

**EFFECTO DE QUEMADORES DE GEOMETRÍA NO CIRCULAR EN
LLAMAS DE DIFUSIÓN PARA GASES.**

PABLO ERNESTO BARAJAS CORTES



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2007

**EFFECTO DE QUEMADORES DE GEOMETRÍA NO CIRCULAR EN
LLAMAS DE DIFUSIÓN PARA GASES.**

PABLO ERNESTO BARAJAS CORTES

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Directores

SUBRAMANYAM R. GOLLAHALLI
Ph. D. en Ingeniería Mecánica - Universidad de Oklahoma

OMAR A. GÉLVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2007

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, junio de 2007

DEDICATORIA

Este trabajo y todo lo que realizo en mi vida esta dedicado **a Dios**, el que nunca dice que no, **a mi Madrecita linda**, la que me adora con el alma, **a mi hermanito**, el que estará ahí por siempre, **a mi nona Cecilia**, la que siempre espero este momento pero le toco acompañarme desde el cielo al lado de **mi Padre, a mi nona Matilde**, y finalmente a toda mi familia, especialmente **a mi tío Gustavo**, que siempre esta super orgulloso de mi...

PABLO

AGRADECIMIENTOS

Estoy altamente agradecido con el Doctor S.R. Gollahalli, director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Oklahoma por el privilegio de dejarme unir a su grupo de investigación.

Al Ingeniero Omar Gélvez Arocha, Excelente ingeniero mecánico y Docente, director del proyecto, gracias por su respaldo, paciencia y buenos concejos.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad industrial de Santander por estar al nivel de cualquier universidad del mundo.

A mis tíos y tías Alonso, Viviana, Helena, Elisa, a Marthica, a la tía Carmen, Libia, Janet y todos mis primitos, a todos ellos, gracias por haberme ayudado de manera invaluable durante las etapas de mi vida.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES	3
1.1 MARCO TEÓRICO	3
1.1.1 Llamas de Difusión	3
1.1.2 Levitación de Llamas	4
1.1.3 Efectos de Quemadores de Geometría no Circular en Llamas	5
1.1.4 Monóxido de Carbono	6
1.1.5 Oxidos de Nitrógeno	7
1.1.6 Dióxido de Carbono CO_2	9
1.1.7 Concentraciones de O_2	10
1.1.8 Dinámica de Fluidos Computacional	12
1.2 ENFOQUE DE LA PRESENTE INVESTIGACIÓN	16
1.3 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	16
2. DISEÑO DEL BANCO EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTOS	17
2.1 INTRODUCCIÓN	17
2.2 BANCO EXPERIMENTAL	17
2.2.1 Quemadores	17
2.2.2 Suministro de Combustible	19
2.2.3 Cámara de Combustión	26

2.3	INSTRUMENTACIÓN	27
2.3.1	Características Dimensionales	28
2.3.2	Radiación Global	28
2.3.3	Emisiones y Concentraciones Globales	32
2.4	METODOLOGÍA	35
2.5	RESUMEN	38
3.	RESULTADOS	39
3.1	INTRODUCCIÓN	39
3.2	APARIENCIA DE LA LLAMA	39
3.3	CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES DE LA LLAMA	44
3.4	RADIACIÓN GLOBAL DE LA LLAMA	53
3.5	ÍNDICES DE EMISIONES	61
3.6	CONCENTRACIÓN GLOBAL DE O ₂	67
3.7	CONCENTRACIÓN GLOBAL DE CO ₂	70
3.8	RESUMEN	70
4.	TEST EN CFD	73
4.1	INTRODUCCIÓN	73
4.2	GENERACIÓN DE GEOMETRÍAS Y ENMALLADO	73
4.3	ANÁLISIS NUMÉRICO	74
4.4	RESULTADOS	74

CONCLUSIONES	82
RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS	90

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Cuadro 1. Especificación de los Quemadores	18
Cuadro 2. Especificación de los Equipos de Análisis de emisiones	33
Cuadro 3. Condiciones Experimentales Nominales	37
Cuadro 4. Incertidumbre en las Mediciones	37
Cuadro 5. Longitud de Llama Producida por el Quemador Circular	51
Cuadro 6. Longitud de Llama Producida por el Quemador Cuadrado	51
Cuadro 7. Longitud de Llama Producida por el Quemador Triangular	52
Cuadro 8. Incertidumbre Estimada en las Mediciones de Longitud de Llama	52
Cuadro 9. Mediciones de Radiación de la Llama del Quemador Circular	58
Cuadro 10. Mediciones de Radiación de la Llama del Quemador Cuadrado	58
Cuadro 11. Mediciones de Radiación de la Llama del Quemador Triangular	59
Cuadro 12. Comparación de la fracción de radiación de los quemadores según la velocidad de salida de combustible.	60
Cuadro 13. Incertidumbre en Mediciones de Fracción de Radiación	60

Cuadro 14. Índice de Emisiones de NO de Quemadores Circular, Cuadrado y Triangular	65
Cuadro 15. Índice de Emisiones de NO de Quemadores Circular, Cuadrado y Triangular	66
Cuadro 16. Incertidumbre Estimada en las mediciones de Índice de Emisiones	66
Cuadro 17. Concentraciones globales de O ₂ usando Quemadores Circular, Cuadrado y Triangular	69
Cuadro 18. Incertidumbre Estimada en las Mediciones de Concentraciones Globales de O ₂	69
Cuadro 19. Concentraciones globales de CO ₂ usando Quemadores Circular, Cuadrado y Triangular	72
Cuadro 20. Incertidumbre Estimada en las Mediciones de Concentraciones Globales de O ₂	72

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Perfil de temperatura de una llama que levita y una que no levita	5
Figura 2. Interfaz gráfica de GAMBIT 2.01	14
Figura 3. Interfaz de trabajo de FLUENT 6.0	15
Figura 4. Diseño de los Quemadores Usados para los Experimentos.	20
Figura 5. Vista en Corte de la Sección de los Quemadores	21
Figura 6. Vista de Lado en Corte del Quemador Circular Forrado con Quemador Piloto Para Llamas de Hidrogeno no Premezcladas	21
Figura 7. Fotografía de los Tres quemadores Utilizados.	22
Figura 8. Fotografía de la salida los Tres Quemadores Utilizados	22
Figura 9. Fotografía de la entrada de los Tres Quemadores Utilizados	23
Figura 10. Fotografía del Quemador Instalado en La Cámara de Combustión	23
Figura 11. Detalles del Banco Experimental	24
Figura 12. Fotografía del Banco de Pruebas	25
Figura 13. Esquema del Tren de Suministro de Combustible	26
Figura 14. Esquema de la Instrumentación para Mediciones de Radiación de Llama	30

Figura 15. Front Panel de Labview	31
Figura 16. Dlock Diagram del Software Labview	31
Figura 17. Diagrama de Conexión de la Tarjeta SBC-100	32
Figura 18. Esquema de las Medición de Concentraciones y Emisiones Globales	34
Figura 19. Fotografía de los Analizadores de Gases	35
Figura 20. Estructura una llama de difusión de combustibles gaseosos	40
Figura 21. Fotografía de Llamas Producidas por quemadores Circular, Cuadrado y Triangular en Régimen Laminar a una Velocidad de Salida de Combustible de $U_{exit} = 2.62 \text{ m/s}$	41
Figura 22. Fotografía de Llamas Producidas por quemadores Circular, Cuadrado y Triangular en Régimen de transición a una Velocidad de Salida de Combustible de $U_{exit} = 7.87 \text{ m/s}$	42
Figura 23. Fotografía de Llamas Producidas por quemadores Circular, Cuadrado y Triangular en Régimen Turbulrnto a una Velocidad de Salida de Combustible de $U_{exit} = 23.6 \text{ m/s}$	43
Figura 24. Longitud de las Llamas Producidas por Quemadores Circulares y Clasificación de las Zonas según sus Regimenes	45
Figura 25. Longitud de las Llamas Producidas por Quemadores Cuadrados y Clasificación de las Zonas según sus Regimenes	46
Figura 26. Longitud de las Llamas Producidas por Quemadores Triangulares y Clasificación de las Zonas según sus Regimenes	47
Figura 27. Efectos de quemadores Circular, Cuadrado y Triangular en Función de la Velocidad de Salida del Quemador	49
Figura 28. Radiación de las Llamas Producidas por el Quemador Circular en Función de la Velocidad de Salida de Combustible	54

Figura 29. Radiación de las Llamas Producidas por el Quemador Cuadrado en Función de la Velocidad de Salida de Combustible	55
Figura 30. Radiación de las Llamas Producidas por el Quemador Triangular en Función de la Velocidad de Salida de Combustible	56
Figura 31. Radiación y Fracción de Radiación Producidas por Quemadores Circular, Cuadrado y Triangular en Función de la Velocidad de Salida de Combustible	57
Figura 32. Índice de Emisiones de NO Producidas por Quemadores Circular, Cuadrado y Triangular en Función de la Velocidad de Salida de Combustible	62
Figura 33. Índice de Emisiones de CO Producidas por Quemadores Circular, Cuadrado y Triangular en Función de la Velocidad de Salida de Combustible	64
Figura 34. Concentraciones Globales de O ₂ Producidas por Quemadores Circular, Cuadrado y Triangular en Función de la Velocidad de Salida de Combustible	68
Figura 35. Concentraciones Globales de CO ₂ Producidas por Quemadores Circular, Cuadrado y Triangular en Función de la Velocidad de Salida de Combustible	71
Figura 36. Parámetros para el Inyector Circular	76
Figura 37. Parámetros para el Inyector Triangular	76
Figura 38. Geometría y Enmallado del Inyector Circular	77
Figura 39. Geometría y Enmallado del Inyector Triangular	77
Figura 40. Contorno de Velocidad en el Plano Central de Cámara del Inyector Circular.	78
Figura 41. Contorno de Velocidad en el Plano Central de Cámara del Inyector Circular.	78

Figura 42. Contorno de Energía Cinética Turbulenta en el Plano Central de Cámara del Inyector Circular.	79
Figura 43. Contorno de Energía Cinética Turbulenta en el Plano Central de Cámara del Inyector Tri	79
Figura 44. Perfil de Velocidad en el Eje Central de Cámara del Inyector Circular.	80
Figura 45. Perfil de Velocidad en el Eje Central de Cámara del Inyector Triangular.	80
Figura 46. Perfil de Energía Cinética Turbulenta en el Eje Central de Cámara del Inyector Circular.	81
Figura 47. Perfil de Energía Cinética Turbulenta en el Eje Central de Cámara del Inyector Triangular.	81

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Equipo de Calibración	91
Anexo 2. Calculo Tipo	93
Anexo 3. Análisis de de Incertidumbre	98
Anexo 4. Parámetros del Análisis en Fluent 6.0	100

GLOSARIO

EMISIÓN DE GASES: en la emisión de gases participan tres elementos fundamentales, Estos elementos son: combustible, oxígeno y calor. En teoría podría existir una combustión perfecta con una relación de aire a combustible estequiométrica. Aun logrando esta relación se produciría cierto nivel de emisión aunque casi insignificante. Algunas de las emisiones de la combustión son los óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), oxígeno (O_2) y dióxido de carbono (CO_2)

LEVITACIÓN DE LLAMAS: es un fenómeno en el cual la llama se desprende del quemador debido a que la velocidad de salida de combustible supera la velocidad de la llama. Apenas comienza la levitación la llama se desprende progresivamente del quemador hasta llegar a un punto donde la llama se estabiliza, la distancia entre la salida del quemador y la llama se conoce como altura de levitación.

LLAMA DE DIFUSIÓN: llama producida sin mezcla previa del combustible y el oxidante. El combustible y el comburente se mezclan justo en el momento de la combustión.

FRACCIÓN DE RADIACIÓN: el calor liberado por la combustión de un combustible eleva la temperatura del combustible durante la combustión y la de los humos que hace nacer la combustión. Las altas temperaturas producidas hacen que se genere una radiación térmica que está compuesta por un conjunto de radiaciones monocromáticas caracterizadas cada una de

ellas por su longitud de onda y su frecuencia, la fracción de radiación constituye la relación entre el calor que se libera por radiación y el poder calorífico total del combustible y es una manera simplificada de representar la eficiencia de combustión.

NUMERO DE REYNOLDS: es un número adimensional utilizado para caracterizar el movimiento de los fluidos. Como todo número adimensional es un cociente. En este caso es la relación entre las fuerzas convectivas y las fuerzas viscosas.

CONEXIONES SWAGELOK: Son conexiones en acero inoxidable autosellantes para las instalaciones de combustibles gaseosos.

HORIBA: Es un tipo de arena que se utiliza en filtros para remover material particulado que van incluidas en algún gas.

TYGON: Es un tipo de silicona utilizado como material de mangueras para transportar fluidos gaseosos o líquidos.

RESUMEN

TÍTULO:

EFFECTOS DE LA GEOMETRÍA DE QUEMADORES NO CIRCULARES EN LLAMAS DE DIFUSIÓN PARA GASES*

AUTORES:

PABLO ERNESTO BARAJAS CORTES. **

PALABRAS CLAVES:

Combustión, Llamas de Difusión, Levitación de Llamas, Radiación, Emisiones de Gases.

DESCRIPCIÓN:

Con el objetivo de contribuir a la investigación y desarrollo de sistemas de combustión más eficientes y de quema amigable con el medio ambiente, se ha decidido hacer un estudio enfocado a investigar los efectos de quemadores de geometría no circular en las características de las llamas de difusión producidas por combustibles gaseosos. Para este propósito, se construyó un banco de pruebas para quemadores circular, cuadrado y triangular de llamas de difusión con el objetivo de caracterizar las llamas producidas por estos quemadores, a través del análisis dimensional y visual de la llama, análisis de eficiencia de combustión y análisis de gases de combustión para un rango de flujo de combustible que va desde laminar hasta turbulento. Adicionalmente se realizó un test en CFD para observar el comportamiento de la inyección de un combustible gaseoso en un estado estable de aire utilizando inyectores de geometría no circular.

Los resultados del presente estudio sirven como base para la mayoría de industrias las cuales utilizan quemadores de combustibles gaseosos las cuales pueden, según la aplicación, pueden optar por usar nuevas geometrías en el quemador en pro de conseguir niveles de contaminación exigidos por la ley y mejorar la eficiencia de la combustión.

* Trabajo de Grado.

**Escuela de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial, Dr. Subramanyam R. Gollahalli
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Omar Gelvez A.

SUMMARY

TITLE :
EFFECTS OF NON CIRCULAR BURNERS IN GAS DIFFUSION FLAMES FOR GASES

AUTHORS :
Pablo Ernesto Barajas Cortes

KEY WORDS :
Combustion, Diffusion Flames, Flame Liftoff, Radiation, Gases Emission.

DESCRIPTION :
In order to contribute to the Research and Development of new combustion systems with a better efficiency and a cleaner burn, it was decided to do a study focused on researching the effects of non circular burners in gas diffusion flames. For this purpose, an experimental setup for circular, square and triangular burners was built to characterize these types of flames using techniques, such as, dimensional and visual analysis, combustion efficiency analysis and exhaust gases analysis, as a function of fuel exit velocity. Fuel flow ranged from laminar to turbulent condition. In addition, a CFD test was performed to compare the behavior of injection of gas fuel in a quiescent ambient of air using circular and non circular injectors.

The results of the present study are a baseline for the majority of industries which use gas fuel burners, and for a specific application, they may implement new burners geometry either to get contamination levels required by the law, or in order to improve combustion efficiency.

* Senior Thesis.

** School of Aerospace and Mechanical Engineering, Dr. Subramanyam R. Gollahalli
Physical-Mechanical Engineer Faculty, Mechanical Engineering, Eng. Omar Gelvez

INTRODUCCIÓN

Las Emisiones de gases contaminantes como monóxido de carbono, oxido de nitrógeno e hidrocarburos no quemados producidos por automotores e industrias son peligrosos para nuestro ambiente. Por esta razón, las leyes que rigen las emisiones de gases contaminantes se han vuelto más estrictas a través de los años. Como consecuencia, muchas plantas térmicas que usan carbón como combustibles fueron forzadas a usar combustibles más limpios como combustibles gaseosos en lugar de carbón y aceites. La mayoría de estas aplicaciones usan quemadores de tipo difusión, es decir, que el combustible y el aire están separados y se encuentran solo en el momento de la reacción en la cámara de combustión.

Diferentes métodos de control se han estudiado para conseguir reducción de emisiones. Existen dos principales métodos de control para reducir emisiones de contaminantes. El primero es el control activo, el cual incluye métodos que modifican las características de la llama utilizando fuentes externas durante el proceso de combustión, por ejemplo, modificación de las características de la llama a través de campos magnéticos o por fuerzas acústicas. El segundo método es el control pasivo, el cual incorpora cambios en la configuración inicial del sistema de combustión para alterar el comportamiento de las llamas. El control pasivo esta definido por la selección del combustible, la condición en la que el combustible y el oxidante se encuentran, y la geometría del quemador.

La presente investigación utiliza el control pasivo como método para reducir emisiones y mejorar la combustión. Para este propósito se utilizan llamas de difusión producidas por combustible gaseoso a través de quemadores no circulares. Los efectos de de quemadores no circulares en las características de la llama en diferentes velocidades de inyección de combustible son el enfoque de este estudio.

