

# ESTUDIO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES Y FENÓMENOS RADIATIVOS EN UNA LLAMA DE METANO (CH<sub>4</sub>) CON AIRE ENRIQUECIDO

## NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE RADIATIVE PROPERTIES AND PHENOMENA IN A METHANE (CH<sub>4</sub>) FLAME WITH ENRICHED AIR

JOSE LUIS SUÁREZ

*Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, GASURE, Universidad de Antioquia, Estudiante de maestría, joseluisuarez@udea.edu.co*

ANDRÉS AMELL ARRIETA

*Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, GASURE, Universidad de Antioquia, Coordinador, anamell@udea.edu.co*

FRANCISCO JAVIER CADAVID

*Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, Universidad de Antioquia, Docente, fcadauid@udea.edu.co*

Recibido para revisar agosto 4 de 2009 aceptado abril 15 de 2010, versión final abril 17 de 2010

**RESUMEN:** En este artículo, se presenta un estudio numérico y experimental del comportamiento de la radiación de una llama de metano con aire enriquecido con bajas concentraciones oxígeno. Se midió el flux de calor por radiación y se determinó su relación con el porcentaje de enriquecimiento del aire, permitiendo estimar las propiedades radiantes de la llama en función del enriquecimiento con oxígeno. Se utilizó aire con concentraciones de oxígeno desde 21% hasta 22,5%. La simulación se realizó con el software *Fluent V6.2.16* y para resolver la ecuación de transferencia radiativa se empleó el modelo de las Ordenadas Discretas. Las propiedades radiantes de la mezcla de gases de combustión (CO, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O) se cuantificaron empleando el modelo de la Suma Ponderada de Gases Grises (WSGGM). La experimentación se llevó a cabo empleando como combustible Gas Natural de la Guajira, un factor de aireación de 1,1 y una potencia térmica de 1,54 kW. Se utilizó un quemador de premezcla tipo *Bunsen*, en el que se inducía el aire, el cual a su vez es enriquecido con oxígeno proveniente de un cilindro.

**PALABRAS CLAVE:** Combustión con aire enriquecido, radiación en una llama, simulación de llamas, combustión y radiación.

**ABSTRACT:** This article proposes a numerical and experimental study of the radiation behavior in a methane flame with air enhanced with oxygen at low concentrations. It was measured the heat flux by radiation and was determined its relationship with the percentage of enrichment of the air, which allowed to estimate the radiant properties of the flame in terms of oxygen enrichment. Was used air with oxygen concentrations from 21% to 22,5%. The simulation was done with the software *Fluent V6.2.16* and to solve the radiative transfer equation was used the Discrete Ordinates model. The radiant properties of the mixture of combustion gases (CO, CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O) were quantified using the Weighted Sum of Gray Gases Model (WSGGM). The experiment was carried out using Guajira Natural Gas as fuel, an air factor equal to 1,1 and a thermal power of 1,54 kW.

**KEYWORDS:** Oxygen Enhanced Combustion, flame radiation, flame simulation, combustion and radiation.

## 1. INTRODUCCIÓN

El gas natural se ha convertido en uno de los combustibles fósiles más utilizados en las diferentes transformaciones energéticas desde el hogar hasta la industria, lo que lo convierte en el principal eje de estudio de diversas investigaciones [1,2]. En este sentido, es pertinente incentivar la investigación de las diferentes propuestas mundiales de nuevas tecnologías que permitan aumentar la eficiencia en el uso de este energético y que aún no se han implementado ni estudiado en el país, este es el caso de la combustión enriquecida con oxígeno y gas natural, la cual mejora el desempeño y la eficiencia térmica de los equipos de combustión [3], incrementa el flux de calor, y disminuye las emisiones contaminantes.

Generalmente, en el estudio y en el uso de los procesos de combustión se ignora el comportamiento y el aporte de la energía transferida por medio de la radiación, desconociendo que dicha forma de transporte de energía en muchos casos puede llegar a ser el modo de transferencia de calor predominante [4]. Por todo esto, no cabe duda que el estudio de un fenómeno complejo como la radiación, es muy importante para tratar de incrementar las eficiencias de los sistemas de combustión y el uso de nuevas tecnologías y tendencias.

La radiación es un tema de gran interés y complejidad que ha sido tratada desde diferentes aspectos: Existen formulaciones matemáticas y simplificaciones de los modelos relacionados con la transferencia de energía por radiación[5], [8], [9], [16], [20], [21] que buscan resolver problemas propuestos por la teoría, plantear estudios relacionando la influencia de esta transferencia en otros fenómenos termo-fluidodinámicos [11], [17], [18], [19] y proponer recomendaciones para el manejo y determinación de las condiciones teóricas y experimentales que rigen el fenómeno, como por ejemplo los procedimientos adecuados para hallar parámetros radiativos, [24], [25], [27-31].

