this flame velocity was 44.1 cm/s and for the Guajira natural gas was 43.1 cm/s. From the results, it was possible to see that the Guajira natural gas inert content led to a burning velocity value lesser than the methane's, in spite of the Guajira natural gas having a higher heavy hydrocarbon content.

Methane burning velocity values following a similar trend to those reported by the literature were obtained. The systematic error found in the results is mainly a consequence of inaccuracies in the method used to measure the fuel – gas mixture velocity at the burner exit.

**KEYWORDS:** Combustion, laminar flames, burning velocity.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente es posible obtener valores teóricos para la velocidad de propagación de llama de sustancias puras a partir de principios fundamentales, acoplando la cinética de las reacciones elementales con los fenómenos de transporte involucrados, sin embargo esta situación se hace mucho más compleja para mezclas multicomponentes como es el caso del gas natural.

La otra alternativa para determinar la velocidad de propagación de llama de sustancias puras o mezclas multicomponentes es intentar medirla experimentalmente. A este respecto, no existe en la literatura un método estandarizado de medición, sino una amplia variedad de métodos que se diferencian fundamentalmente en la geometría de las llamas generadas y en si éstas se fijan en un quemador o se dejan propagar libremente.

En este artículo se reportan mediciones de la velocidad de propagación de llama para el metano como sustancia pura y para el gas natural de la Guajira como mezcla multicomponente utilizando el método del ángulo del cono con un quemador cilíndrico tipo Bunsen.

El conocimiento de la velocidad de propagación de llama de un gas combustible es importante, no sólo para el desarrollo de modelos teóricos, sino para la solución de problemas prácticos en la utilización de los gases. En el diseño de los quemadores más ampliamente utilizados con gas natural, los atmosféricos de premezcla, es indispensable conocer esta propiedad para lograr una efectiva estabilización de las llamas en los puertos del quemador. Así mismo, los diferentes métodos gráficos de predicción de la intercambiabilidad de gases, usan la velocidad de propagación de llama, o una función de ella, como uno de los ejes principales. Los estudios de intercambiabilidad se hacen necesarios en países que como Colombia, pueden verse expuestos a tener en sus redes de distribución gases con diferencias importantes en su

composición química y por lo tanto en sus velocidades de propagación de llama.

## 2. MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LLAMA.

En la literatura especializada esta propiedad ha recibido diferentes nombres, tales como: velocidad de deflagración, velocidad de llama laminar, velocidad normal, velocidad de transformación y velocidad de quemado (*Burning velocity*). La definición de la velocidad de propagación de llama se basa en el modelo ideal unidimensional de llama, en donde se suponen llamas planas, adiabáticas y laminares. La velocidad de propagación de llama de un gas,  $V_u$ , ha sido definida por varios autores como la rapidez, relativa a la mezcla de gases, con la cual el frente de llama se mueve desde la zona de reacción hacia la mezcla inflamable. La medición se hace en dirección normal a la superficie del frente de llama (*Pritchard et al, 1976*).

La medición experimental de la  $V_u$  resulta compleja por la alta velocidad a la que ocurren los procesos de combustión en la llama. Los métodos de medición pueden clasificarse en estáticos y dinámicos (*Glassman, 1999*).

En los métodos estáticos se logra tener una velocidad espacial de la llama igual a cero y en general se usa un quemador tipo Bunsen. En este tipo de quemadores la llama toma la apariencia de un cono que permanece inmóvil respecto al observador pero que viaja con respecto a la mezcla inflamable. Los métodos estáticos se basan en medir el área o el ángulo del cono.

Los métodos dinámicos son de mayor complejidad experimental que los estáticos. En ellos, la llama viaja a través de la mezcla inflamable fresca, la cual permanece estática en el espacio. Entre estos métodos, los más comúnmente reportados en la literatura son: el de la burbuja de jabón, el del tubo de vidrio y el de la bomba esférica (*Tse et al, 2001*).