1. GENERALIDADES

1.1 MARCO TEÓRICO

La documentación fue muy útil para el entendimiento del proceso de investigación y la adecuación de técnicas experimentales. Una discusión corta de los tópicos claves es presentada a continuación.

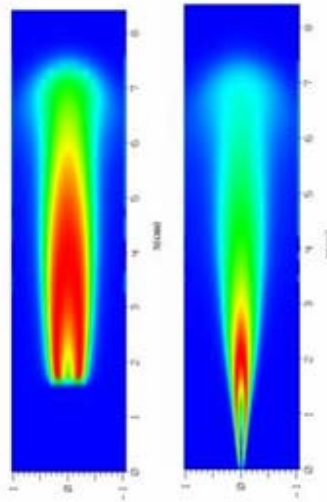
1.1.1 Llamas de difusión. Una llama de difusión es aquella es aquella en la cual el combustible y el oxidante están originalmente sin mezclar. Las llamas parcialmente mezcladas pueden ser tratadas también como llamas de difusión si los límites de inflamabilidad no se consiguen debido a la mezcla imperfecta de combustible y oxidante (Gerstein, 1991). La configuración más común de llamas de difusión es aquella en la que el combustible se inyecta en una corriente de oxidante. La Llama de difusión puede ser homogénea o heterogénea. El combustible y el oxidante están en estado gaseoso en las llamas homogéneas, mientras que en llamas heterogéneas, el combustible puede estar en forma sólida o líquida y el oxidante estar en forma gaseosa. Las llamas de difusión pueden ser laminares o turbulentas. El número de Reynolds es usado para determinar si una llama es laminar o turbulenta. Las llamas laminares han sido usadas para desarrollar un entendimiento de la cinética química y las características de combustión. Diferentes máquinas térmicas como calderas de cocción y hornos utilizan llamas laminares. Las emisiones de gases, la geometría de la llama y la estructura de la llama son parámetros importantes que se deben tener en cuenta en el diseño de estas máquinas térmicas que utilizan llamas de difusión laminares.

La mayoría de las llamas en aplicaciones industriales son turbulentas. Cuando la corriente de combustible que se inyecta en un ambiente estable de oxidante, sucede que la llama se despegue de la punta del quemador cuando la velocidad de salida de

combustible sobrepasa la velocidad crítica. Estas llamas se denominan llamas de difusión en levitación. La velocidad crítica a la cual ocurre este fenómeno es denominada velocidad de levitación y la altura a la cual la llama se estabiliza se llama altura de levitación. Diferentes métodos se utilizan para prevenir la levitación en las llamas de difusión, uno de ellos es utilizando combustibles de baja densidad mezclados con el combustible principal y el otro método es utilizar quemadores de diámetros más pequeños

1.1.2 Levitación de llamas. La levitación en las llamas se presenta cuando la velocidad de salida de combustible excede cierto valor crítico. Más allá de esta velocidad crítica, las llamas se desprenden abruptamente de la salida del quemador y adquiere una nueva posición en la que la llama se estabiliza a cierta distancia aguas arriba. Esta distancia axial es la altura de levitación de la llama, en esta condición se queda gran parte del combustible sin quemar y la eficiencia de combustión disminuye hasta en un 50%. La levitación en las llamas turbulentas de difusión han sido materia de intensa discusión en la literatura en las pasadas cinco décadas. Se han propuesto teorías que van desde propagación de llamas premezcladas (Vanquickenborne y van Tiggelen, 1966) y extinción de llamas de difusión cortas (Peters and Williams, 1983) hasta el mezclado a larga escala (Broadwell et al., 1984). Sin embargo, ninguna de las teorías ha sido probada satisfactoriamente (Pitts, 1986). Recientes experimentos han mostrado que la levitación esta relacionada con parámetros como la presión de inyección, la densidad, la temperatura y la concentración de oxígeno en la cámara de combustión. Diferentes métodos se utilizan para prevenir la levitación en las llamas de difusión, uno de ellos es utilizando combustibles de baja densidad mezclados con el combustible principal y el otro método es utilizar quemadores de diámetros menores. En la figura 1 se puede observar el perfil de temperatura de una llama que levita y una no que levita.

Figura 1. Perfil de temperatura de una llama que levita y una que no levita



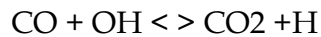
1.1.3 Efectos de quemadores de geometría no circular en llamas. Gollahalli y Subba (1997) estudiaron los efectos de quemadores con puertos de salida triangular en vez del estándar circular, para un quemador de gas natural de llamas laminares parcialmente premezcladas. Los resultados mostraron que los puertos triangulares incrementaron la introducción de aire en menos del 15% e incrementaron las emisiones de CO en 20%.

Gutmark and Grinstein (1999) discutieron el comportamiento del flujo de varios inyectores de geometría no circular y el mecanismo físico pertinente que controla el desarrollo del comportamiento del flujo. La configuración geométrica considerada incluía los efectos de (i) La excentricidad del inyector en inyectores elípticos y rectangulares, (ii) Las esquinas agudas en inyectores rectangulares y triangulares (iii) Generadores de vorticidad axial a la salida del inyector utilizando puertos circulares y no circulares. Varios asuntos fueron encontrados ser comunes para todas las formas no circulares, tales como el cambio de ejes, la variación azimutal, la variación de la capa de

esfuerzos cortantes, la razón de esparcimiento y producción de turbulencia. Se encontró que la evolución de la inyección depende fuertemente de las condiciones iniciales a la salida del inyector. Las características de incremento de introducción de aire y mejora en la mezcla a pequeña escala en las inyecciones no circulares fueron el resultado de complejas interacciones entre vértices azimutales y de corrientes anchas, los cuales son únicos en este tipo de comportamiento de flujo.

Miller et al. (1995) presentó un estudio numérico en el espacio, desarrollando, tres inyecciones dimensionales hechas por inyectores circulares y no circulares de diámetros equivalentes. Se consideraron inyecciones elíptica, rectangular y triangular, con relación de aspecto (relación entre diámetro mayor y diámetro menor) de 1:1 y 2:1 en el caso de la elíptica, el fenómeno de la rotación de eje fue capturado para todas las inyecciones que tienen cociente de aspecto diferente a la unidad y para el inyector triangular. Los resultados indicaron que la mayor formación de producto ocurrió en la inyección triangular isósceles y la más baja ocurrió en la inyección circular.

1.1.4 Monóxido de carbono. Las emisiones de Monóxido de Carbono, son un importante agente contaminante del aire debido a su peligrosidad a la salud humana. El monóxido de carbono (CO) es el resultado de una oxidación incompleta y es producido por la disociación de CO₂. de acuerdo a Fristrom y Westenberg (1965), la zona de reacción de un hidrocarburo premezclado esta dividida en dos zonas, es decir, una zona primaria y una zona secundaria. Debido a la descomposición térmica, radicales libres tales como H, O, and OH son formados en la zona primaria, y es en esta región donde la totalidad del CO es formado. Muchos de los radicales libres se recombinan posteriormente en la zona secundaria formando moléculas, y es en esta región, donde el CO es convertido en CO₂. la cinética del CO en las llamas de acuerdo con Fenimore (1963) están dadas por la siguiente reacción.

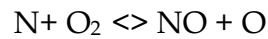


Factores tales como, la estequiometria, la cinética química y la oxidación, controlan la cantidad de CO_2 formada en una llama. Una cantidad inadecuada de oxígeno disponible para la combustión puede producir cantidades considerables de CO en llamas ricas en combustible. Las emisiones de CO también se correlacionan fuertemente con la luminosidad de la llama y con el hollín en la llama. Varios estudios mostraron la correlación entre las emisiones de CO y NO_x . Ambos pueden competir por el oxígeno y por lo tanto puede haber casos en los que cualquiera de estos agentes contaminantes se puede incrementar o disminuir simultáneamente. Kolluri et al. (1993) y Kamal y Gollahalli (1993), en sus experimentos sobre geometrías no circulares, han mostrado que geometrías no circulares pueden reducir la formación de CO y NO_x .

1.1.5 Óxidos de nitrógeno. Los óxidos de nitrógeno, tales como, óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2) son los agentes contaminantes comúnmente relacionados con el nitrógeno. Los óxidos de nitrógeno pueden causar nieblas de humo fotoquímicas, calentamiento global y lluvia ácida. El óxido nítrico es formado por medio de tres mecanismos químicos (Bowman, 1991): (i) Oxidación de nitrógeno atmosférico a través del mecanismo térmico de Zeldovich, (2) Oxidación del nitrógeno contenido en componentes orgánicos combustibles fósiles, a través del mecanismo NO combustible, (3) Mecanismo NO pronto

NO_x Térmico. NO_x térmico se refiere al NO_x formado a través de la oxidación de nitrógeno diatómico que se encuentra en el aire de combustión a altas temperaturas. La tasa de formación es principalmente función de la temperatura y del tiempo de residencia del nitrógeno a esa temperatura. A altas temperaturas, usualmente por encima de 1600°C (2900°F), el nitrógeno molecular (N_2) y el oxígeno (O_2) en el aire de combustión se disocian hasta sus estados atómicos y participan en una serie de reacciones.

Las tres principales reacciones para producir NO_x térmico son:
(Mecanismo Extendido de Zeldovich)



Todas las tres reacciones son reversibles. Zeldovich fue el primero en sugerir la importancia de las dos primeras reacciones. La última reacción de nitrógeno atómico con el radical Hidroxil fue añadida al mecanismo por Lavovie, Heywood y Keck, y tiene gran importancia en formación de NO_x térmico.

Combustible NO_x. La fuente principal de la producción de NO_x de los combustibles que contienen nitrógeno tales como ciertos carbones y aceites es la conversión del nitrógeno encuadrado en el combustible a NO_x durante la combustión. Durante la combustión, la capa de nitrógeno contenido en el combustible es liberada como un radical libre y ultimadamente forma N₂ libre o NO. Combustible NO_x puede contribuir hasta con el 50% de las emisiones totales cuando se están quemando aceites y hasta un 80% cuando se quema carbón.

Aunque el mecanismo completo no se entiende completamente, hay dos trayectorias primarias de formación. El primer implica la oxidación de la especie volátil del nitrógeno durante las etapas iniciales de la combustión. Durante el lanzamiento y antes de la oxidación de los volátiles, el nitrógeno reacciona para formar varios intermediarios que entonces se oxidan en NO. Si los volátiles se desarrollan en una atmósfera reductora, el nitrógeno desarrollado se puede hacer fácilmente para formar el gas del nitrógeno, en vez de NO_x. La segunda trayectoria implica la combustión del nitrógeno contenida en la matriz del carbón durante la combustión de la porción del

carbón de los combustibles. Esta reacción ocurre mucho más lentamente que la fase volátil. Solamente alrededor del 20% del nitrógeno del carbón se emite en última instancia como NO_x, puesto que mucho del NO_x que forma durante este proceso es reducido a nitrógeno por el carbón, que es carbón aproximadamente puro.

NO_x Pronto. Esta tercera fuente se atribuye a la reacción del nitrógeno atmosférico, N₂, con los radicales tales como fragmentos C, CH y CH₂ derivados del combustible, donde esto no se puede explicar por los procesos ya mencionados el térmico o el combustible. Ocurriendo en la primera etapa de la combustión, esto da lugar a la formación de la especie fija de nitrógeno tales como NH (monohidrido de nitrógeno), HCN (cianuro de hidrógeno), H₂CN (cianuro de dihidrogeno) y CN (chloracetophenone o gas de CN) que puedan oxidar a NO.

En los combustibles que contienen el nitrógeno, la incidencia de NO_x pronto es especialmente mínima y generalmente se presenta en casos de combustión compleja, donde aun quedan fragmentos sin reaccionar con el nitrógeno propio del combustible. Chemical and Engineering News, (2006).

1.1.6 Dióxido de carbono. El dióxido de carbono (CO₂) es un gas incoloro, denso y poco reactivo. Forma parte de la composición de la troposfera (capa de la atmósfera más próxima a la Tierra) actualmente en una proporción de 350 ppm. (partes por millón). Su ciclo en la naturaleza está vinculado al del oxígeno. El balance del dióxido de carbono es sumamente complejo por las interacciones que existen entre la reserva atmosférica de este gas, las plantas que lo consumen en el proceso de fotosíntesis y el transferido desde la tropósfera a los océanos. El aumento del contenido de dióxido de carbono que se verifica actualmente es un componente del cambio climático global, y posiblemente el mejor documentado. Desde mediados del siglo XIX hasta hoy, el aumento ha sido de 80 ppm.

El análisis de gases retenidos en muestras de hielo obtenidas a distintas profundidades en Antártida y Groenlandia, ha permitido conocer la concentración de dióxido de carbono atmosférico, y de otros gases del llamado efecto invernadero, durante por lo menos los últimos 150.000 años. Estas concentraciones han variado en la escala temporal de las glaciaciones, con concentraciones bajas durante los períodos glaciales (temperaturas bajas) y relativamente altas durante los períodos interglaciales (temperaturas altas), con transiciones rápidas tanto en la variación de la temperatura como de la concentración de dióxido de carbono. Se ha discutido si este aumento del contenido de dióxido de carbono atmosférico corresponde o no a estas fluctuaciones naturales, dado que transitamos por un período postglacial. A partir de la misma fuente de información, las burbujas de gas retenidas en hielos de diferentes edades, se ha comprobado que el actual incremento de la concentración de dióxido de carbono se superpone a la variación esperada del mismo y los niveles alcanzados superan a los registrados en el pasado, siendo el aumento sustancial y acelerado durante los últimos 160 años e indudablemente causado por la actividad humana.

Se estima que este aumento es causado por una concurrencia de factores entre los cuales el uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo y derivados, gas) y las quemaduras con fines agrícolas pueden señalarse como los más significativos. Se calcula que este aumento del nivel de dióxido de carbono ocasione cambios climáticos considerables.

1.1.7 Concentraciones de O₂. Es un elemento gaseoso ligeramente magnético, incoloro, inodoro e insípido. El oxígeno es el elemento más abundante en la Tierra. Fue descubierto en 1774 por el químico británico Joseph Priestley e independientemente por el químico sueco Carl Wilhelm Scheele; el químico francés Antoine Laurent de Lavoisier demostró que era un gas elemental realizando sus experimentos clásicos sobre la combustión.

Propiedades y estado natural. El oxígeno gaseoso se condensa formando un líquido azul pálido fuertemente magnético. El oxígeno sólido de color azul pálido se obtiene comprimiendo el líquido. La masa atómica del oxígeno es 15,9994; a la presión atmosférica, el elemento tiene un punto de ebullición de $-182,96\text{ }^{\circ}\text{C}$, un punto de fusión de $-218,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una densidad de $1,429\text{ g/l}$ a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El oxígeno constituye el 21% en volumen o el 23,15% en masa de la atmósfera, el 85,8% en masa de los océanos (el agua pura contiene un 88,8% de oxígeno), el 46,7% en masa de la corteza terrestre (como componente de la mayoría de las rocas y minerales). El oxígeno representa un 60% del cuerpo humano. Se encuentra en todos los tejidos vivos. Casi todas las plantas y animales, incluyendo los seres humanos, requieren oxígeno, ya sea en estado libre o combinado, para mantenerse con vida.

El oxígeno está presente en muchos compuestos orgánicos e inorgánicos. Forma compuestos llamados óxidos con casi todos los elementos, incluyendo algunos de los gases nobles. La reacción química en la cual se forma el óxido se llama oxidación. La velocidad de la reacción varía según los elementos. La combustión ordinaria es una forma de oxidación muy rápida. En la combustión espontánea, el calor desarrollado por la reacción de oxidación es suficientemente grande para elevar la temperatura de la sustancia hasta el punto de producir llamas. Por ejemplo, el fósforo combina tan vigorosamente con el oxígeno, que el calor liberado en la reacción hace que el fósforo se funda y arda. Algunas sustancias finamente divididas presentan un área tan grande de superficie al aire, que arden formando llamas por combustión espontánea; a éstas se las llama sustancias pirofóricas. El azufre, el hidrógeno, el sodio y el magnesio combinan con el oxígeno menos energéticamente y sólo arden después de la ignición. Algunos elementos como el cobre y el mercurio reaccionan lentamente para formar los óxidos, incluso cuando se les calienta. Los metales inertes, como el platino, el iridio y el oro únicamente forman óxidos por métodos indirectos.

Aplicaciones. Se usan grandes cantidades de oxígeno en los sopletes para soldar a alta temperatura, en los cuales, la mezcla de oxígeno y otro gas produce una llama con una temperatura muy superior a la que se obtiene quemando gases en aire. El oxígeno se le administra a pacientes con problemas respiratorios y también a las personas que vuelan a altitudes elevadas, donde la baja concentración de oxígeno no permite la respiración normal. El aire enriquecido con oxígeno se utiliza para fabricar acero en los hornos de hogar abierto.

El oxígeno de gran pureza se utiliza en las industrias de fabricación de metal. Es muy importante como líquido propulsor en los misiles teledirigidos y en los cohetes.

1.1.8 Dinámica de fluidos computacional (CFD). Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una de las ramas de la Mecánica de Fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que envuelven flujo de fluidos. Los computadores son utilizados para hacer millones de cálculos requeridos para simular la interacción entre fluidos y gases con superficies complejas usadas en ingeniería. De todas formas, incluso, con ecuaciones simplificadas y súper computadores, en la mayoría de los casos solo se consigue aproximaciones del resultado real. Dentro de las investigaciones en curso se encuentra el desarrollo de códigos más exactos que puedan simular exactamente y rápidamente panoramas complejos tales como flujos supersónicos o turbulentos. La validación de tales códigos se realiza a menudo usando un túnel de viento.