Entre estos se resalta el realizado por *Baukal y Gebhart* [17], en el cual se presenta la

importancia que puede tener la radiación en una llama de metano tipo *impingement* con aire enriquecido confrontándola con otros mecanismo como la convección. En él se concluye que la radiación no es tan preponderante comparado con el calor total de la llama, aunque se reconoce que el calor radiado sí se incrementa al enriquecer el aire con oxígeno, y se observa que el mayor aporte radiativo se da cerca del punto estequiométrico. Sin embargo, debido a que el estudio se realizó con una llama tipo *impingement*, no permite determinar con mejor aproximación el comportamiento único entre el efecto de combustión con aire enriquecido y la radiación emitida sin que se involucren algunos otros fenómenos como la convección, la turbulencia y la creación de hollín a bajos enriquecimientos que puedan alterar la observación. De igual modo, debido a las “grandes potencias” que se manejan en la experimentación, no permite identificar claramente los cambios que se puedan revelar en el patrón de radiación de acuerdo a los porcentajes bajos de enriquecimiento y mostrar los beneficios que se pueden obtener comparando con llamas sin enriquecer. Por lo anterior, se presenta la necesidad científica y tecnológica de optimizar el uso de los energéticos y particularmente de los combustibles gaseosos, en cuanto a aprovechar de una mejor manera todo su potencial relacionando los estudios conjuntos entre la combustión y la radiación, lo cual ha sido muy poco realizado hasta el momento en el caso de las llamas de premezcla laminar [17]. Con este estudio se busca entonces obtener un mejor panorama de lo que podría ser el funcionamiento óptimo de los equipos de combustión, más aún cuando las tecnologías están en pleno desarrollo y son susceptibles a las adaptaciones, como es el caso de la combustión con aire enriquecido.

Por todo esto, el estudio del patrón de radiación de una llama de metano con aire con bajos porcentajes de enriquecimiento en un quemador de premezcla, es importante para alcanzar los objetivos expuestos y coadyuvar para la superación del rezago científico y tecnológico

colombiano en sistemas de combustión y calentamiento.

## 2. ACERCA DE LA COMBUSTIÓN CON AIRE ENRIQUECIDO Y LA RADIACIÓN EN LLAMAS DE PREMEZCLA

### 2.1 Combustión con aire enriquecido

La combustión enriquecida con oxígeno OEC (Oxygen Enhanced Combustion) consiste en efectuar el proceso de combustión con aire con concentraciones de oxígeno mayores al 21% [3]. El parámetro característico que determina el grado de oxigenación del comburente es el factor de oxígeno equivalente, el cual se define mediante la siguiente expresión:

$$\Omega = \frac{20,9}{0,21(\text{vol}\%O_2) + (\text{vol}\% \text{aire})} \quad (1)$$

Según el factor de oxígeno equivalente se han definido tres rangos de regímenes de operación de sistemas de combustión con aire enriquecido:

- Enriquecimiento de bajo nivel:  $\Omega < 0,3$ . Es utilizado en situaciones en las cuales se tienen que hacer ligeros ajustes en las configuraciones existentes. Es utilizado cuando se quieren beneficios incrementales.
- Enriquecimiento de alto nivel:  $\Omega > 0,9$ . Aplicaciones de procesos de alta temperatura en donde los beneficios por la alta tasa de transferencia de calor justifican los altos costos asociados. Se requieren quemadores especiales.
- Enriquecimiento de nivel intermedio:  $0,3 < \Omega < 0,9$ . Se requieren quemadores especiales.

Por otro lado, la composición de los productos de combustión depende de varios factores incluyendo la composición del oxidante. Cuando el porcentaje de oxígeno aumenta, la composición de los humos se afecta [3] así: H<sub>2</sub>O aumenta, CO<sub>2</sub> aumenta muy ligeramente, el N<sub>2</sub> disminuye de un máximo a cero y el CO

aumenta, este último debido a la disociación química.

De igual modo, todas las especies menores (H, H<sub>2</sub>, O, OH y O<sub>2</sub>) aumentan su concentración. Este aumento de radicales, O<sub>2</sub> no quemado y (H<sub>2</sub> y CO) que representa el combustible no quemado se debe a la disociación química, la cual ocurre a muy altas temperaturas [3].

Dentro de los beneficios que presenta la OEC se encuentra el aumento en la temperatura de llama ya que cuando el aire es enriquecido con oxígeno, se reduce el nitrógeno y en consecuencia la temperatura de llama aumenta. Por otro lado, el flux de calor disponible es mayor comparado con el obtenido en la combustión con aire normal [33]. Todo esto facilita la reducción en el consumo de combustible ya que se necesita menos para aprovechar la misma cantidad de energía. De igual modo la OEC en algunos casos puede alcanzar disminuciones en la emisión de contaminantes [33].

### 2.2 Radiación en llamas

En general los análisis y modelos que se proponen para entender el fenómeno de la radiación son bastante extensos y complejos, llenos de diferentes conceptos y ecuaciones expuestas en una cantidad de trabajos [4], [5], [8], [9], [11], [16], [17], [20], [21], [29], [30], [31], dentro de los cuales se resalta la importancia que tiene la radiación como mecanismo de transporte de energía en cualquier proceso que involucre calor, y más aún en la combustión a altas temperaturas. Por todo esto, para un buen tratamiento, entendimiento y modelado del transporte de energía térmica es esencial contar con un modelo matemático adecuado de combustión y radiación que involucre todas las condiciones específicas del proceso [31].

Debido a que en la zona de reacción de un proceso de combustión se tiene una mezcla de gases calientes [4], [26], [30], [31] es pertinente entonces mencionar la radiación gaseosa, diferente al intercambio de radiación que se puede dar entre sólidos o líquidos opacos. Para

gases no polares, tales como  $O_2$  o  $N_2$ , se justifica no tenerlos en cuenta en el intercambio, pues los gases monoatómicos y diatómicos son esencialmente transparentes a la radiación térmica incidente. Sin embargo, no se puede dar el mismo tratamiento a gases polares, como el  $CO_2$ , vapor de agua,  $NH_3$  y gases de hidrocarburos, los cuales emiten y absorben en un amplio rango de temperaturas [30]. Para tales gases la radiación se distribuye de forma continua con la longitud de onda, específicamente agrupada en la zona infrarroja del espectro electromagnético [31] y su potencial de emisión depende básicamente de la concentración y de la temperatura de estos [4], [17]. Cabe resaltar además que la radiación gaseosa no es un fenómeno superficial, sino un fenómeno volumétrico.