De los métodos mencionados el más ampliamente usado por su relativa sencillez

es el del ángulo del cono. Dicho ángulo está definido por las magnitudes relativas de la  $V_u$  y la velocidad de la mezcla inflamable saliendo por la boquilla del quemador,  $V_m$ . La velocidad de propagación de llama es balanceada por la componente de la velocidad de flujo normal a la superficie de la llama. De este modo la velocidad de propagación de llama se obtiene por medio de la siguiente expresión (Glassman, 1999):

$$V_u = V_m \times \text{Sen}\theta$$

Donde,

$\theta$  : Ángulo medio del cono

### 3. TRABAJO EXPERIMENTAL

La medición de la velocidad de propagación de llama por el método del ángulo del cono se basa en la obtención de llamas estables caracterizadas por un porcentaje de gas combustible en la mezcla inflamable. Una vez se logre tener una llama estable y se pueda medir adecuadamente la velocidad de la mezcla inflamable, se procede a capturar, por medio de una cámara fotográfica, una imagen de la llama, sobre la cual se debe medir en forma muy precisa el ángulo del cono.

### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS GASES UTILIZADOS

El metano y el aire utilizados fueron provistos por la empresa AGA FANO adecuadamente certificados. El gas natural originario del Campo Chuchupa, ubicado en el Departamento de la Guajira, fue conseguido en una estación de servicio de gas natural vehicular de la ciudad de Medellín y fue caracterizado en el Laboratorio de Crudos y Derivados de la facultad de Minas de la Universidad Nacional. Para la determinación de la composición del gas natural se utilizó un cromatógrafo de gases marca VARIAN 3800 monitoreado por el programa *Power Station Start Chromatographic*. Se usó un detector tipo FID (*Flame ionization detector*) y una columna tipo polímero poroso HAYESEP R 80100 (2 pies x 1/8 pulgada). El factor de compresibilidad y la densidad relativa fueron calculadas de acuerdo con la norma ISO 6972. La viscosidad de los gases se determinó por el método de Herning y Zipperer (Mc Cain, 1990).

Las tablas 1 y 2 presentan la composición y las propiedades físicas de los diferentes gases utilizados:

**Tabla 1. Composición de los Gases Utilizados**

Componente (Fracción Molar)	Metano	Gas Natural Guajira	Aire
Metano	0.99000000	0.9743	
Etano	0.00072886	0.0064	
Propano	0.00043732	0.0017	
Isobutano		0.0007	
Pentano		0.0004	
Hexano		0.0015	
CO <sub>2</sub>	0.00014577	0.0038	
N <sub>2</sub>	0.00583090	0.0182	0.8010
O <sub>2</sub>	0.00072886		0.1990
H <sub>2</sub>	0.00583090		
Etileno	0.00072886		
Propileno	0.00043732		
Butenos	0.00001458		
Vapor de agua			< 1.2 ppm

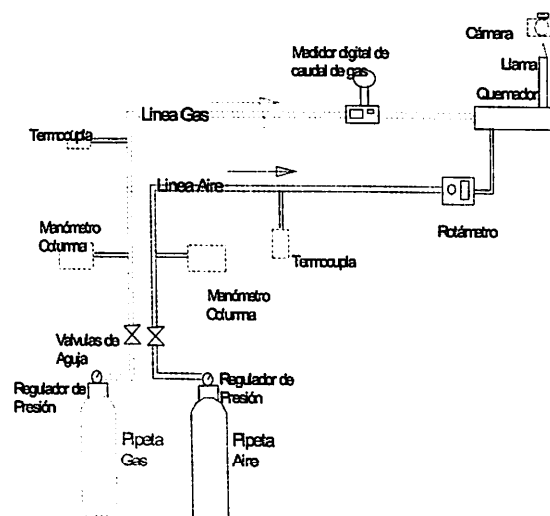
**Tabla 2. Propiedades de los Gases Utilizados a Condiciones Estándar**