La consideración mas fundamental en CFD, es la forma como se trata un fluido continuo de una manera discreta en un computador. Una manera de discretizar el dominio espacial, es utilizando celdas pequeñas que forman una malla volumétrica o una red, y luego aplicar un algoritmo para resolver las ecuaciones de transporte

(ecuaciones de Euler de flujo no viscosos y ecuaciones de Navier-Stokes para flujo viscoso). Además esta malla puede ser irregular (por ejemplo formada por triángulos en 2D, o sólidos piramidales en 3D) o regular; las características de lo anterior es que cada celda se almacena en la memoria de manera separada. Donde se presentan cambios de secciones o discontinuidades, son necesarias una alta resolución en los esquemas numéricos para evitar convergencias falsas en la solución.

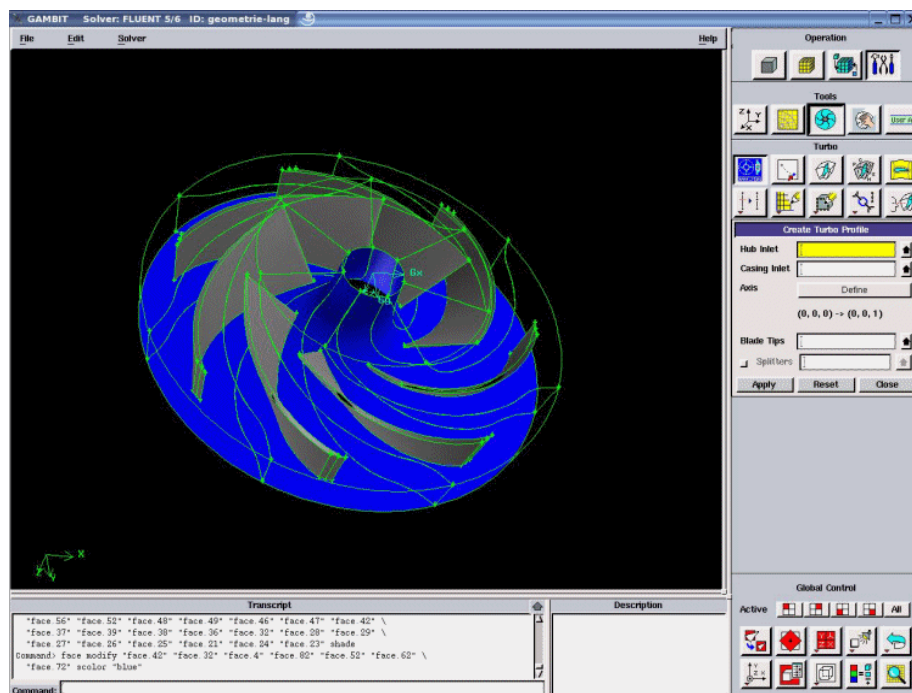
Metodología. En todos estos análisis se sigue el mismo procedimiento básico.

1. La geometría (límites físicos) del problema se define.
2. El volumen ocupado por el líquido se divide en las células discretas (el acoplamiento). El acoplamiento puede ser uniforme o no uniforme.
3. Se define el modelo de comprobación, es decir, las ecuaciones de transporte, de entalpía, de la conservación de la especie, etc.
4. Se definen las condiciones de límite. Esto implica el especificar del comportamiento y de las características fluidos en los límites del problema. Para los problemas transitorios, las condiciones iniciales también se definen.
5. Las ecuaciones se solucionan en forma iterativa en un estado estacionario o transitorio.
6. Análisis y visualización de la solución que resulta.

GAMBIT 2.01- Generación de geometrías y mallas. GAMBIT es un software generador de geometrías y de mallas para FLUENT. La sola interfaz de GAMBIT para la creación de geometría y mallas, reúne la mayor parte de tecnologías de preproceso para los diferentes ambientes de FLUENT. La combinación de modelamiento en CAD, limpieza de geometría, herramientas de descomposición y enmallado hacen que GAMBIT sea una de las herramientas mas fáciles, rápidas y directas para hacer desde el enmallado el CAD hasta el modelamiento de una excelente calidad

Como preprocesador de última tecnología para análisis ingenieril, GAMBIT tiene muchas herramientas geométricas y de enmallado con un interfaz poderosa, flexible, firmemente integrada y fácil de usar. GAMBIT puede reducir dramáticamente el tiempo de preproceso para muchas aplicaciones. La mayoría de aplicaciones pueden ser construidas dentro del modelador de geometría sólida de GAMBIT o importadas de la mayoría de sistemas CAE/CAM. Las geometrías importadas son rápidamente convertidas en un ambiente conveniente de dominio de flujo, utilizando un dibujador geométrico virtual y herramientas avanzadas de limpieza. Un comprensivo sistema de generación de mallas automatizado y funciones de dimensionado de las mallas asegura que se pueda generar la mejor malla, ya sea estructurada, multibloque, no estructurada o híbrida. El rango de lectura de CAD que tiene GAMBIT le permite traer cualquier geometría, libre de error, dentro de un ambiente de enmallado en la figura 2 se observa la interfaz de trabajo de GAMBIT 2.01.

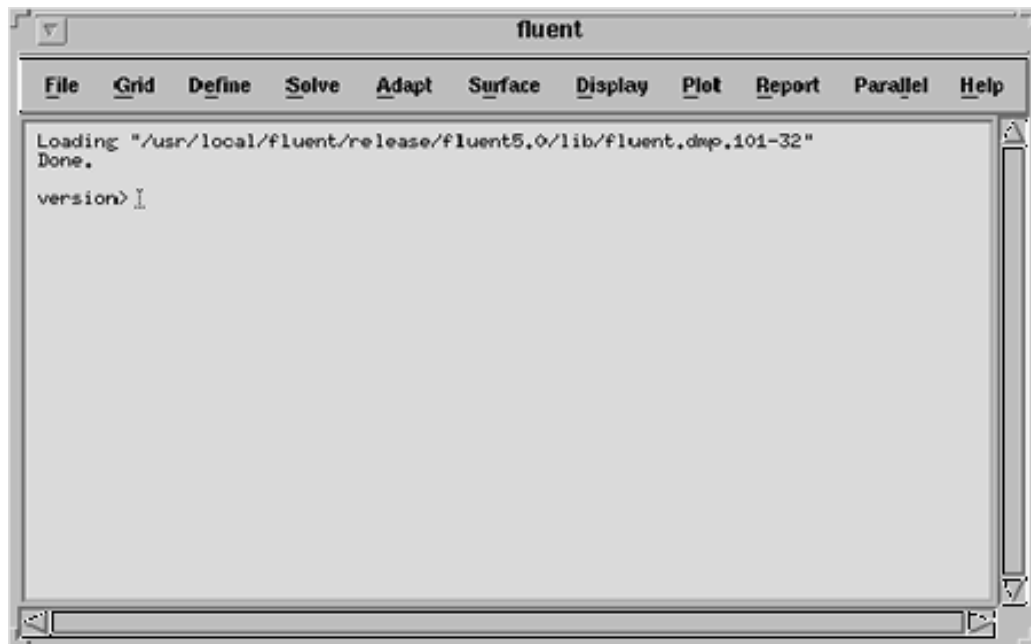
Figura 2. Interfaz grafica de GAMBIT 2.01



FLUENT 6.0. Fluent es el paquete de simulación en dinámica de fluidos computacional (CFD) de propósito general de mayor uso en el mundo, con un respaldo de más de 25 años de desarrollo llevado a cabo por Fluent Inc. quienes están certificados bajo los estándares internacionales ISO 9001 y TickIT.

La estructura de Fluent le ha permitido incorporar una gran cantidad de modelos para diferentes procesos físicos y químicos que le dan una enorme versatilidad. De esta manera, no sólo podrá usted realizar simulaciones de flujos laminares o turbulentos, newtonianos o no newtonianos, compresibles o incompresibles, monofásicos o multifásicos, sino también procesos de transferencia de calor por radiación, conducción y por supuesto por convección, así como procesos de fundición y con reacciones químicas, como combustión de gases, líquidos y combustibles sólidos.

Figura 3. Interfaz de trabajo de FLUENT 6.0



1.2 ENFOQUE DE LA PRESENTE INVESTIGACIÓN

La mayoría de los estudios experimentales en llamas de difusión producidas por inyección de gas se enfocan en geometrías de quemadores circulares y solo cubren el rango laminar. El enfoque primario de esta investigación está en los efectos de quemadores de geometría no circular, usando quemadores de geometría cuadrada y triangular. Estos efectos se estudian caracterizando características de la combustión tales como, apariencia de las llamas, la radiación global y las emisiones globales para diferentes condiciones de flujo de combustible.

1.3 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

La documentación relacionada a los quemadores de geometría no circular en llamas de difusión para gases son presentadas en este capítulo. El banco de pruebas, instrumentación y procedimiento experimental son presentados en el capítulo 2. El capítulo 3 se discuten los resultados obtenidos. El capítulo 4 muestra un análisis en CFD de la inyección de combustible gaseoso en un estado estable de aire usando un inyector circular y triangular. Por último se presentan las conclusiones más importantes arrojadas por la presente investigación, la bibliografía y los anexos.

2. DISEÑO DEL BANCO EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTOS

2.1 INTRODUCCIÓN

Todos los experimentos fueron realizados en el Laboratorio de Combustión y Dinámica de la Llama de la Universidad de Oklahoma. Este capítulo explica los equipos, la instrumentación, el software y la metodología utilizada en los experimentos. También contiene la descripción del banco de pruebas, cámara de combustión, quemadores, sistema de combustible y equipos de medición incluyendo modelos hechos en CAD.

2.2 BANCO EXPERIMENTAL

2.2.1 Quemadores. Se utilizaron tres configuraciones de quemadores de propano durante los experimentos: un quemador de sección circular, un quemador de sección cuadrada y un quemador de sección triangular. Todas las pruebas fueron conducidas con los quemadores orientados verticalmente apuntando hacia el ducto de salida de los gases de escape (ver figura 13). Todos los tres quemadores fueron enfundados en un quemador circular de hidrogeno no premezclado, el cual fue utilizado para estabilización de la llama.

Las especificaciones de los quemadores están dadas en la cuadro 1. Las figuras 4, 5 y 6 ilustran los planos los quemadores desde diferentes perspectivas. El quemador de sección circular fue hecho de un tubo de acero inoxidable de 62 mm de longitud con un diámetro interno de 2 mm. El quemador cuadrado se fabrico a través de maquinado CNC utilizando una barra de acero inoxidable de 5 mm de diámetro 62 mm de longitud para darle forma interna de quemador cuadrado de lado de 1.77 mm. El quemador triangular se fabrico mediante maquinado CNC utilizando una barra de

Cuadro 1. Especificaciones de los Quemadores

<i>Quemador Circular de Propano</i>	
Diámetro Interno de la Salida del Quemador (ID) [mm]	2.00
Diámetro Externo de la Salida del Quemador (OD) [mm]	6,35
Perímetro de la Salida del Quemador [mm]	6.28
Área de Salida del Quemador [mm ²]	3.14
Longitud [mm]	62.00
<i>Quemador Cuadrado de Propano</i>	
Dimensión del lado de la Salida del Quemador [mm]	1.77
Diámetro Externo de la Salida del Quemador (OD) [mm]	6,35
Perímetro de la Salida del Quemador [mm]	7.08
Área de Salida del Quemador [[mm ²]	3.14
Diámetro hidráulico de la Salida del Quemador [mm]	1.77
Longitud [mm]	62.00
<i>Quemador Triangular de Propano</i>	
Dimensión de la base de la Salida del Quemador [mm]	2.69
Diámetro Externo de la Salida del Quemador (OD) [mm]	6,35
Dimensión de la altura de la Salida del Quemador [mm]	2.33
Perímetro de la Salida del Quemador [mm]	8.08
Área de Salida del Quemador [mm ²]	3.14
Diámetro hidráulico de la Salida del Quemador [mm]	1.55
Longitud [mm]	62.00
<i>Quemador Piloto Circular de Hidrogeno</i>	
Diámetro Interno de la Salida del Quemador (ID) [mm]	8.00
Diámetro Externo de la Salida del Quemador (OD) [mm]	12,7
Longitud [mm]	62.00

acero inoxidable de 5 mm de diámetro y 62 mm de longitud, dándole la forma interna de quemador triangular de base 2,69 mm y altura 2,33. Las áreas de la sección transversal a la salida de los quemadores son equivalentes. La funda circular para el quemador piloto de hidrogeno fue hecha de un tubo de acero inoxidable de diámetro interno de 8 mm. La salida del quemador principal fue puesta al mismo nivel que la salida de la funda para quemar hidrogeno. La funda y el quemador principal fueron desbastados en su salida para tener aristas filosas y eliminar los efectos de arista. El quemador principal fue acoplado a un conector hembra marca Swagelok para facilitar la adecuación de la funda de hidrogeno, la cual fue soldada al conector Hembra

utilizando soldadura de acero inoxidable. A la funda de hidrogeno se le acoplo la línea de entrada de hidrogeno la cual fue soldada a 90° de la funda, a la funda En las Figuras 7 a la 10 se muestran las fotografías de los quemadores fabricados. Cada quemador tenía su funda y el sistema de conexión permitía un fácil montaje y desmontaje del quemador principal acoplado al quemador piloto.

2.2.2 Suministro de combustible. Las Figuras 11 a 13 muestran los detalles del banco experimental y el esquema del tren de suministro de combustible. Tanto el propano como el hidrógeno que fueron suministrados a los quemadores, provenían de cilindros de gas comercial, usando tubería de tygon para el transporté y calibrados a través de rotametros. Un tubo de acero inoxidable de de 21 pulgadas de longitud fue usado para atar el sistema a una base para mantener el quemador verticalmente. Conexiones Swagelok fueron usadas para unir este largo tubo a los quemadores. El propano e hidrogeno no fueron premezclado en el tren de suministro de combustible como se aprecia en la figura 13. Para el control de la presión del combustible se emplearon reguladores para mantener una presión constante corriente arriba de 8 psi para el propano y de 13 psi para el hidrogeno (ver figura 13). El rotametro usado para el propano fue un LoFlo SK ¼" 15-G-5 con un flotador de zafiro. Estos rotametros fueron seleccionados según el catalogo teniendo en cuenta el rango de flujo que iba a ser utilizado. el rotametro de hidrogeno fue un LoFlo SK ¼" 15-G-5 con un flotador de vidrio negro. El rotametro de propano fue calibrado usando flujometro de calibración de la compañía Dry Cal. los datos de la calibración de los rotametros de propano e hidrogeno se encuentra en las figuras A1.1 y A1.2 en el anexo 1.

Figura 4. Diseño de los quemadores (a) quemador piloto de hidrogeno, (b) quemador circular, (c) quemador cuadrado y (d) quemador triangular.

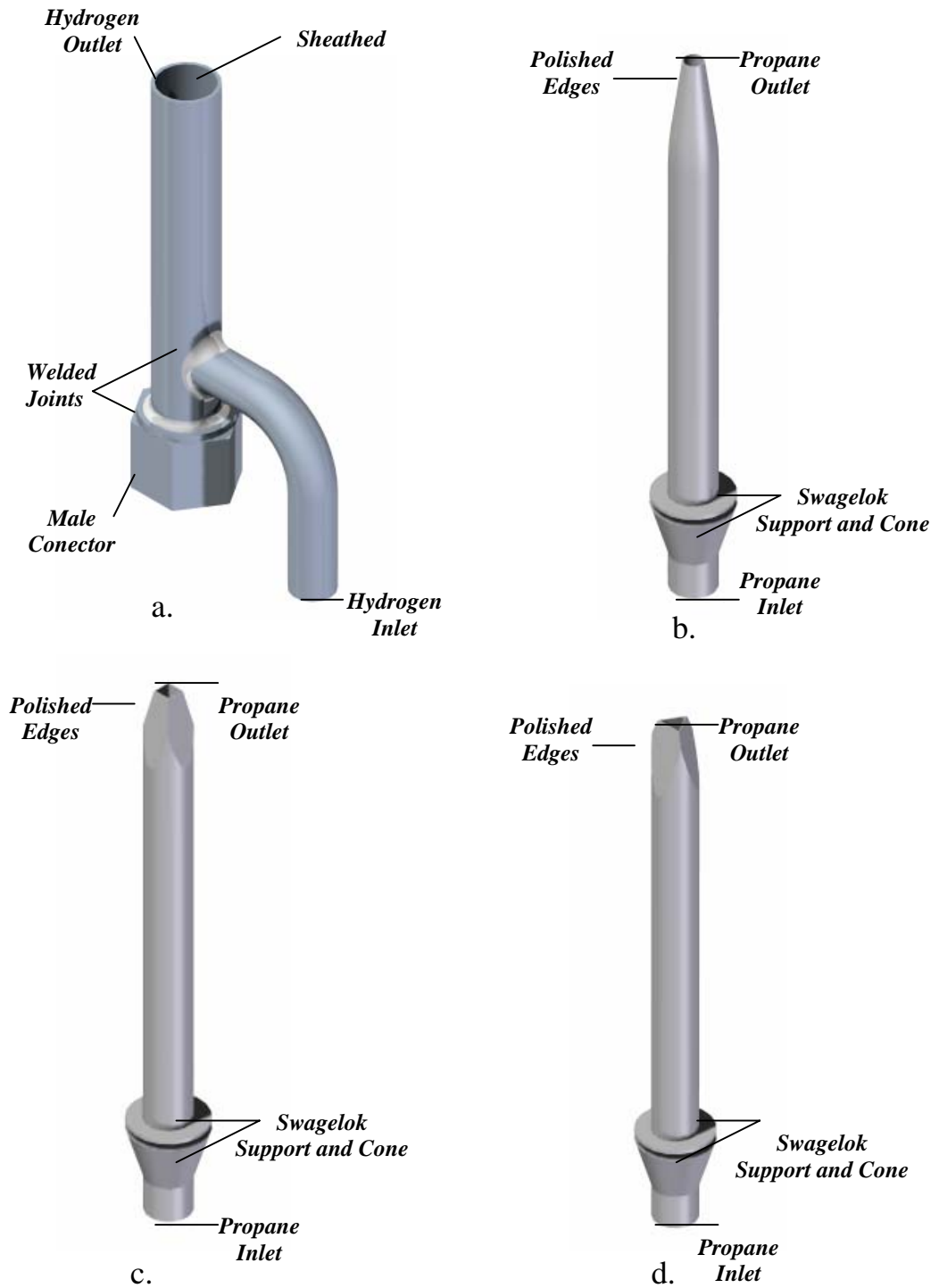


Figura 5. Vista en Corte de la Sección de los Quemadores a. Quemador Funda de Hidrogeno. b. Quemador Triangular, c. Quemador circular y d. Quemador Cuadrado.