Para este tipo de estudios, es importante tener en cuenta tres fenómenos principales, la absorción, la emisión y la dispersión, siendo este tercero principalmente referido al medio en el cual se da la transferencia de calor por radiación. El cambio de la intensidad radiada desde un emisor hasta donde se mide la radiación, encierra los tres fenómenos mencionados anteriormente. Para este análisis se define un parámetro denominado coeficiente de extinción, el cual a su vez depende de otros dos, el coeficiente de absorción y el de dispersión.

La participación de un medio en el cual se transmite el calor por radiación, se mide a través de un número adimensional denominado espesor óptico, el cual depende del coeficiente de extinción y de la longitud característica del medio [4]. El espesor óptico para un medio, depende básicamente de la humedad y de las partículas que se puedan encontrar suspendidas en él, generalmente este efecto se desprecia para el aire, es decir el espesor óptico es próximo a cero, ya que el efecto que puede hacer la humedad es muy pequeño.

Como es bien sabido, la propiedad principal que dice que tan preponderante es la interacción del calor vía radiación es la emisividad, la cual a su vez (para la mayoría de los gases) depende del ya mencionado coeficiente de absorción. Para hallar la emisividad de los gases como el vapor

de  $H_2O$  y el  $CO_2$  existen datos experimentales representados en cartas [4], las cuales expresan la emisividad en términos de la temperatura y la concentración. Sin embargo, de igual modo se cuenta con diferentes modelos analíticos para solucionar este tipo de problemas, los cuales son básicamente correlaciones y simplificaciones.

En este sentido se pueden distinguir dos grandes grupos, los modelos de banda angosta y de banda ancha, los cuales se diferencian básicamente en la porción de banda de vibración-rotación que relacionen, alrededor de los cuales se han escrito diferentes artículos verificando y mejorando su participación en este tipo de problemas [8], [9], [11]. Entre estos modelos resaltan el modelo propuesto por Elsasser y Malkmus (de banda angosta), y el modelo desarrollado por Edwards y Menard (de banda ancha) [3]. Existen modelos más actuales, como son el método de correlación  $k$  y el de distribución  $k$ , principalmente basados en teorías de probabilidad, los cuales han despertado gran interés en ciertos investigadores [16]. Por otro lado uno de los métodos más simples y más utilizados, introducido por Hottel y expuesto ampliamente en [4] es la suma pondera de gases grises (WSGG), su validación y buenos resultados han hecho que este modelo sea uno de los más utilizados [9], [5], [18]. De igual manera, la mayoría de estos modelos han podido ser adaptados a la solución de problemas que involucren la radiación y que se puedan resolver numéricamente en un programa CFD, como han sido evaluados en algunos artículos anteriormente citados, y respaldados en [27].

Por otro lado, en busca de resolver la Ecuación de Transferencia Radiativa o RTE [4], y apoyados en los desarrollos de diferentes modelos matemáticos que permiten su solución, se han implementado y aprovechado una serie de métodos matemáticos que facilitan la solución de esta ecuación. Entre estos métodos se destacan: El método Monte Carlo, El modelo P-1, el modelo Rosseland y el método de Ordenadas Discretas, siendo este último uno de los más utilizados y aceptados por su comparado y por los buenos resultados que arroja [27], aunque en conjunto han despertado gran interés sus validaciones y verificaciones [19], [20], [21].

### 3. MONTAJE EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

#### 3.1. Montaje experimental

En la figura 1 se observa un esquema del montaje utilizado. En este se llevaron a cabo la determinación de los rangos de enriquecimiento y las mediciones de la radiación. A partir de esta configuración no fue necesario adquirir mezclas especiales de oxígeno y nitrógeno, lo cual resultaba considerablemente costoso, sino que se utilizaron un cilindro de oxígeno industrial y otro con Gas Natural de Guajira, el cual posee una composición de 97,76% de Metano [1].

El quemador utilizado es un quemador atmosférico de aire inducido de premezcla parcial (tipo *Bunsen*), de potencia máxima de operación 2 kW (Figura 2), provisto de un sistema de refrigeración para minimizar los posibles errores debidos al calentamiento del puerto.

Este quemador fue adaptado para suministrar el gas y el aire en la premezcla, el cual es enriquecido. Para “laminarizar” el flujo, se ubicó en la premezcla un volumen de un material conocido como *Honey comb*, el cual permitió tener una mezcla más homogénea. Para controlar y verificar tanto el factor de aireación como el porcentaje de oxígeno de enriquecimiento, se utilizó un analizador de gases, marca SICK-MAIHAK, el cual está provisto de una celda para el análisis de oxígeno del tipo paramagnética, la cual funciona en el rango de 0 a 100%.