<i>Propiedad</i>	<b>Metano</b>	<b>Gas Natural Guajira</b>	<b>Aire</b>
Densidad relativa	0.5583	0.5801	0.9940
Factor de compresibilidad	0.9980	0.9979	0.9996
Viscosidad ( $\mu\text{Pa.s}$ )	11.1	10.6	18.5

### 3.2 MONTAJE Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La figura 1 presenta un esquema del montaje experimental utilizado. Dicho montaje, implementado en el Laboratorio de Ciencias Térmicas de la Facultad de Minas, está conformado básicamente por dos líneas de flujo, una de aire y otra de gas combustible, que se unen de forma perpendicular en el tubo de mezclado del quemador. La línea de gas inicia en un cilindro de almacenamiento de alta presión dotado con un regulador de dos etapas con un rango de funcionamiento desde 3000 a 0.102 psi. Dicho regulador permite el paso del gas por medio de una electroválvula que se acciona con una corriente de 12 Voltios. Después del regulador se tiene una válvula de aguja que permite regular el flujo de manera precisa. El gas llega después hasta los puntos donde se registran la temperatura y la presión antes de pasar a través de un medidor de flujo volumétrico marca ABB tipo turbina con

capacidad de medir caudales entre 0.4 y 8 litros por minuto con una precisión del 0.01%. Finalmente, el gas llega al quemador a través de un inyector que le aumenta la velocidad. La línea de aire tiene una configuración similar y solo varía en el tipo de medidor de flujo volumétrico que en este caso se trata de un rotámetro. El quemador utilizado es atmosférico de premezcla y compuesto de un tubo de mezclado cilíndrico y de un solo puerto, ambos fabricados en acero inoxidable. El diámetro interno del tubo es  $\frac{3}{4}$  de pulgada (1.905 cm) y tiene una longitud efectiva de mezclado de 13.78 pulgadas (35 cm). La cabeza del quemador es un niple de  $\frac{1}{4}$  de pulgada (0.635 cm) de diámetro y de 10.24 pulgadas (26 cm) de longitud. Dicho quemador fue diseñado y fabricado en el Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Universidad de Antioquia.

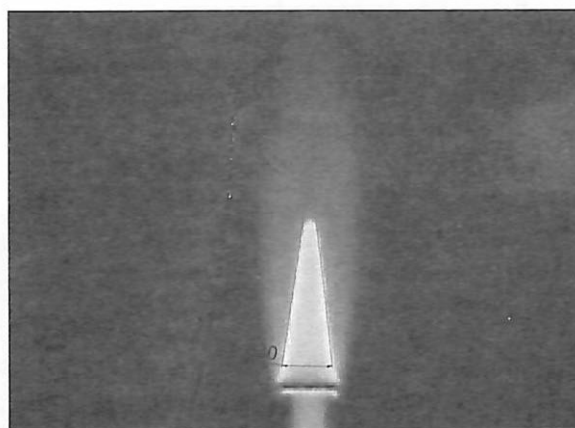


**Figura 1. Montaje Experimental para medir la Velocidad de Propagación de Llama**

El procedimiento seguido para obtener una concentración dada de gas combustible en la mezcla inflamable consiste en fijar una tasa de flujo de aire y luego ir fluyendo el gas a tasas variables hasta obtener la composición deseada. El rango de porcentajes volumétricos trabajado fue entre el 9 y el 11.5% con incrementos de 0.5 %. Estos rangos se eligieron después de determinar las concentraciones de gas combustible para las cuales fue posible obtener llamas estables. Para poder determinar la velocidad de propagación, una vez estabilizados los caudales y obtenida una llama estable en el quemador, se registran las presiones y las temperaturas y se toma una foto con una cámara digital.

La medición del ángulo se hace a partir de las fotografías llevadas al computador con el *Software Auto Cad* (Fernández et al, 2001)..