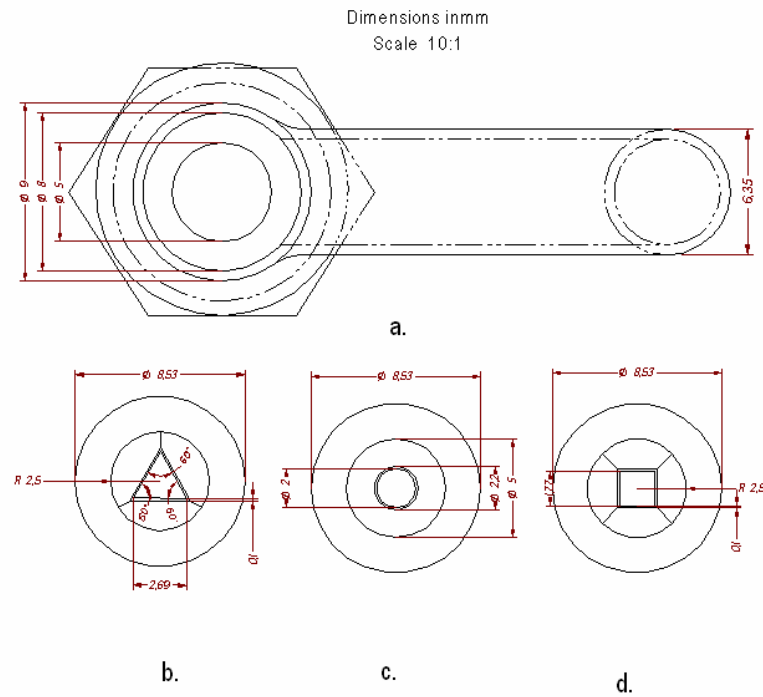


Figura 6. Vista de lado en Corte del Quemador Circular Forrado con Quemador Piloto Para Llamas de Hidrogeno no Premezcladas

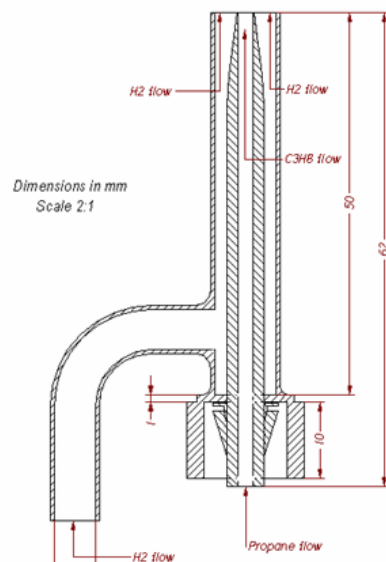


Figura 7. Fotografía de los Tres quemadores Utilizados.



Figura 8. Fotografía de la salida los Tres Quemadores Utilizados



Figura 9. Fotografía de la entrada de los Tres Quemadores Utilizados



Figura 10. Fotografía del Quemador Instalado en La Cámara de Combustión



Figura 11. Detalles del Banco Experimental

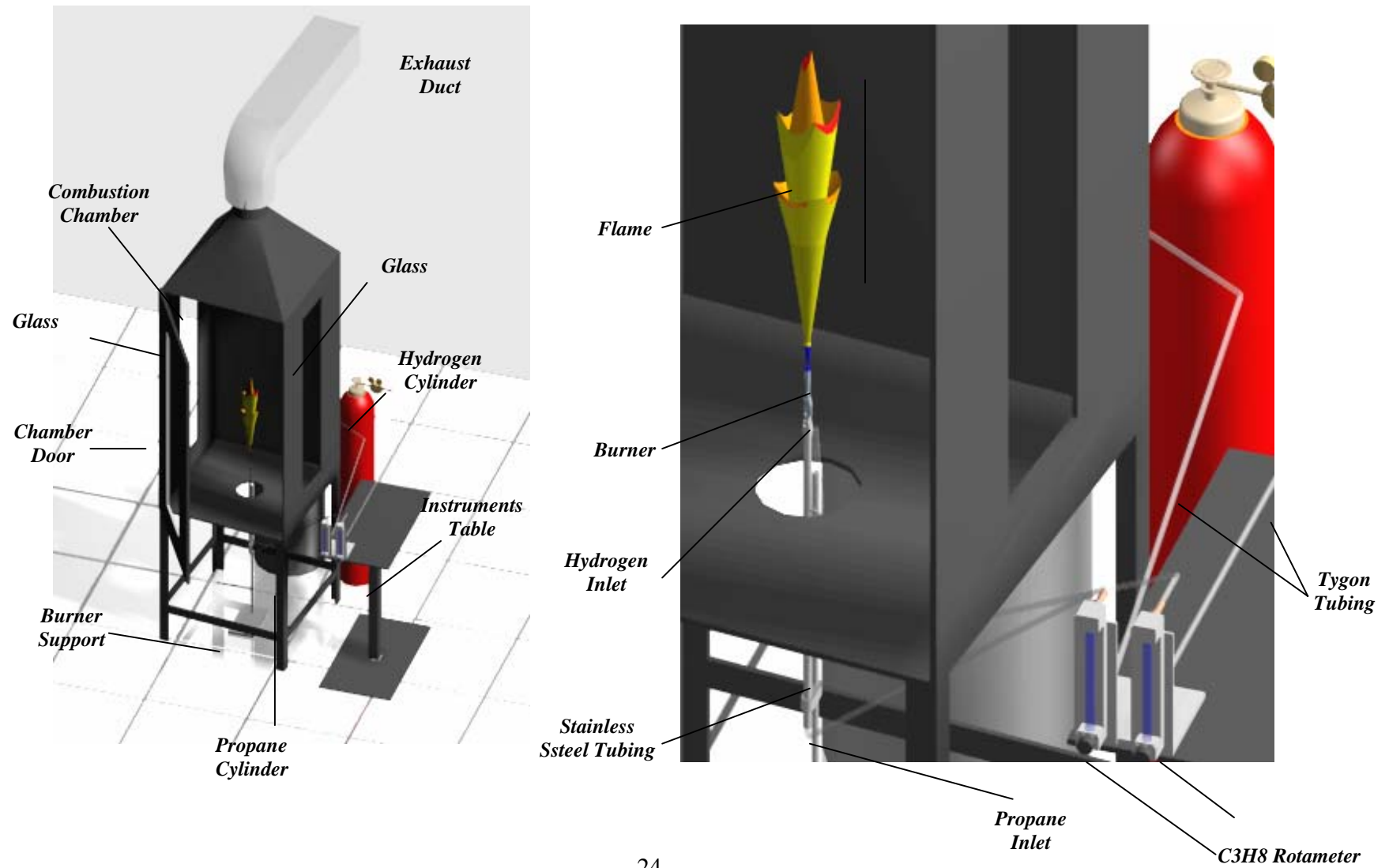
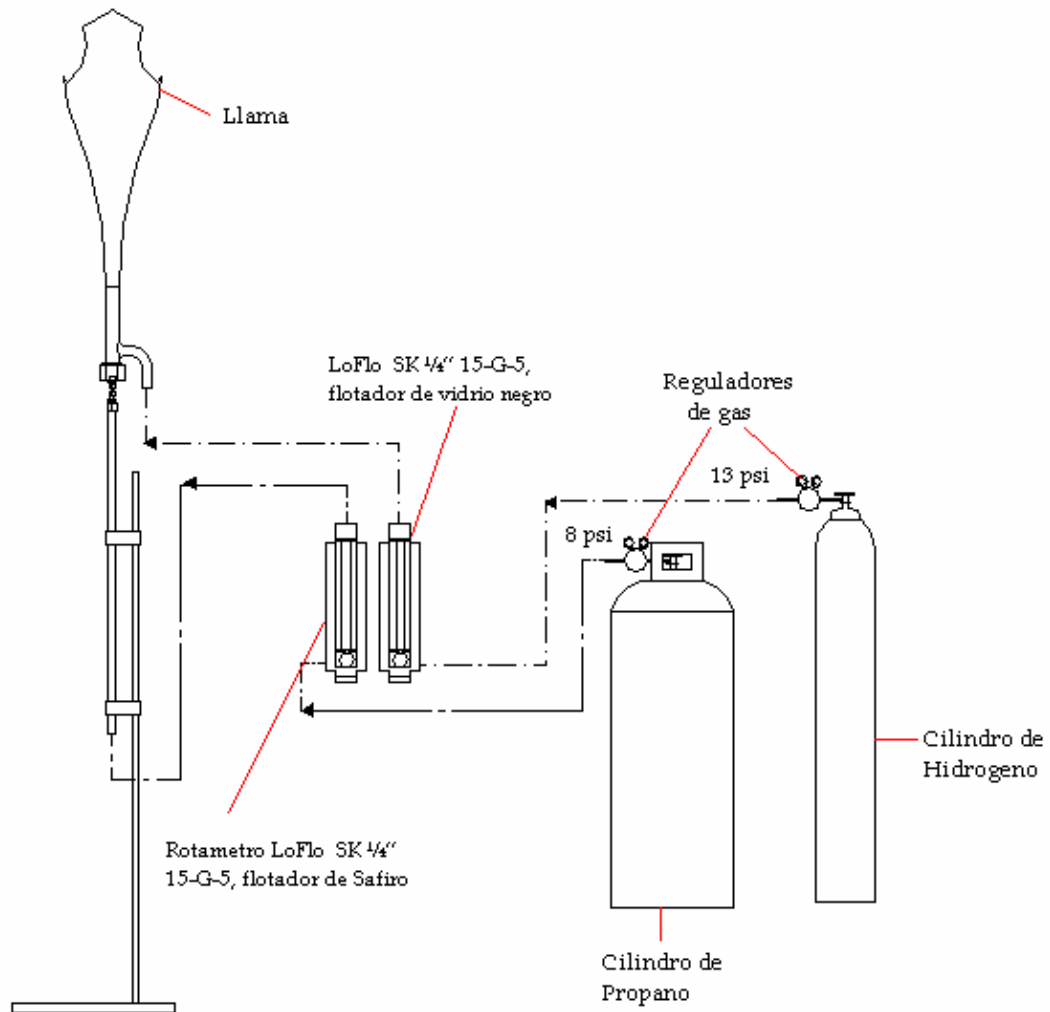


Figura 12. Fotografía del Banco de Pruebas



Figura 13. Esquema del Tren de Suministro de Combustible



2.2.3 Cámara de combustión. Todos los experimentos se llevaron a cabo en una cámara de combustión vertical hecha de acero bajo condiciones relativamente estables de corrientes bruscas de aire. La Figura 11 presenta un modelo de la cámara y en la figura 12 se muestran fotografías de la cámara de combustión usada en el banco de pruebas. La cámara de combustión fue hecha de laminas de acero de 6.4 mm de espesor y tiene un área seccional cuadrada de 76,2 cm x 76,2 cm y una altura de 162.56 cm. La cámara fue ensamblada con ventanas rectangulares de 144.78 cm x 35.05 en tres de sus

paredes. Una de las paredes de la cámara fue diseñada como una puerta rotatoria para proveer fácil acceso al interior de la cámara.

La base inferior de la cámara tiene una perforación de 20 cm en su centro para alimentar las líneas del combustible e introducir el soporte de los quemadores. Después de montado quemador a que se estaba analizando, se cubrían con cinta de aluminio los espacios sobrantes del agujero para evitar corrientes bruscas de aire que afectaran la estabilidad de la llama. Entre cada una de las 4 paredes de la cámara y la base inferior hay un espaciamiento mínimo para permitir el flujo de aire hacia el interior de la cámara sin afectar la estabilidad de las llamas. La parte superior de la cámara fue comunicada con la atmósfera utilizando un ducto flexible de aluminio. El laboratorio es mantenido a una presión positiva de 22.7 Pa más grande que la presión atmosférica local para garantizar la introducción de aire hacia la cámara y prevenir fugas de los gases de escape hacia el interior del laboratorio.

2.3 INSTRUMENTACIÓN

La caracterización de combustión se puede llevar cabo midiendo diferentes propiedades de la llama para cada condición de flujo. Dichas mediciones incluyen:

- ◇ Características dimensionales.
- ◇ Radiación global y fracción de radiación.
- ◇ Índice de emisiones y concentraciones globales.

A continuación se presenta la descripción del montaje y la metodología de los experimentos para medir las características de la llama.

2.3.1 Características dimensionales. Para calcular la longitud de la llamas, fueron tomadas fotografías digitales para cada configuración de quemador a 20 diferentes velocidades de salida de combustible. Se uso una cámara digital (CANON EOS 350D) con una velocidad del obturador de 1 segundo. La velocidad del obturador fue escogida para tener suficiente tiempo de exposición, y así adquirir longitudes de llamas mas precisas. Las fotografías fueron tomadas con la cámara orientada perpendicularmente al eje vertical del quemador. Fueron tomadas imágenes para cada configuración de velocidad de salida del combustible. Con el objetivo de relacionar los píxeles de la fotografía a una dimensión de longitud, se tomo una fotografía de un flexometro estándar ubicado al lado del quemador para cada configuración de zoom de la cámara. Para determinar la longitud de la llama, se midió el número de píxeles desde la salida del quemador hasta donde terminaba el color amarillo brillante de la llama, utilizando un programa de dibujo llamado Gimp 2.0. Con las longitudes de las llamas en píxeles, fueron entonces convertidas a un valor dimensional basado en la relación entre píxeles y unidades de longitud dada por la fotografía al flexometro.

Se tomaron un total de 240 fotos para todas las configuraciones, incluyendo los tres tipos de quemadores y las 20 velocidades de salida de combustible de cada quemador. Para cada condición de velocidad de salida de combustible, fueron halladas 4 longitudes de llama, con base en las 4 fotografías tomadas a esta condición de velocidad de salida de combustible, seguidamente se promediaron los 4 valores y de esta manera se determino la longitud de llama para esa condición. Adicionalmente se realizo un análisis de incertidumbre para cada medición.

2.3.2 Radiación global. Las mediciones de radiación total de la llama fueron tomadas usando un pirheliómetro (Hy-Cal Engineering Model P-8410-B-10-

120-XC400) y una tarjeta de adquisición de datos SBC-100 junto con un programa en Labview. Este sistema de adquisición de datos es proveído por National Instruments Para la toma de datos se utilizo un tiempo de muestreo de 4 segundos para cada condición de velocidad de salida de combustible a una frecuencia de muestreo de 60 Hertz. La figura 14 muestra el esquema del sistema de medición de radiación y las figuras 15, 16 y 17 muestran el programa en Labview y la interfase utilizada para leer los valores de radiación provenientes del pirheliómetro. Los datos de salida del sistema de ad fueron convertidos de milivoltios a Watts por metro cuadrado usando la grafica de calibración proveída por Hy-Cal Engineering, en la cual se indica la relación entre constantes solares y milivoltios, la grafica de calibración es mostrada en la figura A.1.3 en el apéndice 1. el numero de constantes solares fueron convertidos a flujo de calor por radiación por medio de la relación $1 SC = 1353 W/m^2$. El flujo de calor por radiación fue usado para calcular la fracción de radiación (F). Brzustowski et al (1975) dio la relación entre calor de radiación y fracción de radiación que esta dado por

$$F = \frac{4R\pi D^2}{m_f^{\circ} (LHV_f)}$$

Donde D es la distancia (m) entre la llama y el pirheliómetro, R es el flujo de calor por radiación (W/m²), m_f° es el flujo masico de combustible (Kg/s), y LHV_f es el poder calorífico inferior del combustible (J/Kg). En el caso de todas las mediciones, la distancia D se mantuvo constante e igual a 50 cm, La cual es 2.5 veces más grande que la longitud máxima de la llama, para satisfacer la aplicabilidad de la ecuación a condiciones donde $4\pi D^2$ es mucho mayor que la superficie irradiada. La fraccion de radiación representa en forma simplificada la eficiencia de combustion.