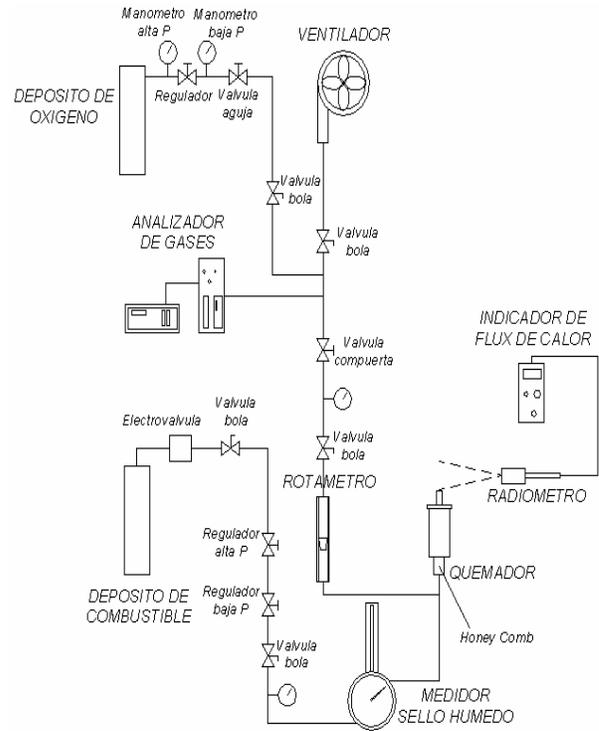


Figura 1. Montaje utilizado para la medición de la radiación

Figure 1. Assembly used for measuring radiation

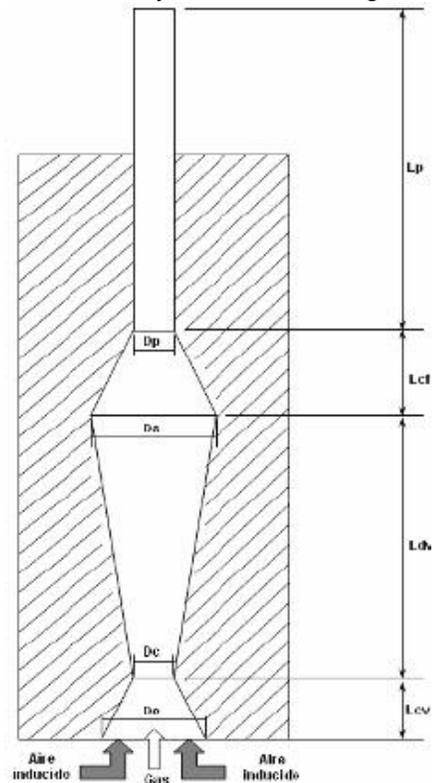


Figura 2. Quemador tipo *Bunsen* utilizado

Figure 2. Bunsen burner type used

### 3.1.1. Suministro de gas

Se utilizó un sistema de suministro de gas que incluye un depósito de combustible, una electroválvula y un regulador de presión. El tren de gas posee: Un regulador de presión de alta y uno de baja, dos válvulas de bola, una válvula de aguja y un manómetro. Para medir el caudal de gas, se utilizó un medidor tipo sello húmedo marca Elster-Handel, el cual funciona en un rango de 0,002 hasta 0,2 m<sup>3</sup>/h.

### 3.1.2. Suministro de aire

El aire es suministrado por un ventilador. La línea se compone de mangueras ½ pulgada de diámetro, 2 válvulas de bola, dos entradas de acople rápido, una para el oxígeno y una para la muestra del analizador. Adicionalmente una válvula de compuerta y un manómetro. Para medir el caudal se utilizó un rotámetro marca Cole Parmer que funciona en un rango de 0 a 65 LPM.

### 3.1.3. Suministro de oxígeno

El suministro de oxígeno se efectuó por medio de un cilindro con oxígeno industrial equipado con 2 reguladores de presión, uno de baja y uno de alta; de allí se lleva por medio de mangueras hasta un tren de regulación, el cual tiene básicamente: Una válvula de bola y una válvula de aguja para regular el caudal.

### 3.1.4. Medición de la radiación

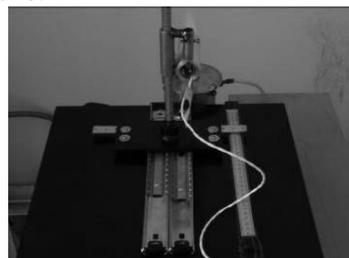
Para estimar las propiedades radiativas de la llama, se dispuso de un sistema que consta básicamente de un sensor de radiación o radiómetro, que convierte la radiación a una señal eléctrica, y su respectivo indicador (transductor H203), ambos marca MedTherm Corp. Serie 64.

Para controlar los movimientos y la posición del radiómetro, se utilizó la estructura mostrada en la figura 3, el cual permite desplazamiento sobre los ejes radial y axial.

### 3.1.5. Metodología experimental

Inicialmente se estableció un factor de aireación de 1,1 (exceso del aire del 10%) con lo cual se

busca obtener combustión completa y por tanto maximizar la producción de vapor de agua y de CO<sub>2</sub>. En todos los experimentos la composición química del combustible, la potencia térmica y el factor de aireación se mantuvieron constante, con el propósito de tener siempre como variable incidente el grado de enriquecimiento del aire con oxígeno.