En la figura 2 se muestra, mediante un ejemplo, el criterio utilizado para la medición del ángulo del cono buscando reducir al máximo las inexactitudes involucradas por las distorsiones de la base y la punta de la llama. De acuerdo con lo reportado en la literatura se ha establecido que el lado recto del cono es paralelo a la superficie de máxima temperatura o frente de llama y es allí donde debe medirse la velocidad de propagación (Pritchard et al, 1976).



**Figura 2.** Medición del Ángulo del Cono

La velocidad de flujo de la mezcla inflamable se calcula dividiendo el caudal total de salida por el área seccional del quemador. Todos los caudales medidos son corregidos a condiciones estándar (15.6°C y 101.325 kPa), teniendo en cuenta la temperatura y la presión a las cuales se hicieron las mediciones.

#### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

##### *Efecto del Porcentaje de Gas Combustible en la Mezcla Inflamable*

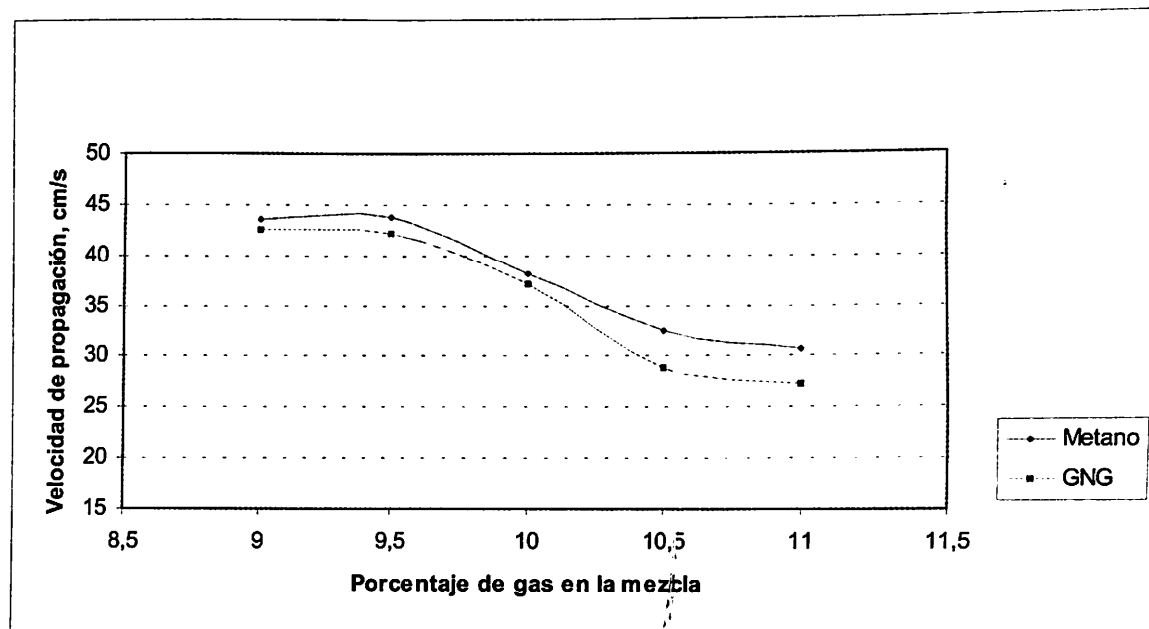
La figura 3 muestra como la velocidad de propagación de llama, tanto para el metano

como para el GNG, aumenta a medida que disminuye el porcentaje de gas combustible en la mezcla, hasta llegar a un valor máximo, el cual de acuerdo con la literatura debe corresponder a un porcentaje de gas cercano al estequiométrico.