Figura 14. Esquema de la Instrumentación para Mediciones de Radiación de Llama

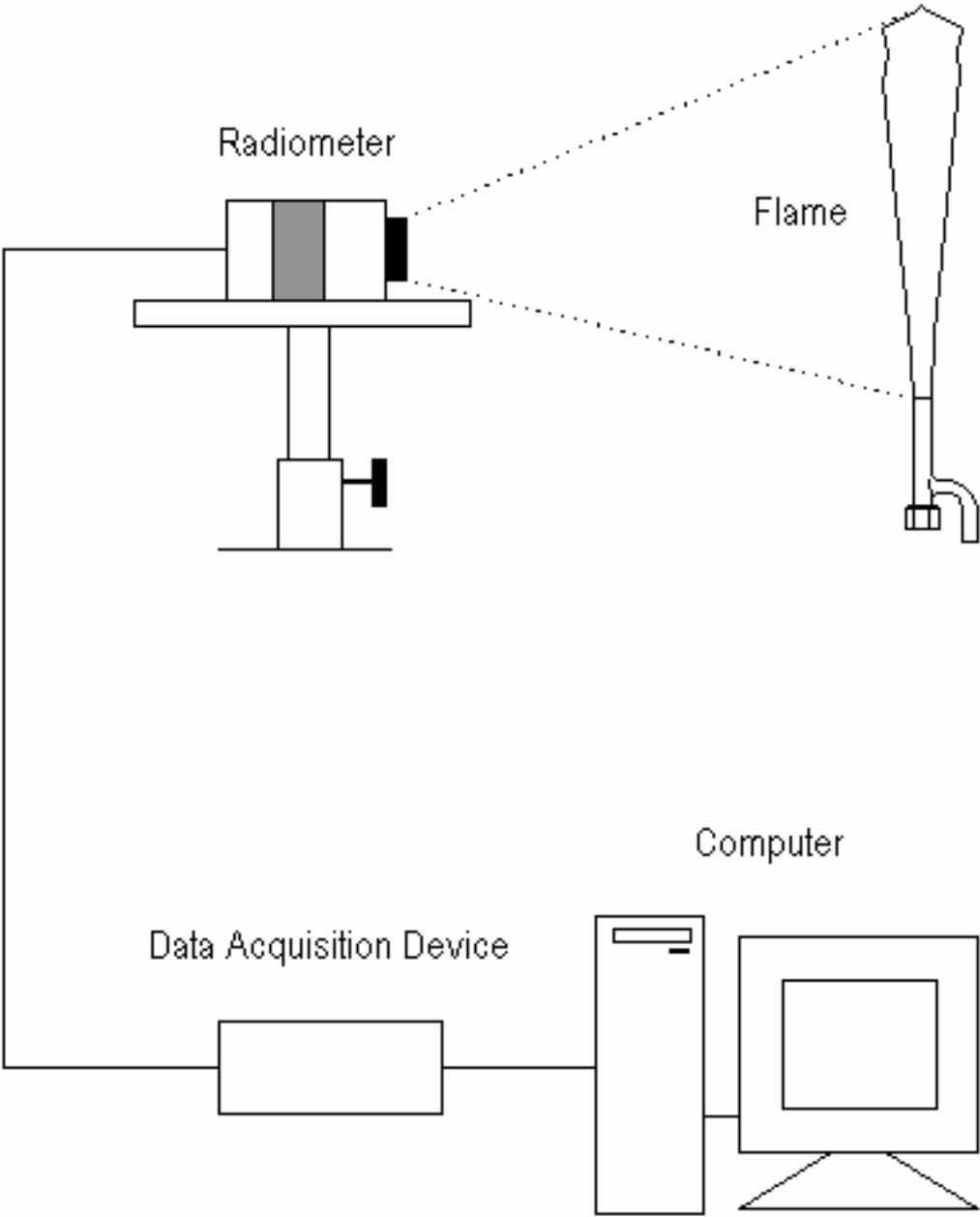


Figura 15. Front Panel de Labview

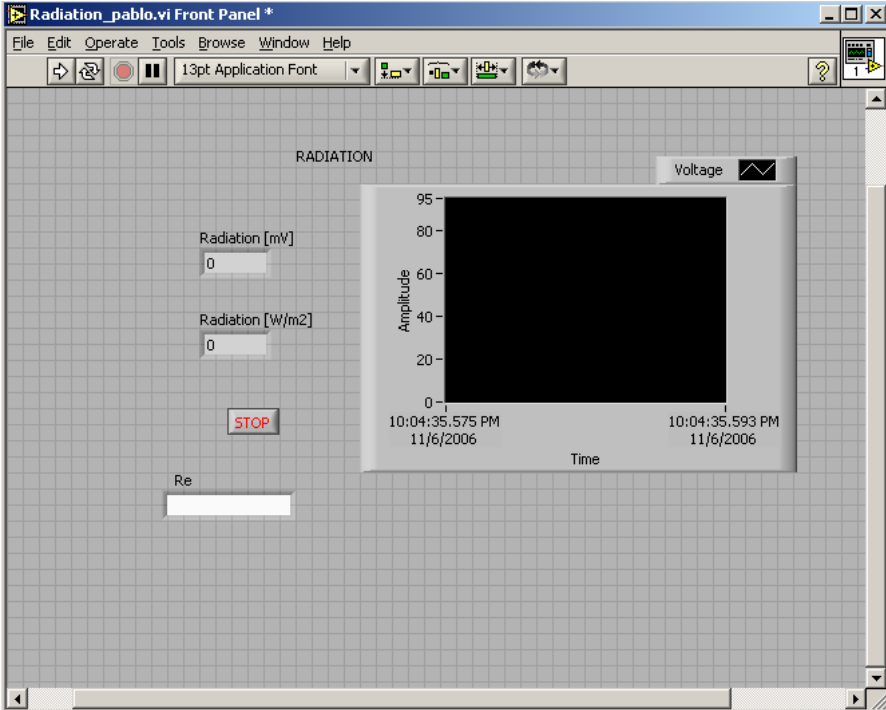


Figura 16. Block Diagram del Software Labview

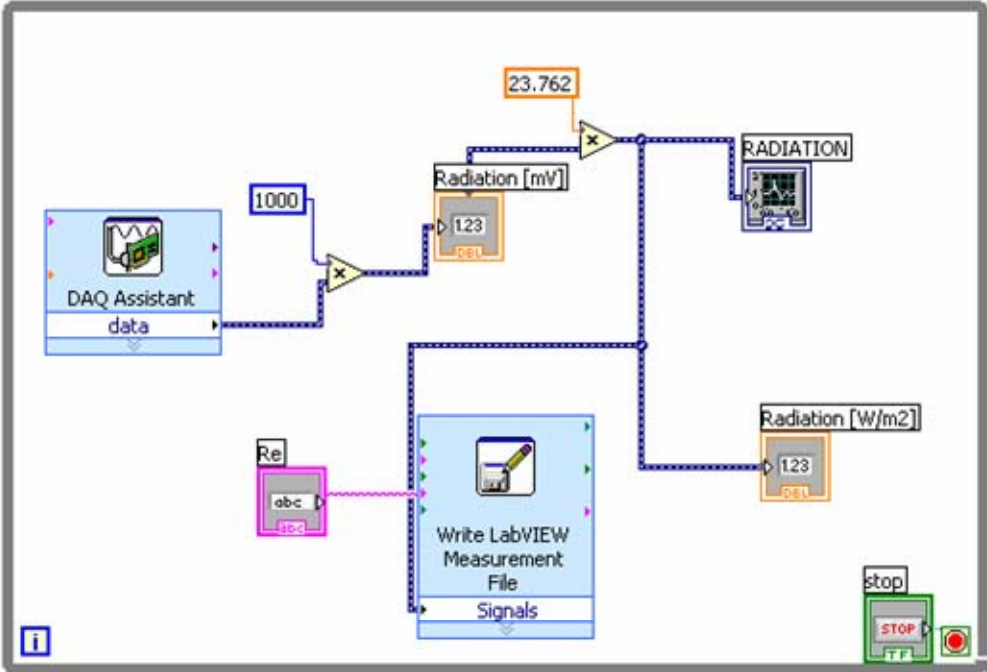
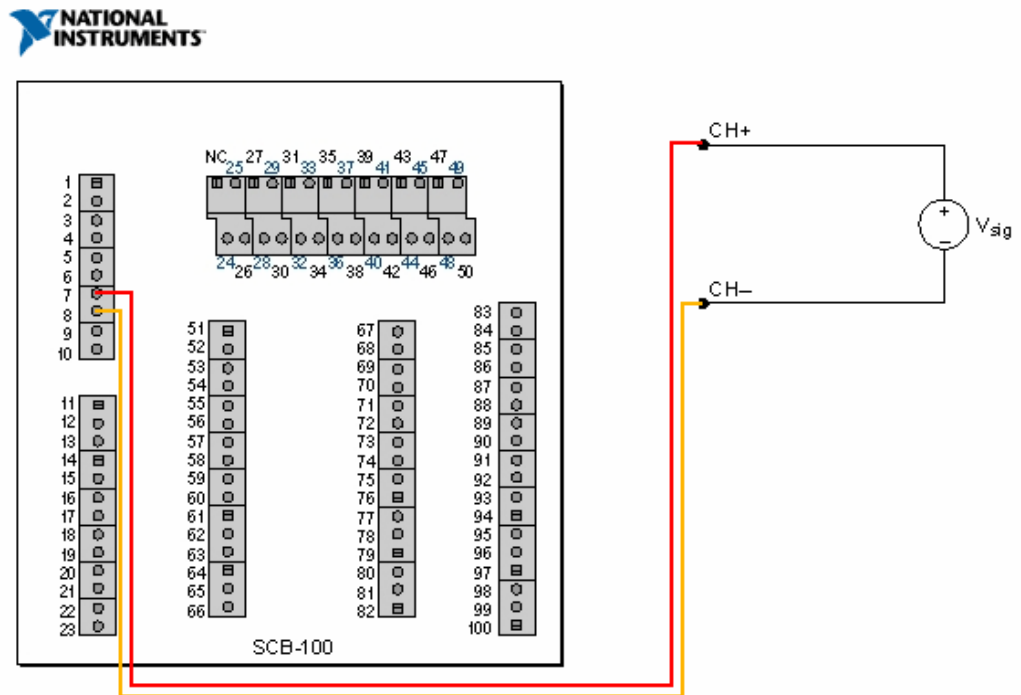


Figura 17. Diagrama de Conexión de la Tarjeta SBC-100



2.3.3 Índice de emisiones y concentraciones globales. Se tomaron las emisiones globales de CO y NO, así como las concentraciones globales de O₂ y CO₂. Para medir los gases de escape de la combustión, se utilizó un colector de gas de tubo Pirex, el cual fue centrado sobre la llama. Las muestras de gases de escape fueron recolectadas usando una probeta de cuarzo de 1 mm de diámetro, la cual conducía los gases a un condensador de enfriado con hielo para remover la humedad. Seguidamente, la muestra se pasaba a través de un filtro de fibra gruesa y un filtro de cartucho de horiba para atrapar material articulado antes de pasar la muestra por los analizadores de emisiones. La Figura 18 el esquema del equipo utilizado para medir las emisiones globales y las concentraciones globales, en la figura 19 se muestra una fotografía del equipo de análisis de gases.

Las concentraciones de CO y CO₂ fueron medidas utilizando analizadores infrarrojos no dispersivos (NDIR). La concentración de NO fue medida usando un analizador de Químicoluminescencia y las concentraciones de O₂ fueron medidas usando un sensor poralografico. Para la calibración de los analizadores de gases se utilizaron cilindros de CO, CO₂ y NO de Calibración y un cilindro de nitrógeno para la calibración cero de los equipos. Las especificaciones de los equipos se encuentran en la cuadro 2.

Cuadro 2. Especificaciones de los Equipos de Análisis de Emisiones.

<i>Medida</i>	<i>Método</i>	<i>Marca</i>	<i>Modelo</i>
CO (PPM)	Infrarojo No- Dispersivo (NDIR)	Rosemount analytical	880A
CO ₂ (%)	(NDIR)	Rosemount analytical	880A
NO (PPM)	Químicoluminescencia	Termo Environmental Instruments	42H
O ₂ (%)	Quimico	Nova	Mini OX I

El índice de emisiones de CO y NO son la una relación entre la masa de la especie de CO o NO y la masa de combustible quemado durante el proceso de combustión (Turns, 1996)

$$EI_i = \frac{m_{i,emitted}}{m_{F,burnt}}$$

El índice de emisiones para la combustión de un hidrocarburo con el aire puede ser expresada como

$$EI_i = \frac{X_i}{X_{CO} + X_{CO_2}} \left(\frac{xMW_i}{MW_{mix}} \right)$$

Donde

X =Fracción molar

x = Numero de moles de Carbono en una mol de combustible (C_xH_y)

MW_i = Peso molecular de la especie [Kg/Kg-mole]

MW_{mix} = Peso molecular del combustible [Kg/Kg-mole]

Figura 18. Esquema de las Medición de Concentraciones y Emisiones Globales

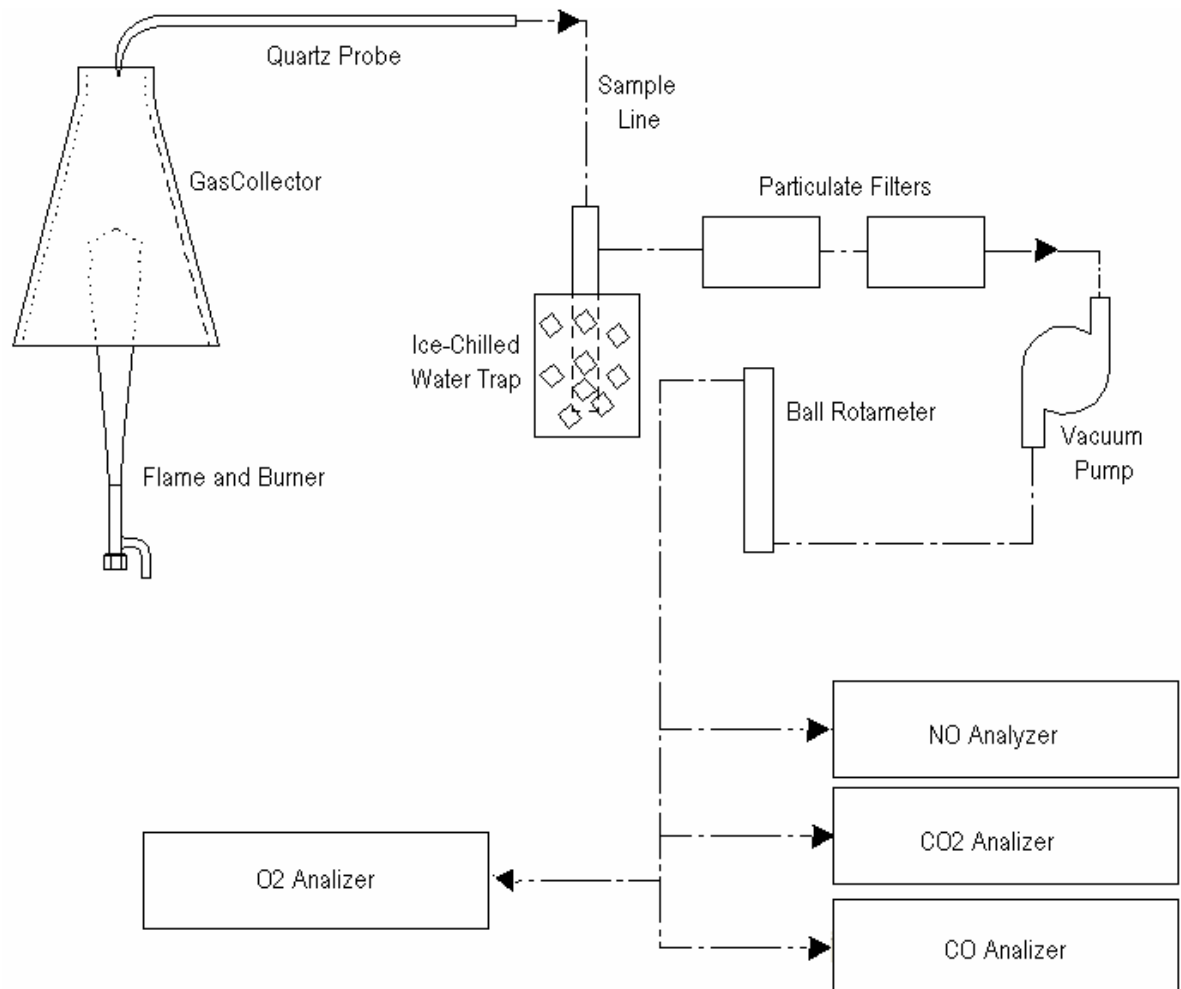


Figura 19. Fotografía de los Analizadores de Gases



2.4 METODOLOGÍA

Las condiciones nominales experimentales están dadas en el cuadro 3. Para comparar el funcionamiento de los quemadores circular, cuadrado y triangular la única variable en cada condición experimental fue la geometría de la salida del quemador. Para cada condición, el flujo de combustible fue mantenido constante en los tres quemadores, la razón de propano/hidrogeno se mantuvo constante para todas las condiciones experimentales analizadas. Inicialmente se midieron las características de la llama en función del número

de Reynolds del quemador circular, cuadrado y triangular. Se determino que un parámetro mas conveniente para el experimento era la velocidad de salida de combustible; cada condición experimental fue definida por la velocidad de salida del combustible para asegurar un flujo de combustible constante para los tres tipos de quemadores. La razón por la que se uso velocidad de salida del combustible en vez del número de Reynolds fue porque para un número de Reynolds dado, el flujo de combustible de los tres quemadores era diferente. Las velocidades de salida de combustible variaron desde $U_{\text{exit}} = 1.31$ hasta $U_{\text{exit}} = 26.68$ m/s y fueron tomados 20 condiciones entre este rango de velocidades. Estos valores fueron calculados con base en el numero de Reynolds Circular variando desde régimen laminar $Re_{\text{cir}} = 500$ hasta Turbulento $Re_{\text{cir}} = 10000$ tomando 20 condiciones entre este rango, es decir, incrementos del numero de Reynolds de 500.