**Figura 3.** Montaje del radiómetro  
**Figure 3.** Radiometer assembly

El proceso comienza con la selección de un flujo de gas, por ende la potencia. Esto se obtuvo modificando la presión en el tren de gas y variando la apertura de la válvula aguja. Para cada caudal de gas se halla su respectivo caudal de aire conservando el factor de aireación (2):

$$Q_{aire} = \frac{nV_{O_2,estq}Q_{gas}}{yO_2} \quad (2)$$

Donde  $Q_{aire}$  es el caudal de aire,  $n$  es el factor de aireación,  $V_{O_2,estq}$  es el volumen de oxígeno estequiométrico, el cual es dos para metano,  $Q_{gas}$  es el caudal de gas y  $yO_2$  es la fracción de oxígeno en el aire.

Luego, se lleva la llama a los límites de desprendimiento [17] en condiciones de bajo enriquecimiento (21%). A partir de allí se incrementa el porcentaje de oxígeno cada 0,5%. Se obtuvo que aproximadamente a partir del 22,7% de O<sub>2</sub> se presenta el fenómeno de retrollama. Adicionalmente los factores de aireación se verifican con el porcentaje de metano en la premezcla, el cual se mide con el analizador y se compara con el resultado en (3). Este analizador a su vez, se utilizó para determinar el porcentaje de oxígeno que había en el flujo del aire, controlando así el porcentaje de enriquecimiento. Para todo lo anterior se tuvieron en cuenta las siguientes ecuaciones:

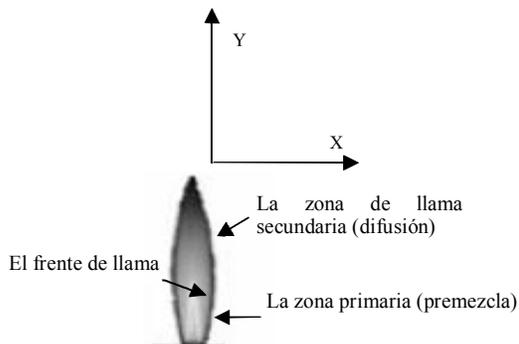
$$\%CH_4 = \frac{1}{1 + nV_a} \times 100 \quad (3)$$

$$V_a = V_{O_2 \text{ esteq}} \left( 1 + \frac{1 - y_{O_2}}{y_{O_2}} \right) \quad (4)$$

$$\dot{m} = Q\rho \quad (5)$$

Donde  $\%CH_4$  es el porcentaje de metano en la premezcla,  $V_a$  el volumen de aire estequiométrico el cual varía con la concentración de oxígeno en el aire,  $\dot{m}$  es el flujo másico,  $Q$  es el caudal y  $\rho$  es la densidad.

Para la medición de radiación se acondicionó un cuarto oscuro. Las lecturas se realizan utilizando el borde del quemador como punto de referencia, como se muestra en la Figura 4. Se escoge un punto radial en el cual las mediciones axiales muestren sensibilidad y presenten una variación perceptible de enriquecimiento del aire [17]. Para cada experimento se determina un número de replicas de acuerdo a la teoría propuesta por Montgomery [25], asumiendo todas las variables como cualitativas, ya que se obtienen después de la medición experimental de algún parámetro, y clasificando la estabilidad de la llama como unifactorial y la radiación como factorial con dos factores. De esta manera se obtuvo un número de replicas de 3 tanto para la estabilidad de la llama como para la radiación, con un nivel de confiabilidad de 0,95.



**Figura 4.** Ejes de referencia de la medición. Y: dirección axial. X: dirección radial

**Figure 4.** Reference axes of measurement. H: axial direction. X: radial direction

#### 4. METODOLOGÍA COMPUTACIONAL

El estudio numérico se efectúa con el software *Fluent V6.2.16*. El estudio se realiza empleando la metodología propuesta en el trabajo de Rendón [26]. En este trabajo, se toma como base el mismo quemador utilizado para el presente estudio, lo cual permite utilizar el mallado elaborado entonces para las simulaciones. Se conservan las dimensiones y las condiciones de frontera, exceptuando los flujos másicos de entrada. Se parte la simulación desde los datos y resultados obtenidos para las tendencias del flujo y la activación de la reacción. Se conservan los mismos criterios de convergencia, balance de masa menor que  $10^{-8}$  (kg/s), y residual de energía menor que  $10^{-6}$ . Por otro lado se conservan los modelos cinéticos y mecanismos de reacción (GRI Mech V 2.11) [36]. Adicionalmente se incluye un modelo de radiación en la simulación. Los métodos de las Ordenadas Discretas y de las transferencias discretas (DTRM) son los más apropiados para los ambientes con espesores ópticos muy pequeños o no participantes, lo cual aplica a la suposición para el aire. Se decide utilizar el modelo de Ordenadas Discretas pues presenta una mayor versatilidad. Por otro lado, se escoge el modelo de Suma Ponderada de Gases Grises (WSGGM) por las razones mencionadas en las secciones 1 y 2.

#### 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

##### 5.1. Resultados de la experimentación

En las Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos como consecuencia de las experimentaciones referidas a la estabilidad de la llama, de modo que resulte adecuada la medición del flux de calor radiativo.

Se puede observar que el caudal de aire necesario disminuye al aumentar la cantidad de oxígeno. De otro lado a una distancia de 95 mm desde el borde del quemador en dirección radial se observa una sensibilidad representativa de radiación. Posicionado el radiómetro en este punto, se desplaza cada centímetro en forma ascendente y en dirección axial, es decir paralelo a la llama.