La máxima velocidad de propagación de llama para el metano correspondió a una concentración de dicho gas en la mezcla cercana al 9.5%. Este valor difiere del indicado por varios investigadores que coinciden en un valor alrededor del 10%. Esta diferencia se explica en parte por el contenido de oxígeno del aire utilizado en

los experimentos (19.9%), el cual es menor que el considerado en los cálculos normales de combustión (21%).

Por su parte el valor máximo de la velocidad de propagación de llama para el metano obtenido en este trabajo (44.1 cm/s) es mayor que el reportado por la literatura (40 cm/s).



**Figura 3.** Velocidad de Propagación de Llama del GNG y del Metano a Diferentes Concentraciones de Gas Combustible

Esta desviación se produce principalmente por las imprecisiones inherentes del método, en especial el error sistemático involucrado al calcular la velocidad de salida de la mezcla inflamable en una forma indirecta.

Comparando los diferentes valores de la velocidad de propagación de llama para el metano medidos en este trabajo, con los reportados por *Pritchard et al (1976)* para mezclas inflamables con igual concentración de gas combustible, se observa una desviación estándar promedia de 1.164.

Para porcentajes altos de gas combustible en la mezcla, se dificultó la medición del ángulo debido a que los lados rectos de la región central del cono, no se mostraban bien definidos.

Para porcentajes de gas combustible menores de 9.0 % se dificultó mucho estabilizar las llamas, independientemente del caudal de gas, debido a que bajo tales condiciones de flujo la velocidad de salida de la mezcla fue mayor que la velocidad de propagación de llama, produciéndose el fenómeno de desprendimiento.

#### *Efecto de la Composición del Gas Combustible*

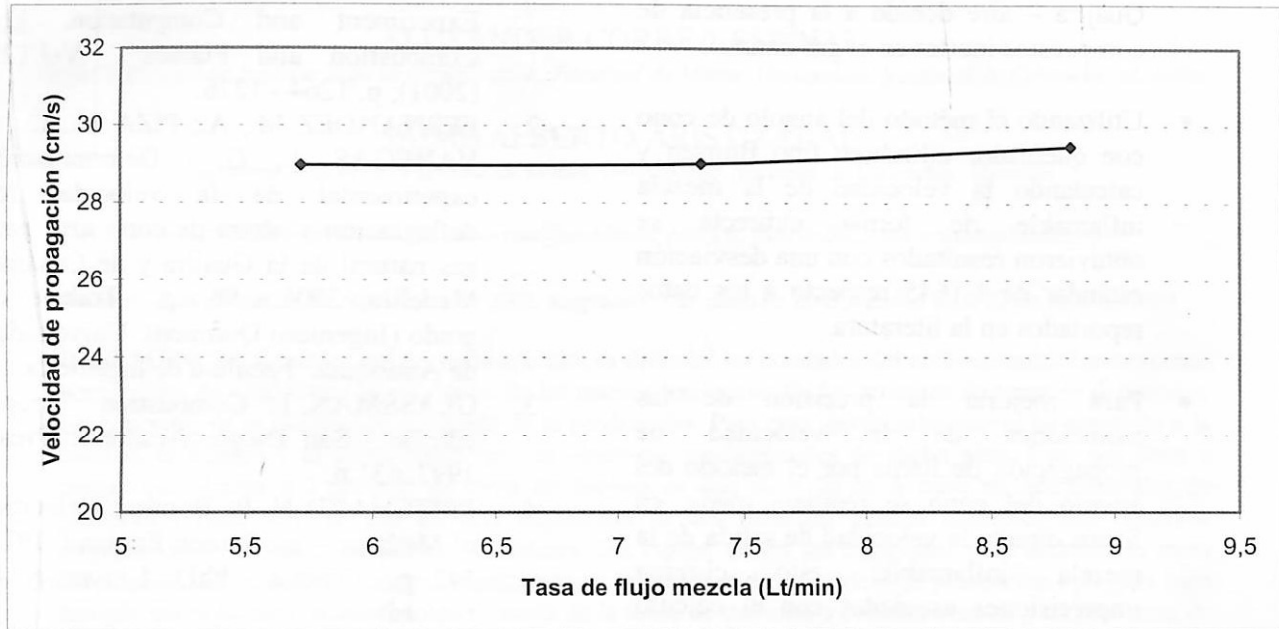
De acuerdo con la figura 3, se obtuvieron valores mayores de la velocidad de propagación de llama para el metano que para el GNG en todo el intervalo de concentraciones de gas combustible. Por ejemplo para un porcentaje de 9.5 de gas combustible en la mezcla se observa una velocidad de 44.1 cm/s para el metano y de 42.5 cm/s para el GNG. Esta tendencia se puede explicar a partir de la composición de cada uno de los gases teniendo en cuenta que el GNG tiene mayor porcentaje de inertes ( $N_2$  y  $CO_2$ ), los cuales disminuyen la temperatura de la llama al actuar como sumidores de calor y por lo tanto también disminuirán su Velocidad de propagación.