Para mantener la llama de propano pegada al quemador cuando hay altas velocidades de salida de combustible, se utilizo un piloto anular de llama de hidrogeno el cual rodeaba la llama principal. La entrada energía de la llama piloto de hidrogeno fue del 1.5 % de la energía suministrada por la llama total.

Para el análisis dimensiona, radiación global, emisiones globales y concentraciones globales, se registraron 4 lecturas de datos para cada condición experimental.

Con el objetivo de encontrar el rango de variación le lectura de datos para cada condición experimental, se realizo un análisis de incertidumbre una basado en una distribución t de student para una confiabilidad del 95% [Beckwith and Maragoni, 1990], las incertidumbres de las mediciones se muestran en la tabla 4.

Cuadro 3 - Condiciones Experimentales Nominales

<i>Quemadores Principales</i>	Circular , diámetro de 2 mm , área de 3.14 mm ² Triangular , isósceles, área de 3.14 mm ² Cuadrado , área de 3.14 mm ²
<i>Quemador de Llama Piloto</i>	Circular de 8 mm de diámetro (ID)
<i>Orientacion del Quemador</i>	Vertical
<i>Combustibles</i>	Propano (C ₃ H ₈) Hidrogeno (H ₂)
<i>Presion Ambiente</i>	100.4 kPa
<i>Temperatura Ambiente</i>	293 K (20°C)
<i>Humidity Relativa</i>	60 %
<i>Rango de Número de Reynolds Circular</i>	500 - 10000
<i>Rango de Velocidad de Salida del Combustible</i>	1.24 - 24.72 m/s

Cuadro 4 - Incertidumbre en las Mediciones

<i>Medición</i>	<i>Incertidumbre</i>
Burner diameter	0.03
Flame Dimensions	0.63 cm
El _{CO}	3.86 g/Kg _f
El _{NO}	0.07 g/ Kg _f
CO ₂ Concentration	0.05
O ₂ Concentration	0.018
Radiation	0.0026

2.5 RESUMEN

Este capítulo da una descripción del banco de pruebas y los procedimientos utilizados durante la investigación. Asimismo, este capítulo presenta las especificaciones y los detalles de los quemadores, el suministro de combustible y la cámara de combustión. De igual forma se presenta la metodología y especificaciones de los equipos utilizados para la caracterización dimensional, mediciones de radiación global, mediciones de emisiones.

3. RESULTADOS

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan características globales de las llamas tales como, apariencia, dimensiones, radiación y emisiones de gases. De esta manera se provee una concepción del comportamiento de las llamas de difusión verticales producidas por quemadores circular, cuadrado y triangular. Las diferencias y similitudes, en general, son discutidas en términos de la geometría del quemador y la velocidad de salida del combustible.

3.2 APARIENCIA DE LA LLAMA

Cada Llama, Independiente de la geometría del quemador, mostró una zona azul, de baja luminosidad libre de hollín en la parte cercana a la salida del quemador (zona A, figura 20), esta región azul se hace mayor con el incremento de la velocidad de salida del combustible. Corriente arriba, esta región libre de hollín, se convierte en una región amarillenta, de alta luminosidad y con muestras considerables de hollín (zona B, Figura 20). En los límites de la llama, en la zona mas alejado del quemador, se observa una región naranja rojiza (zona C, figura 20).

En la figura 21 muestra una fotografía de llamas de tipo laminar para los tres quemadores. Se observa una llama lisa y estable. A medida que la velocidad de salida del combustible aumenta, la llama entra en transición, en la cual las

Figura 20. Estructura una llama de difusión de combustibles gaseosos.



llamas son en algunas zonas lisas y estables y en otras tienen una apariencia altamente irregular, esto se puede observar en la Figura 22. Las llamas turbulentas se aprecian en la figura 23, estas llamas región tienen una apariencia muy irregular y presentan alto ruido. La Figura 24 muestra una clasificación de los regímenes de flujo para el quemador circular, la cual fue

Figura 21. Fotografía de Llamas Producidas por quemadores Circular, Cuadrado y Triangular en Régimen Laminar, a una Velocidad de Salida de Combustible de $U_{\text{exit}} = 2.62 \text{ m/s}$



Figura 22. Fotografía de Llamas Producidas por quemadores Circular, Cuadrado y Triangular en Régimen de transición a una Velocidad de Salida de Combustible de $U_{\text{exit}} = 7.87 \text{ m/s}$



Figura 23. Fotografía de Llamas Producidas por quemadores Circular, Cuadrado y Triangular en Régimen Turbulento a una Velocidad de Salida de Combustible de $U_{\text{exit}} = 23.6 \text{ m/s}$



hecha de manera visual. En el quemador circular el régimen laminar fue observado hasta alcanzar una velocidad cercana a $U_{\text{exit}} = 6.3 \text{ m/s}$, que corresponde a un número de Reynolds circular de 2300 como se conoce en la literatura. De igual manera se observó que la llama se vuelve completamente turbulenta a una velocidad cercana a $U_{\text{exit}} = 11.2 \text{ m/s}$, la cual corresponde a un número de Reynolds circular de 4300.

La Figura 25 muestra la región laminar observada en el quemador cuadrado. Esta región laminar termina a una velocidad de alrededor de $U_{\text{exit}} = 6.3 \text{ m/s}$ que corresponden a un número de Reynolds cuadrado de 1500. De igual manera se encontró que la llama se vuelve totalmente turbulenta a una velocidad de alrededor de $U_{\text{exit}} = 11.2 \text{ m/s}$, que corresponde a un número de Reynolds de 3800.

La Figura 26 muestra la región laminar observada en el quemador triangular. Esta región laminar termina a una velocidad de alrededor de $U_{\text{exit}} = 5 \text{ m/s}$ que corresponden a un número de Reynolds cuadrado de 1500. De igual manera se encontró que la llama se vuelve totalmente turbulenta a una velocidad de alrededor de $U_{\text{exit}} = 12.45 \text{ m/s}$, que corresponde a un número de Reynolds de 3700.

3.3 CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES DE LA LLAMA

Las figuras 24, 25 y 26 muestran la variación de la longitud de la llama en función de la velocidad de salida del combustible para un quemador circular, cuadrado y triangular. La figura 27 muestra una comparación de las longitudes de llama entre quemadores circular, cuadrado y triangular en función de la velocidad de salida del combustible. Las figuras 21 a la 23

Figura 24. Longitudes de llama del Quemador Circular en Función de la Velocidad de Salida del Combustible y Caracterización de Regimenes de Flujo.

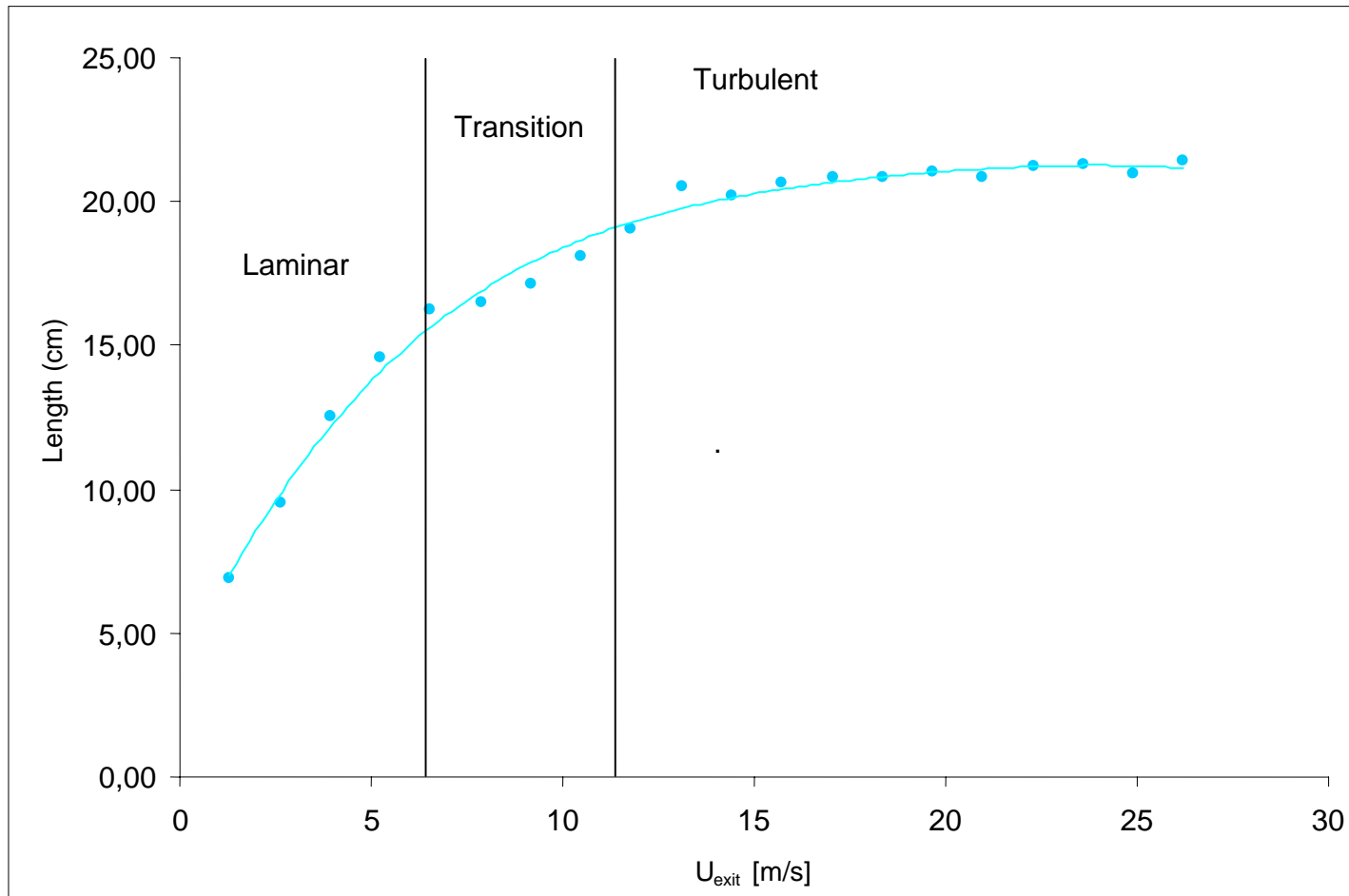


Figura 25. Longitudes de llama del Quemador Cuadrado en Función de la Velocidad de Salida del Combustible y Caracterización de Regímenes de Flujo.

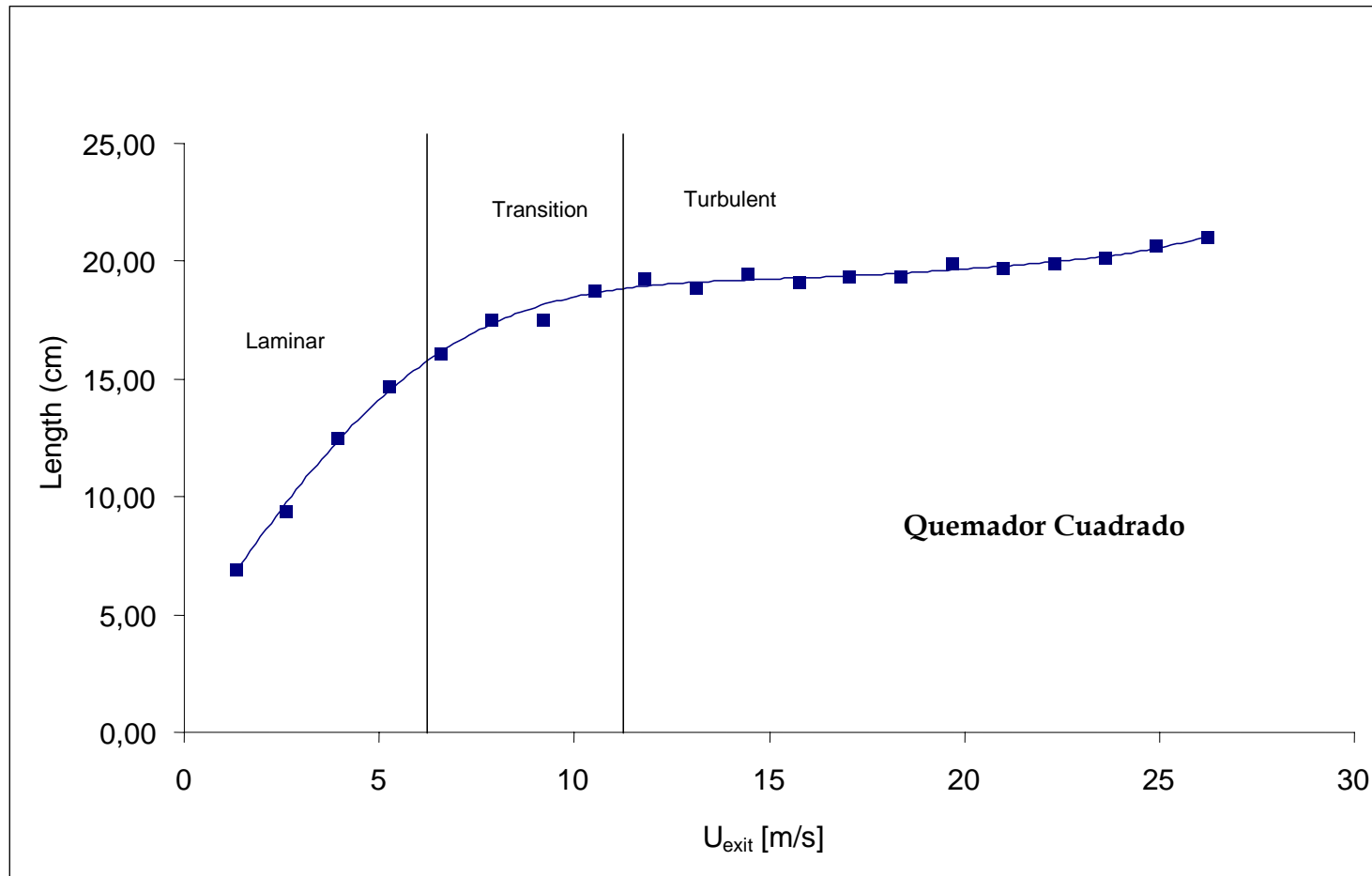
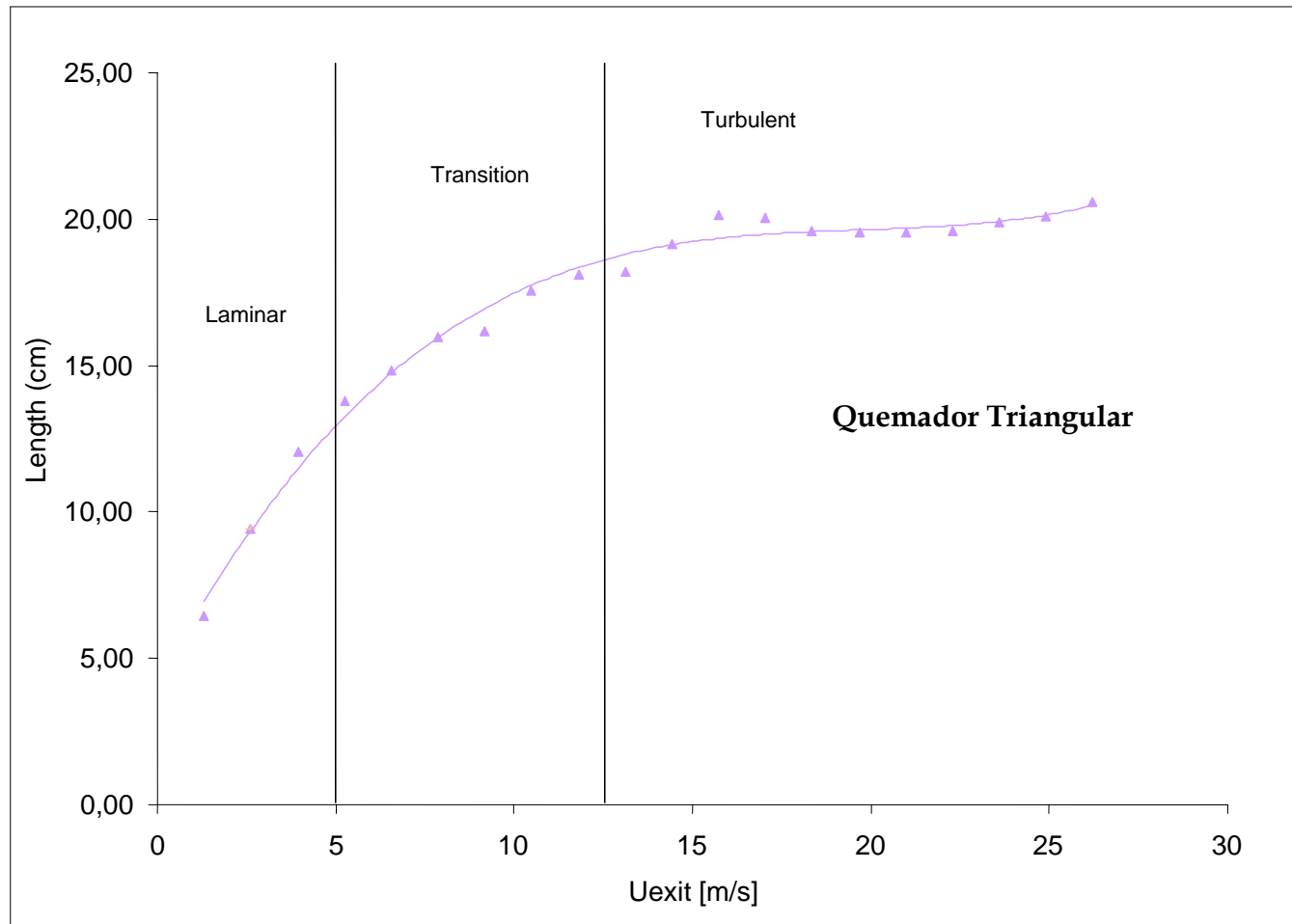


Figura 26. Longitudes de llama del Quemador Triangular en Función de la Velocidad de Salida del Combustible y Caracterización de Regímenes de Flujo.