**Tabla 1.** Especificaciones de la experimentación con  $n = 1,1$  y Gas natural de la Guajira

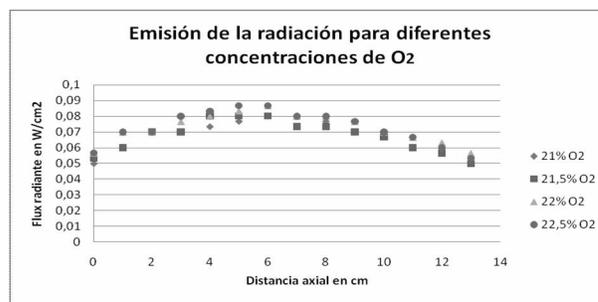
**Table 1.** Specification testing with  $n = 1,1$  and Guajira Natural Gas

Gas				
Caudal m <sup>3</sup> /h	0,12			
Potencia KW	1,54			
Especificaciones experimentales				
%O <sub>2</sub>	21	21,5	22	22,5
Caudal de aire m <sup>3</sup> /h	1,26	1,23	1,2	1,17
%CH <sub>4</sub> en premezcla	8,71	8,9	9,09	9,28
Flujos máxicos totales g/s	0,367	0,359	0,351	0,343

De forma similar, se obtuvo un registro fotográfico de cada experimentación como se muestra en la figura 5 el cual sirve de referencia para comprobar la tendencia obtenida en la simulación y obtener una aproximación visual del fenómeno. Las imágenes y/o gráficas obtenidas de la experimentación revelan que la intensidad de radiación a lo largo del eje axial va aumentando a medida que se enriquece el aire hasta cierto punto, después del cual comienza a disminuir. Esto puede explicarse debido a que en las primeras zonas de la llama, sobre el eje en el cual se encuentra la mezcla de aire y combustible sin quemar (hidrocarburo sensible a la radiación), va aumentando la temperatura a medida que se acerca a la zona de reacción (frente de llama), en el cual se alcanzan las mayores temperaturas. Además, justo después del frente de llama, se tiene la región de llama con mayores concentraciones de vapor de agua y el dióxido de carbono, los cuales como se mencionó anteriormente son sensibles a la radiación y su emisión depende básicamente de la concentración y temperatura. Posterior a esto, la emisión de radiación comienza a decrecer debido a la disminución tanto de la temperatura como de las concentraciones de las especies que emiten y absorben radiación a causa de la entrada, por difusión, de aire de dilución a la llama secundaria.

Por otro lado, se observa que la altura del cono interno de la llama se disminuye a medida que se enriquece el aire (gráfica 1), [35] lo cual influye en el volumen de la llama y por ende en el área

radiante ya que poseen una relación directa con la altura del cono interno (recordando que la llama se asemeja a un cono). Este comportamiento puede incidir en la potencia radiada pues esta depende directamente del área de la fuente [4], [30].



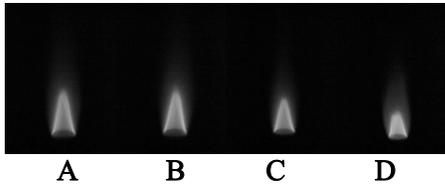
**Gráfica 1.** Medición del flux de calor en una llama de metano con diferentes porcentajes de oxígeno en el aire

**Graphic 1.** Measurement of heat flux in a methane flame with different percentages of oxygen in the air

Se observa además que sólo con un enriquecimiento equivalente a 22,5% de oxígeno en el aire, se obtiene un flux de calor radiado para un mismo punto aproximadamente del 12,5% mayor que el máximo emitido con aire al 21% de oxígeno, lo cual demuestra la importancia que tiene el aumento del oxígeno en el comburente para beneficiar el transporte de energía por radiación.

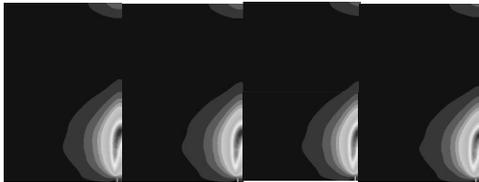
## 5.2. Resultados de la simulación

Mediante la simulación numérica con el software *Fluent*, se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 6, la cual presenta los efectos del enriquecimiento del aire del 21% al 22,5% sobre la radiación emitida por la llama. En estas figuras se observa que la presencia de la radiación se presenta de acuerdo a una sola zona de reacción, es decir no se muestra ninguna reacción secundaria. Las imágenes muestran aumento en la intensidad de la radiación cuando aumenta el porcentaje de oxígeno en el aire. Se destaca también cierto “achatamiento” en el perfil de radiación a medida que aumenta el enriquecimiento en el aire, esto es, la llama se vuelve más pequeña pero más ancha, al igual que en la experimentación.



**Figura 5.** Fotografías de una llama de Metano con aire enriquecido al A) 21 % O<sub>2</sub>, B) 21,5 % O<sub>2</sub>, C) 22 % O<sub>2</sub>, D) 22,5 % O<sub>2</sub>

**Figure 5.** Photos of a flame of methane with enriched air to A) 21 % O<sub>2</sub>, B) 21,5 % O<sub>2</sub>, C) 22 % O<sub>2</sub>, D) 22,5 % O<sub>2</sub>