#### *Efecto del Caudal de la Mezcla Inflamable*

La figura 4 muestra la variación de la velocidad de propagación de llama del GNG

para tres caudales diferentes de la mezcla inflamable a una concentración fija de gas combustible en dicha mezcla. La figura 5

muestra las llamas correspondientes a dichas condiciones.



**Figura 4.** Variación de la Vu del GNG con el caudal total a 10.5% en la mezcla



**Figura 5.** Efecto de la Velocidad de Salida de la Mezcla Inflamable sobre la Altura del Cono

De las figura 4 y 5 se puede observar que la velocidad de propagación de llama para una composición fija de la mezcla inflamable tiende a permanecer constante a pesar de las variaciones en el caudal de dicha mezcla y en el ángulo del cono. Lo anterior se explica porque el efecto de la disminución del ángulo del cono se ve compensado por el crecimiento de la tasa de flujo.

## 5. CONCLUSIONES

- La máxima velocidad de propagación de llama, tanto para el metano como para el GNG, se obtiene para mezclas inflamables un poco más ricas que las estequiométricas. La máxima Vu obtenida para el metano fue de 44.1 cm/s, mientras que para el GNG fue de 43.1 cm/s.

- La velocidad de propagación de llama es mayor para mezclas inflamables metano - aire que para mezclas Gas Natural Guajira - aire debido a la presencia de compuestos inertes en el gas natural.
- Utilizando el método del ángulo de cono con quemador cilíndrico tipo Bunsen y calculando la velocidad de la mezcla inflamable de forma indirecta se obtuvieron resultados con una desviación estándar de 1.1645 respecto a los datos reportados en la literatura.
- Para mejorar la precisión de las mediciones de la velocidad de propagación de llama por el método del ángulo del cono se requiere medir en forma directa la velocidad de salida de la mezcla inflamable, esto elimina imprecisiones asociadas con el cálculo simplificado de dividir la tasa de flujo por el área seccional del quemador. Una opción para hacer mediciones directas de tal velocidad es utilizar un anemómetro óptico láser.

## BIBLIOGRAFÍA

1. TSE, S., et al. Microgravity Burner – Generated Spherical Diffusion Flames: Experiment and Computation. En: Combustion and Flames. Vol.125 (2001); p. 1264 - 1276.
2. FERNANDEZ M., A.; PIZA M., C. y VANEGAS J., G. Determinación experimental de la velocidad de deflagración y altura de cono azul para gas natural de la Guajira y de Cusiana. Medellín, 2001, 96 p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería.
3. GLASSMAN, I.. Combustion. Tercera edición. San Diego: Academic Press, 1997. 631 p.
4. PRITCHARD H, R. Burning Velocities of Methane – air flames. England, 1972, 342 p. Thesis PhD. University of Salford.
5. McCAIN, W. The Properties of Petroleum Fluids. Second Edition. Penn Well Books. 1990. 504p.