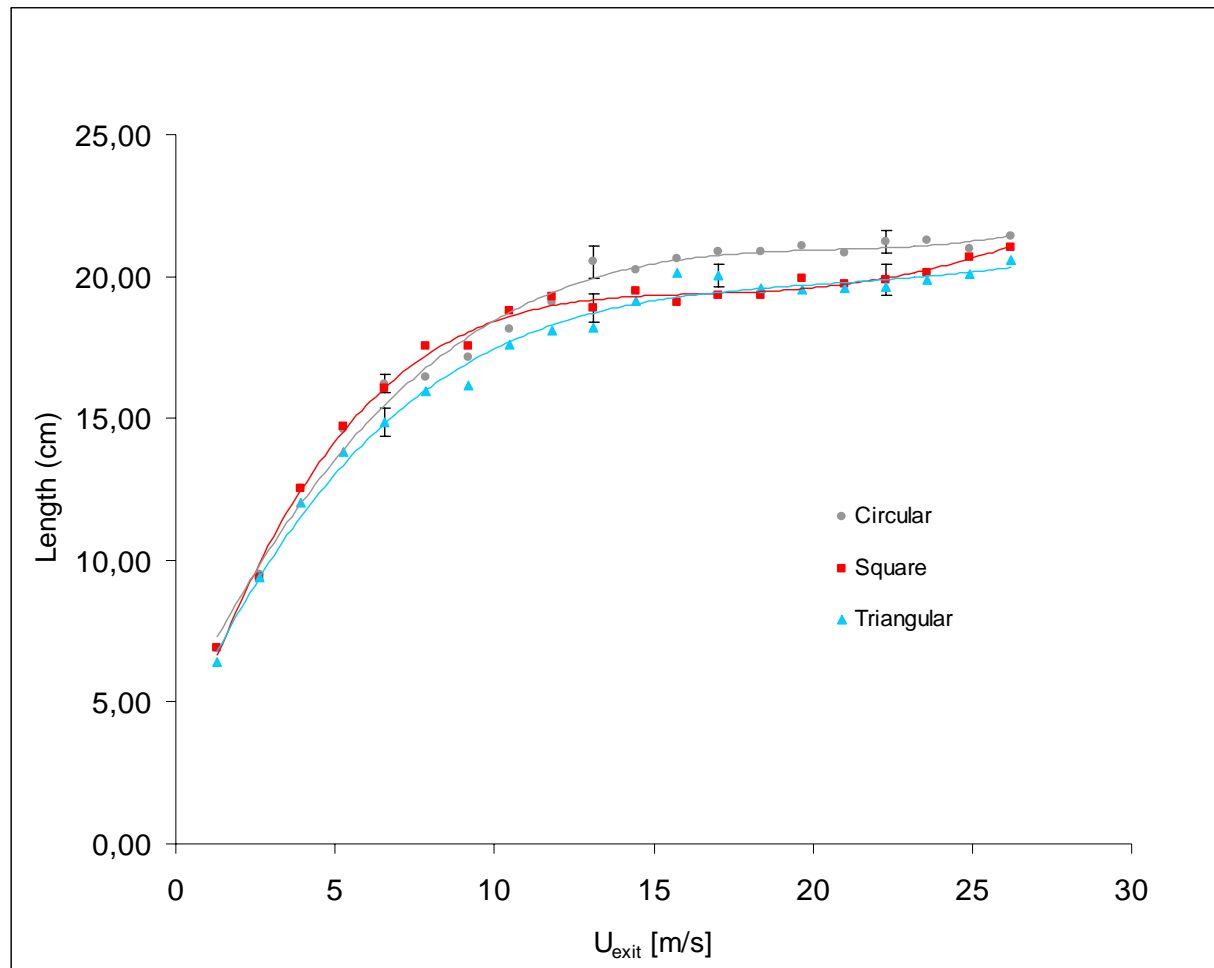


muestran tres imágenes digitales en donde se comparan las longitudes de llama de los tres diferentes quemadores a la misma condición de velocidad de salida de combustible en régimen laminar, de transición y turbulento. Basado en las imágenes es aparente que a una velocidad de salida de combustible baja (es decir, número de Reynolds pequeño), las llamas son laminares, con bordes agudos y forma estable. En general, de la Figura 27, se puede deducir que la longitud de llama del quemador triangular decrece a una tasa más rápida que las llamas del quemador circular y cuadrado con el incremento de la velocidad de salida del combustible.

Para velocidades bajas, correspondientes a un rango desde $U_{\text{exit}} = 1.31$ m/s hasta $U_{\text{exit}} = 3.93$ m/s, no se observó diferencias en la longitud de las llamas producidas por los quemadores circular, cuadrado y triangular. Por ejemplo para una velocidad de $U_{\text{exit}} = 2.62$ m/s la longitud de la llama producida por el quemador circular fue $L = 9.5$ cm, la longitud de la llama del quemador cuadrado fue de $L = 9.41$ cm y la longitud de la llama del quemador triangular fue de $L = 9.40$ cm. Esta situación se puede apreciar en la figura 27, la cual muestra que a bajas velocidades no hay diferencia en la longitud de la llama.

Para el caso de velocidades intermedias, las cuales corresponden a velocidades desde $U_{\text{exit}} = 5.24$ hasta $U_{\text{exit}} = 13.11$ m/s, se presentó una disminución en la longitud de la llama producida por el quemador triangular en comparación con las llamas producidas por el quemador cuadrado y triangular. Para estas velocidades intermedias, el quemador cuadrado mostró llamas levemente más altas que las producidas por el quemador circular. Por ejemplo, para una velocidad de salida de combustible de $U_{\text{exit}} = 9.18$ m/s, la

Figura 27. Efectos de la Geometría de los Quemadores en la Longitud de la Llama en Función de la Velocidad de Salida del Combustible



longitud de la llama producida por el quemador circular fue de $L = 17.15$ cm, la longitud de la llama producida por el quemador cuadrado fue de $L = 17.54$ cm, mientras que longitud de la llama producida por el quemador triangular fue de $L = 16.18$ cm. En la figura 31 se observan las diferencias de longitud de la llama para los tres quemadores.

Para velocidades altas las cuales corresponde a $U_{\text{exit}} = 14.46$ m/s hasta $U_{\text{exit}} = 26.22$ m/s, se presento claramente que el quemador triangular produce llamas mas cortas que el quemador circular. El quemador cuadrado, produjo llamas que son levemente mas largas que las llamas del quemador triangular. Por ejemplo, para una velocidad de salida del combustible de $U_{\text{exit}} = 23.6$ m/s, la longitud de la llama del quemador circular fue de $L = 21.26$ cm, la longitud de la llama producida por el quemador cuadrado fue de $L = 20.13$ cm, mientras que la longitud de producida por el quemador triangular fue de $L = 19.88$.

La Figura 27 muestra que las tendencias de variación de longitud de llama con el incremento de la velocidad de los tres quemadores son similares.

Para la región laminar, hay un cambio significativo en la longitud de la llama con el incremento de la velocidad de salida de combustible. La región de transición tiene una variación en la longitud de la llama con el incremento de la velocidad, aunque este cambio no es tan significativo como en la región laminar, mientras que en la región turbulenta la variación en la longitud de la llama con el incremento de la velocidad del combustible no es muy notoria.

Todos los datos medidos de la longitud de llama de los tres tipos de quemadores en todas las condiciones, se encuentran registrados en los cuadros 5, 6 y 7. La incertidumbre estimada en las mediciones de longitud de llama se encuentra en el cuadro 8.

Cuadro 5. Longitud de las Llamas del Quemador Circular

U_{exit} [m/s]	Longitud 1	Longitud 2	Longitud 3	Longitud 4	Promedio [cm]
1,31	6,80	7,02	6,71	7,07	6,90
2,62	9,69	9,62	9,17	9,51	9,50
3,93	12,34	12,76	12,91	12,09	12,53
5,25	14,76	14,80	14,76	14,04	14,59
6,56	16,02	16,50	16,14	16,21	16,22
7,87	16,33	17,15	16,19	16,20	16,47
9,18	17,54	16,89	17,31	16,85	17,15
10,49	17,96	18,38	17,87	18,28	18,12
11,80	19,09	19,47	19,08	18,68	19,08
13,11	21,05	20,22	20,38	20,38	20,51
14,42	19,97	20,44	20,58	19,82	20,20
15,74	20,73	20,80	20,29	20,69	20,63
17,05	21,06	20,69	20,60	21,11	20,87
18,36	21,12	20,42	20,91	21,00	20,86
19,67	21,22	21,33	20,96	20,76	21,07
20,98	20,78	20,73	20,86	20,88	20,81
22,29	21,43	20,87	21,42	21,18	21,22
23,60	21,38	21,07	21,30	21,31	21,26
24,91	20,90	20,76	20,81	21,46	20,98
26,23	21,55	21,46	21,51	21,11	21,41

Cuadro 6. Longitud de las Llamas del Quemador Cuadrado

U_{exit} [m/s]	Longitud 1	Longitud 2	Longitud 3	Longitud 4	Promedio [cm]
1,31	7,08	7,05	6,77	6,70	6,90
2,62	9,48	9,37	9,49	9,29	9,41
3,93	12,55	12,32	12,90	12,31	12,52
5,25	14,13	14,90	14,80	14,96	14,70
6,56	16,36	15,52	16,22	16,21	16,08
7,87	17,44	17,88	17,44	17,33	17,52
9,18	17,67	17,29	17,38	17,80	17,54
10,49	18,58	19,31	18,55	18,66	18,78
11,80	19,35	18,66	19,66	19,40	19,27
13,11	18,51	19,23	18,76	19,01	18,88
14,42	19,42	19,80	19,29	19,52	19,51
15,74	18,96	19,08	19,10	19,22	19,09
17,05	19,70	19,02	19,44	19,25	19,35
18,36	18,78	19,51	19,52	19,59	19,35
19,67	19,70	19,70	19,83	20,47	19,92

U_{exit} [m/s]	Longitud 1	Longitud 2	Longitud 3	Longitud 4	Promedio [cm]
20,98	19,99	19,34	19,56	20,00	19,72
22,29	19,59	20,20	20,15	19,59	19,88
23,60	19,89	20,04	20,41	20,16	20,13
24,91	20,51	20,33	20,87	21,04	20,69
26,23	20,92	21,18	21,20	20,86	21,04

Cuadro 7. Longitud de las Llamas del Quemador Triangular

U_{exit} [m/s]	Longitud 1	Longitud 2	Longitud 3	Longitud 4	Promedio [cm]
1,31	6,24	6,33	6,47	6,68	6,43
2,62	9,10	9,18	9,67	9,67	9,40
3,93	11,69	12,38	12,38	11,69	12,03
5,25	14,07	13,49	13,93	13,74	13,81
6,56	15,21	14,53	15,04	14,64	14,85
7,87	15,92	16,00	15,99	15,94	15,96
9,18	15,83	16,39	15,96	16,53	16,18
10,49	17,53	18,17	17,47	17,17	17,58
11,80	17,49	18,26	18,42	18,25	18,10
13,11	17,92	18,07	18,69	18,13	18,20
14,42	19,38	18,65	19,49	19,06	19,14
15,74	20,25	20,15	20,11	20,08	20,15
17,05	20,25	20,21	19,93	19,72	20,03
18,36	20,03	19,49	19,47	19,29	19,57
19,67	19,28	19,71	19,76	19,35	19,53
20,98	19,76	19,68	19,64	19,15	19,56
22,29	19,43	19,26	19,82	19,92	19,61
23,60	19,78	19,47	20,10	20,17	19,88
24,91	19,85	20,00	20,08	20,36	20,07
26,23	20,86	20,40	20,40	20,61	20,57

Cuadro 8. Incertidumbre Estimada en las Mediciones de Longitud de Llama

U_{exit} [m/s]	Quemador Circular [cm]	Quemador Cuadrado [cm]	Quemador Triangular [cm]
3,93	0,60	0,44	0,63
9,18	0,53	0,38	0,53
17,05	0,41	0,46	0,39
23,60	0,22	0,35	0,51

3.4 RADIACIÓN GLOBAL DE LLAMA

Las Figuras 28, 29 y 30 muestran el flujo de calor liberado por radiación y la fracción de radiación en función de la salida de combustible para quemadores circular, cuadrado y triangular en función de la velocidad de salida de combustible. En la Figura 31 se muestra una comparación entre el flujo de calor liberado por radiación y la fracción de radiación producidos por quemadores circular, cuadrado y triangular, en función de la velocidad de salida de combustible.

La flujo de calor por radiación de radiación de todas las llamas analizadas están en un rango de 12 a 22 % de la energía total de entrada de producida por el poder calorífico del combustible. En la figura 28, es claro que en la región laminar, el quemador circular, es el que mas presenta flujo de calor por radiación, seguido por el quemador triangular y el quemador cuadrado. Por ejemplo, para una velocidad de salida del combustible $U_{\text{exit}} = 2.62 \text{ m/s}$, la fracción de radiación producida por la llama del quemador circular es $F_c = 17 \%$, la fracción de radiación producida por la llama del quemador cuadrado es $F_s = 13$, mientras que la fracción de radiación de la llama del quemador triangular es $F_t = 15 \%$ después de una velocidad de 5.25 m/s , la fracción de radiación de las llamas de los quemadores circular, cuadrado y triangular se vuelven similares, aunque hay una pequeña diferencia la cual indica que el quemador triangular tiene la fracción de radiación mas baja y el quemador cuadrado la fracción de radiación mas alta. La fracción de radiación del quemador cuadrado es levemente mas alta que las otras para el intervalo desde $U_{\text{exit}} = 5.25 \text{ m/s}$ hasta $U_{\text{exit}} = 20.98 \text{ m/s}$, mientras que para velocidades de salida de combustible $U_{\text{exit}} > 20.98 \text{ m/s}$, la fracción de radiación producida