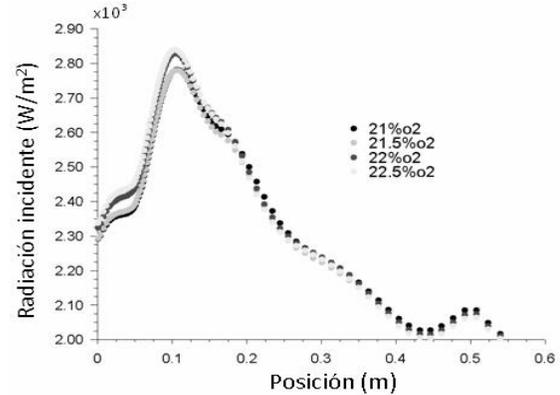
**Figura 6.** Intensidad de radiación en una llama de Metano con aire enriquecido al A) 21 % O<sub>2</sub>, B) 21,5 % O<sub>2</sub>, C) 22 % O<sub>2</sub>, D) 22,5 % O<sub>2</sub>

**Figure 6.** Radiation intensity in a flame of methane with air enriched to A) 21 % O<sub>2</sub>, B) 21,5 % O<sub>2</sub>, C) 22 % O<sub>2</sub>, D) 22,5 % O<sub>2</sub>

Esto también se verifica en la gráfica 2, en donde se presenta la radiación en función de la posición axial para la ubicación radial de 95 mm con respecto al puerto del quemador. En dicha gráfica se puede observar el mismo crecimiento de la intensidad de radiación con el aumento de la concentración de oxígeno en el comburente al igual que el efecto de “achataamiento”.

Los anteriores resultados al igual que los obtenidos experimentalmente concuerdan con las bases teóricas consultadas, las cuales refieren que la emisión radiativa en la región no visible se da principalmente por la presencia de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> en los productos, en función de la temperatura [4]. La concentración de éstos depende de la concentración de oxígeno en el aire, el cual hace que la potencia emisiva aumente. Sin embargo, debido a que el enriquecimiento aumenta la velocidad de deflagración [3], se observa una llama y un patrón de radiación de forma “achatada” y acercándose al puerto a medida que se enriquece el aire, al igual que lo obtenido con las imágenes de la experimentación (figura 5). La presencia de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>, y la incidencia de la temperatura en los gases explican por que la emisión más alta de radiación se concentra en las zonas próximas al

frente de llama, pues es en esos puntos donde tanto la producción de especies emisoras y absorbentes como el incremento de la temperatura son mayores comparados con otra zona de la llama.



**Gráfica 2.** Radiación de una llama de metano con aire enriquecido vs la posición axial a una distancia de 9,5 cm desde el puerto del quemador

**Graphic 2.** Radiation from a flame of methane with air enriched vs. the axial position at a distance of 9.5 cm from the burner port

## 6. CONCLUSIONES

-Se encontró en la simulación y experimentación un aumento en la emisión de la radiación cuando se incrementa el porcentaje de enriquecimiento en el aire, no obstante los bajos niveles de enriquecimiento, lo cual se explica por la mayor temperatura de llama y a las mayores concentraciones de especies radiantes en el infrarrojo (CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O). Esto se evidencia más aún con el aumento del flux de calor radiado por la llama, aunque el área de esta disminuya debido al “achataamiento” provocado por el aumento en la velocidad de deflagración. El aumento del flux es aproximadamente del 12,5% con un enriquecimiento equivalente al 22,5% comparado con la combustión con aire al 21% de oxígeno.

- El pico donde se produce la mayor emisión de radiación, equivale a la zona del frente de llama en la cual se produce la combustión, y por ende se tiene la mayor concentración de especies radiantes y la temperatura más alta que se pueda encontrar en toda el volumen de la llama.

-De la misma manera, se observó una buena coincidencia entre las tendencias encontradas con la simulación y los datos obtenidos con el radiómetro, que aunque los valores no coinciden exactamente, la simulación numérica si se presenta en este caso como una herramienta muy útil para obtener tendencias reales y ahorrar costo y tiempo experimental. En este sentido, es importante resaltar el buen resultado que se obtuvo al utilizar conjuntamente los modelos de las ordenadas discretas y el de la Suma Ponderada de Gases Grises.

-Como se mencionó anteriormente, el flux de calor medido con el radiómetro y la radiación incidente dada por la simulación no son exactamente iguales, pues entre otras cosas, es diferente la radiación colectada por el radiómetro a la radiación emitida por un punto de la llama que da el software.

-Se observó que a medida que se incrementa la concentración de oxígeno en el aire, el frente de llama disminuye su distancia con respecto al puerto, es decir reduce su altura de cono azul, lo cual evidencia el incremento en la velocidad de deflagración.

## 7. AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se realizó bajo el apoyo del Comité para el Desarrollo de la Investigación -CODI- de la Universidad de Antioquia y el Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía de la misma universidad, durante la pasantía como joven investigador en los estudios de pregrado del ingeniero Suárez.

## REFERENCIAS

- [1] AMELL, A., GIL, E. y GOMEZ, E. Combustión del gas y quemadores, Universidad de Antioquia. Facultad de ingeniería, Centro de Extensión Académica CESET, Medellín, 1998.
- [2] AMELL, A. Estimación de las propiedades de combustión de combustibles gaseosos. Universidad de Antioquia, Facultad de

ingeniería. Centro de Extensión Académica CESET, Medellín, 2002.

[3] BAUKAL, C. E. Oxygen-Enhanced Combustion, Air products, CRC Press, USA, 1998. Encontrar en ;a simu;ación y la epxeriemntación

[4] SIEGEL, R. and HOWELL, J.R. Thermal Radiation Heat Transfer, Cuarta edición, Taylor and Francis, New York, 2002.

[5] TRIVIC, D.N. Modeling of 3-D non-gray gases radiation by coupling the finite volume method with weighted sum of gray gases model, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, pp. 1367-1382, 2004.

[6] GLASSMAN, I. Combustion. 3<sup>a</sup> ed. Academic Press, USA, pp. 119-218, 1996.

[7] ISO 6976:1995. Natural gas – Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe index from composition, ISO.

[8] DENISON, M.K. and WEBB, B.W. Development and application of an absorption-line blackbody distribution function for CO<sub>2</sub>, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 38 No 10, pp. 1813-1821, 1995.

[9] LALLEMANT, N., SAYRE, A. and WEBER, R. Evaluation of emissivity correlations for h<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>/air mixtures and coupling with solution methods of the radiative transfer equation, Prog. Energy combustion, Vol. 22, pp. 543-574, 1996.

[10] AMELL, A. Influencia de la altitud sobre la velocidad de deflagración del gas natural, Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, N. 32. pp 72-81, 2004.

[11] LIU, F., GUO, H. and SMALLWOOD G.J. Effects of radiation model on the modeling of a laminar coflow methane/air diffusion flame, Combustion and Flame, 138. pp. 136-154, 2004.

- [12] MALLENS, R. and DE GOEY, L. Flame cooling by a curved burner wall, *International Journal of Heat and Mass transfer*, Vol. 41. No. 65. pp. 699-707, 1998.
- [13] KURDYMOV et al. Experimental and Numerical Study of Premixed Flame Flashback, *Proceedings of Combustion Institute*, No. 31, pp. 1275-1282, 2007.
- [14] KURZ, P.F. Some Factors Influencing Stability Limits of Bunsen Flames, *Combustion and Flame*, Vol. 1 pp 162-178, 1957.
- [15] LEWIS, B. and VON ELBE, G. *Combustion, Flames and Explosions of Gases*. 3a ed, Academic Press, USA, pp. 215-395, 1987.
- [16] MAZUMDER, S. and MODEST M.F. Application of the Full Spectrum Correlated- $k$  Distribution Approach to Modeling Non-Gray Radiation in Combustion, *Gases. Combustion and Flame*, 129. pp. 416-438, 2002.
- [17] BAUKAL, C. and GEBHART, B. Oxygen-enhanced/natural gas flame radiation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 2539-2547, 1997.
- [18] HABIBI, A., MERCI, B. and HEYNDERICKX, G.J. Impact of radiation models in CFD simulations of steam cracking furnaces, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 31, pp. 1389-1406, 2007.
- [19] DESHMUKH, K.V., HAWORTH, D.C. and M.F. MODEST. Direct numerical simulation of turbulence-radiation interactions in homogeneous nonpremixed combustion systems, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, pp. 1641-1648, 2007.
- [20] SAZHIN, S. S., SAZHINA, E. M., FALTSI-SARAVELOU, O. and WILD, P.. The P-1 model for thermal radiation transfer: advantages and limitations, *Fuel*, Vol. 75 No 3, pp. 289-294, 1996.
- [21] KUMAR, S., MAJUMDAR, A. and TIEN, C.L. The Differential-Discrete-Ordinate Method for Solutions of the Equation of Radiative Transfer, *Transactions of ASME*, Vol. 112, pp. 424-429, 1990.
- [22] LAW, C. *Combustion Physics*. Cambridge University Press, USA, pp. 346-362, 2006.
- [23] MISHRA, D.P. Experimental studies of flame stability limits of CNG-air premixed flame, *Indian Institute of Technology, Kanpur, Energy conversion and Management* 48, pp. 1208-1211, 2006.
- [24] FRICKER, N. ¿How do I measure the parameters characterising radiation heat transfer in furnaces?, *IFRF on line Combustion Handbook*, CF 64, 2001.
- [25] TUCKER, R.J. ¿What are high emissivity furnace wall coatings, and how effective are they?, *IFRF on line Combustion Handbook*, CF 99, 2003.
- [26] RENDÓN, J. C. Simulación del efecto de altitud sobre una llama de premezcla parcial [Tesis de maestría]. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia, 2007.
- [27] Fluent, V6.2 Documentations.
- [28] COOMBE, H. and NIEH, S. Polymer membrane air separation performance for portable oxygen enriched combustion applications, *Energy Conversion and Management*, 2007.
- [29] CAMPBELL, J. R. *Las Radiaciones: Reto y Realidades. La Ciencia para Todos*, Segunda impresión, México 2001.
- [30] INCROPERA, F.P. and DE WITT, D.P. *Fundamentos de transferencia de calor*, Cuarta edición, Pearson, México 1999.
- [31] VISKANTA, R. Radiation heat transfer in combustion systems, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 13, Issue 2, Pages 97-160, 1987.
- [32] BISIO, G. BOSIO, A. and RUBATTO, G. Thermodynamics applied to oxygen enrichment of combustion air, *Energy Conversion and Management*, 2001.

[33] COLORADO, A. SÁNCHEZ, M. “Diseño y construcción de un prototipo para la obtención de una combustión sin llama” [Tesis de pregrado]. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia, 2007.

[34] GORDON, G. M. and MCBRIDE, B. J. Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks, and Chapman-Jouguet Detonations. NASA report SP-273. 1971. Citado por Baukal *et al.*

[35] AMELL, A. Influence of altitude on the height of blue cone in a premixed flame, Applied Thermal Engineering, volume 27, Issues 2-3, pages 408-412, 2007.

[36] Berkeley University. Reactional Mechanism GRI-Mech 2.11. Available: [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/). [citado 12 de abril de 2010].