Figura 28. Flujo de Calor por Radiación del Quemador Circular

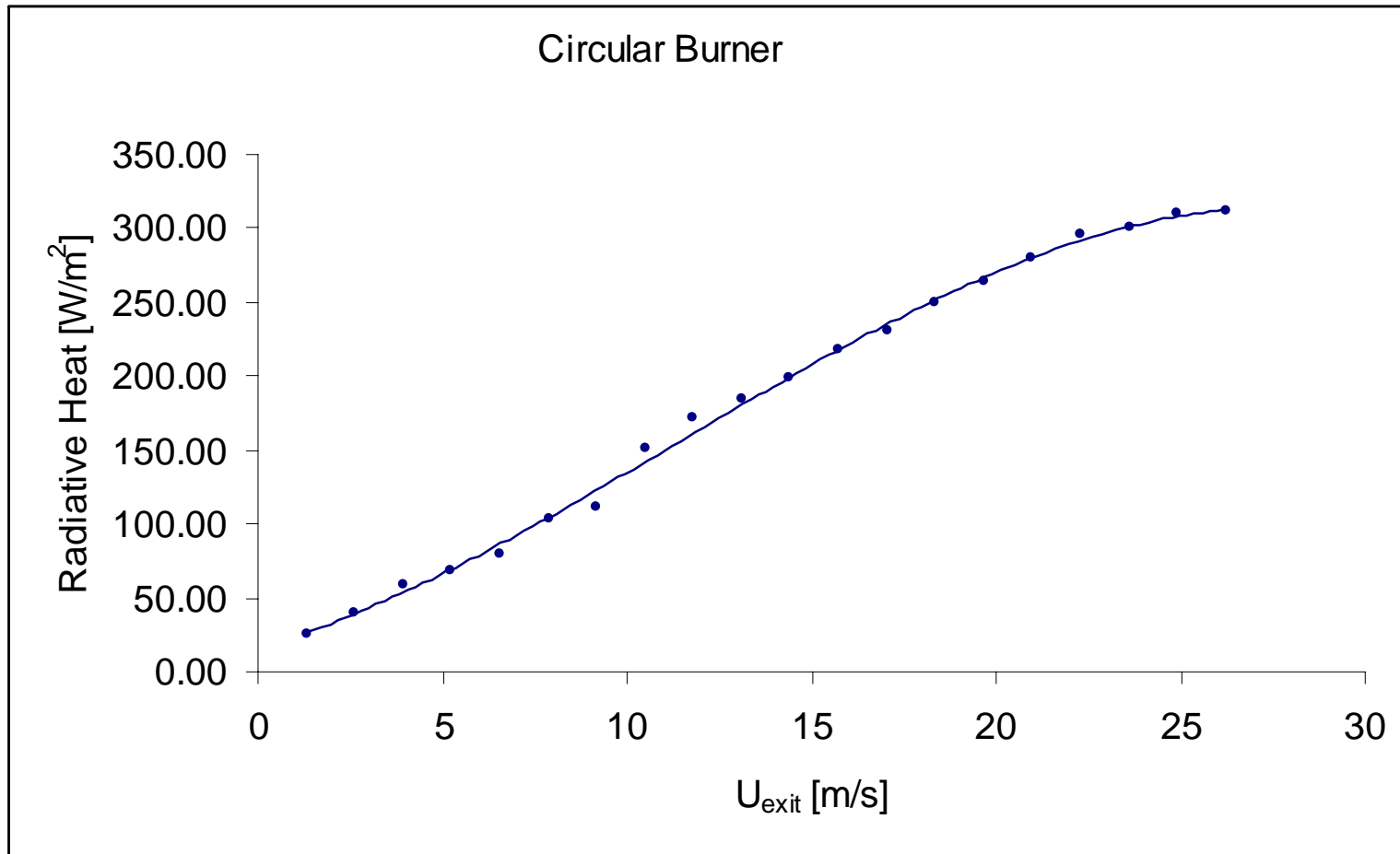


Figura 29. Flujo de Calor por Radiación del Quemador Cuadrado

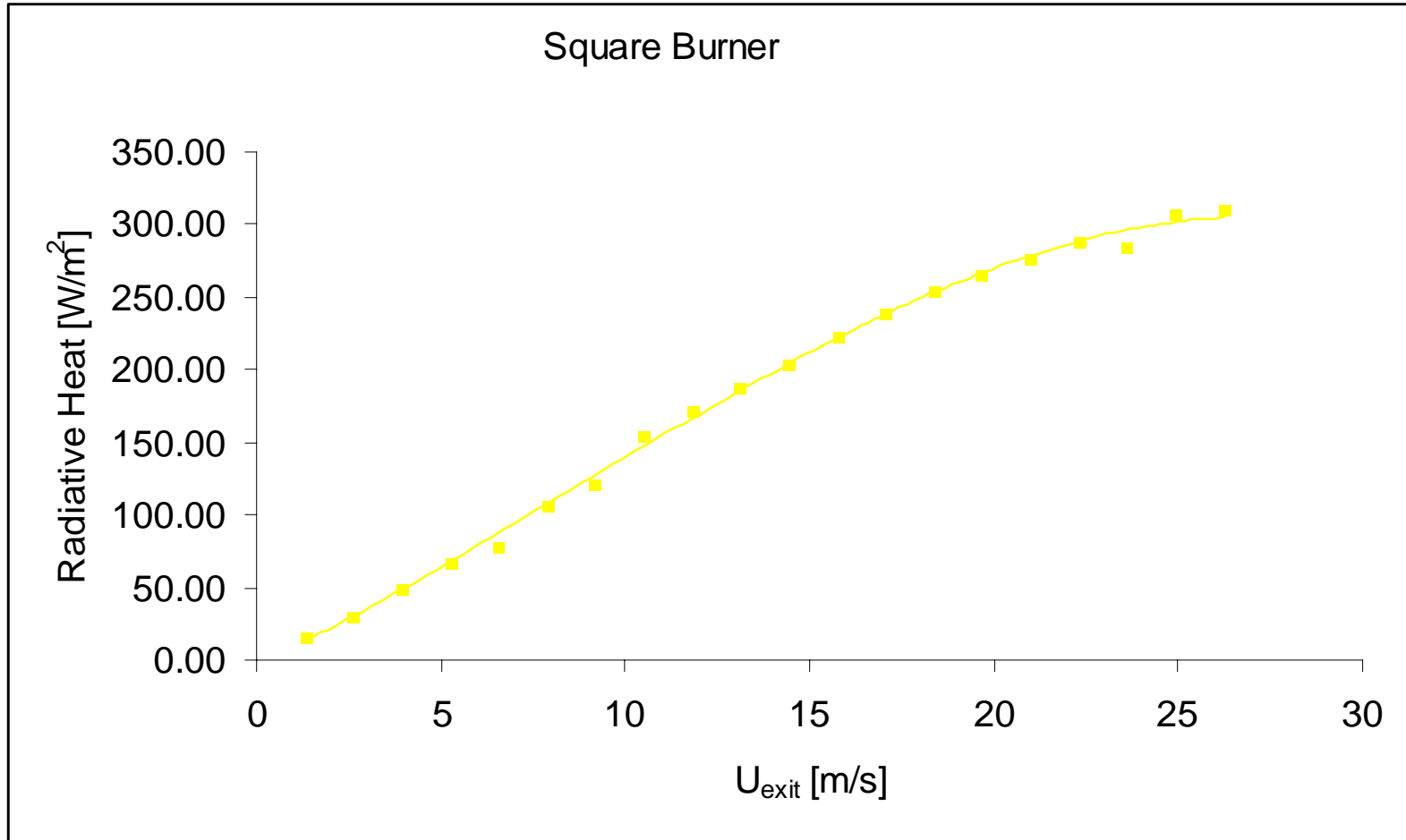


Figura 30. Flujo de Calor por Radiación del Quemador Triangular

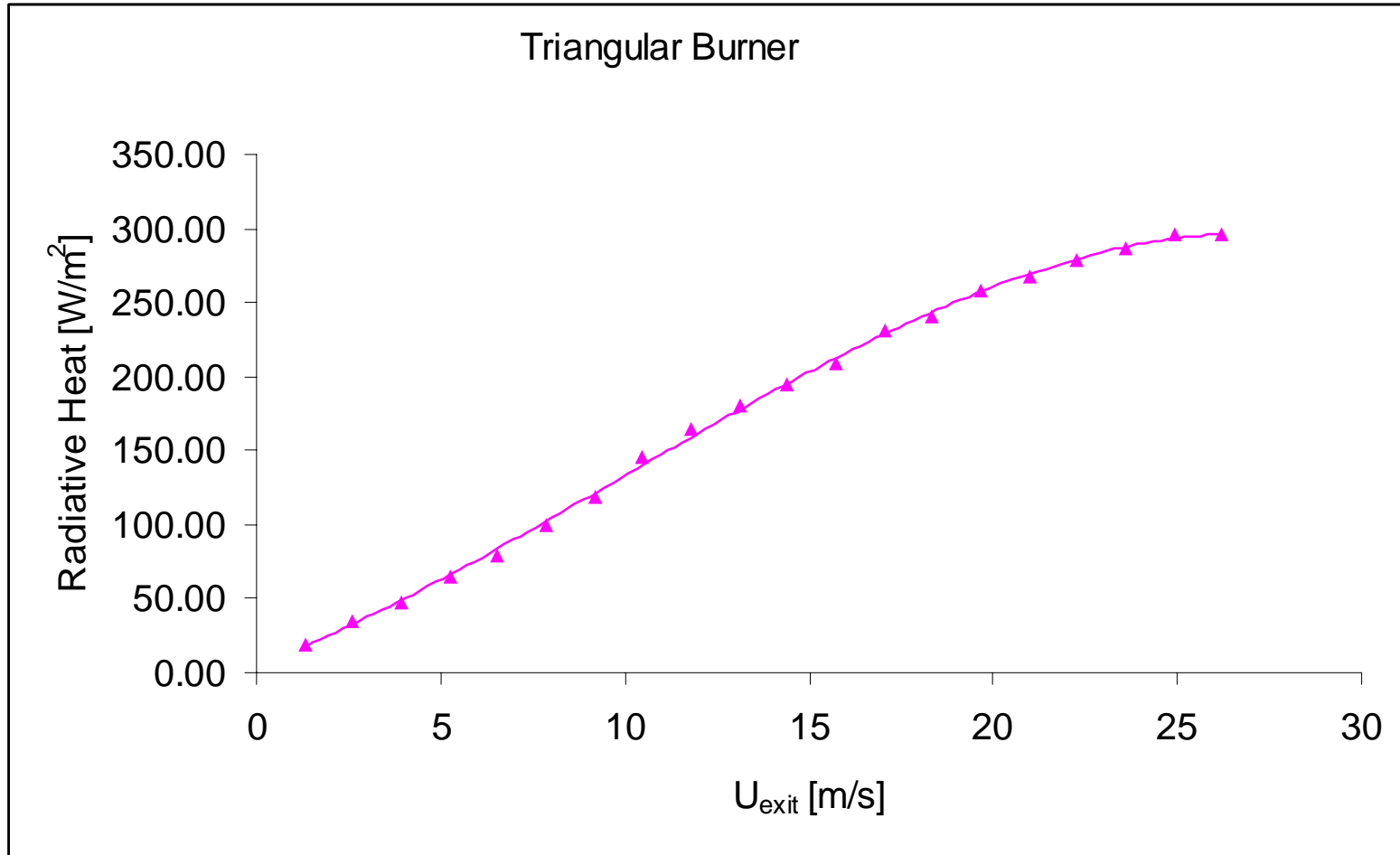
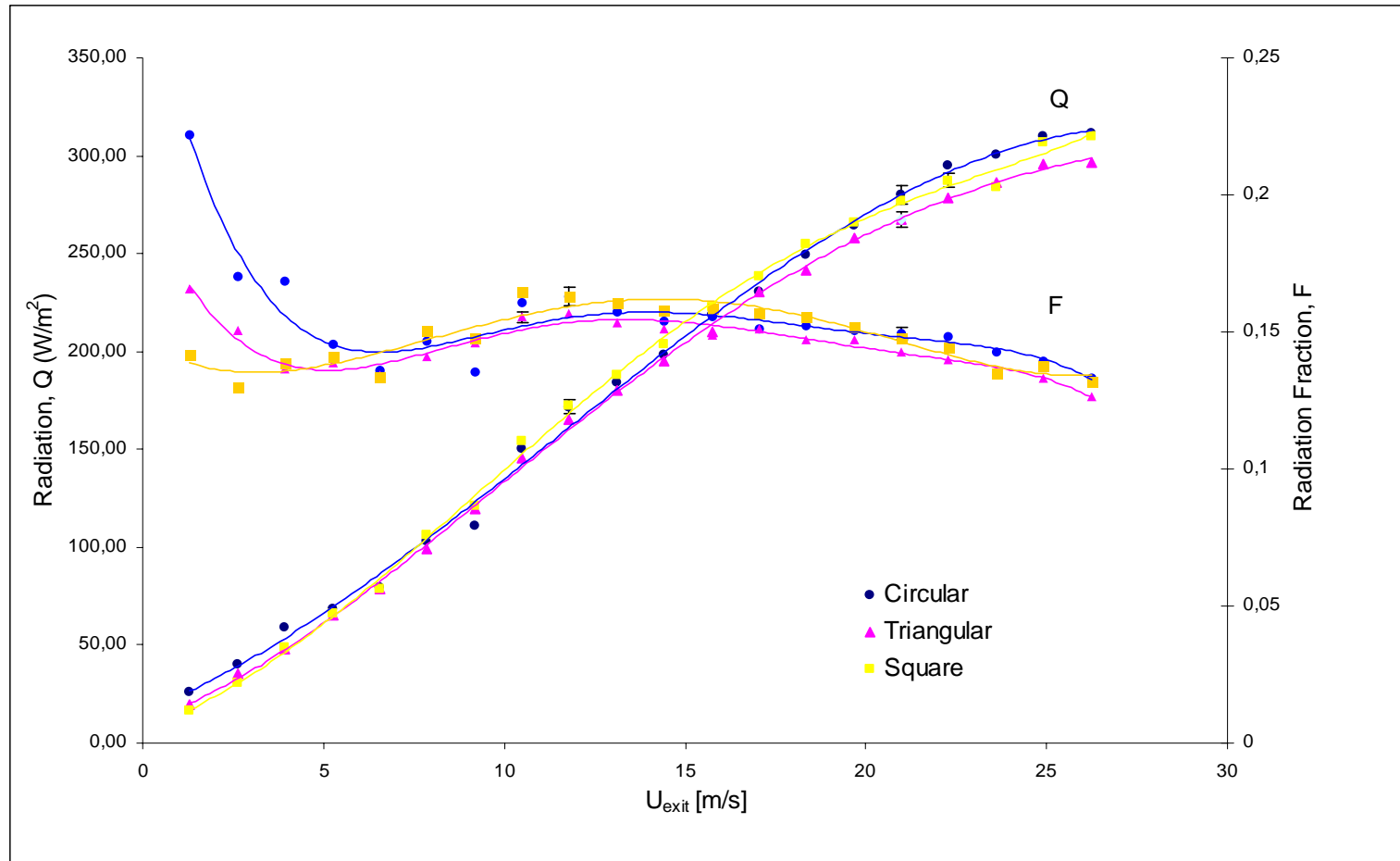


Figura 31. Flujo de Calor por Radiación y Fracción de Radiación en Función de la Velocidad de Salida de Combustible Para los Quemadores Circular, Cuadrado y Triangular.



Cuadro 9. Mediciones de Radiación de las Llamas del Quemador Circular.

U _{exit} [m/s]	Radiacion Neta [W/m ²]	Fraction de Radiacion [%]
1,31	26,02	22,21
2,62	39,91	17,04
3,93	59,30	16,88
5,25	68,27	14,57
6,56	79,75	13,62
7,87	102,89	14,64
9,18	110,99	13,54
10,49	150,62	16,07
11,80	171,59	16,28
13,11	184,03	15,71
14,42	198,45	15,40
15,74	218,48	15,54
17,05	230,32	15,13
18,36	249,34	15,21
19,67	264,12	15,03
20,98	280,06	14,94
22,29	295,15	14,82
23,60	300,57	14,26
24,91	309,85	13,92
26,23	311,74	13,31

Cuadro 10. Mediciones de Radiación de las Llamas del Quemador Cuadrado.

U _{exit} [m/s]	Radiacion Neta [W/m ²]	Fraction de Radiacion [%]
1,31	16,61	14,18
2,62	30,36	12,96
3,93	48,68	13,85
5,25	66,16	14,12
6,56	78,35	13,38
7,87	105,98	15,08
9,18	121,23	14,79
10,49	154,27	16,46
11,80	171,86	16,30
13,11	188,32	16,08
14,42	203,74	15,81
15,74	222,88	15,86
17,05	238,68	15,67
18,36	255,07	15,55
19,67	266,18	15,15
20,98	277,12	14,79
22,29	287,29	14,43
23,60	284,08	13,47
24,91	306,66	13,78
26,23	309,81	13,22

Cuadro 11. Mediciones de Radiación de las Llamas del Quemador Cuadrado.

U_{exit} [m/s]	Radiación Neta [W/m ²]	Fracción de Radiación [%]
1,31	19,38	16,55
2,62	35,25	15,05
3,93	47,89	13,63
5,25	64,94	13,86
6,56	78,58	13,42
7,87	99,05	14,09
9,18	119,57	14,58
10,49	145,71	15,55
11,80	165,21	15,67
13,11	179,92	15,36
14,42	194,87	15,12
15,74	209,65	14,92
17,05	230,51	15,14
18,36	241,34	14,72
19,67	258,36	14,70
20,98	267,69	14,28
22,29	278,54	13,99
23,60	286,14	13,57
24,91	295,88	13,29
26,23	296,61	12,66

Cuadro 12. Comparación de la fracción de radiación de los quemadores según la velocidad de salida de combustible.

Region aprox	U_{exit}	% Fraccion de Radiacion Circular	% Fraccion de Radiacion Cuadrada	% Fraccion de Radiacion Triangular
Laminar	1,31	100	63,84	74,48
	2,62	100	76,07	88,32
	3,93	100	82,09	80,75
	5,25	100	96,92	95,12
	6,56	100	98,25	98,54
	7,87	100	103,00	96,27
Transición	9,18	100	109,22	107,72
	10,49	100	102,42	96,74
	11,80	100	100,15	96,28
	13,11	100	102,33	97,77
Turbulento	14,42	100	102,66	98,19
	15,74	100	102,01	95,96
	17,05	100	103,63	100,08
	18,36	100	102,30	96,79
	19,67	100	100,78	97,82
	20,98	100	98,95	95,58
	22,29	100	97,34	94,37
	23,60	100	94,51	95,20
	24,91	100	98,97	95,49
	26,23	100	99,38	95,14

Cuadro 13. Incertidumbre Estimada en las Mediciones de Radiación.

U_{exit} [m/s]	Quemador Circular	Quemador Cuadrado	Quemador Triangular
10.49	0.0015	0.0041	0.0030
20.98	0.0028	0.0009	0.0026

por las llamas del quemador circular son levemente mas altas que las otras dos. Por ejemplo, para una velocidad de $U_{exit} = 13.11$ m/s, $F_s = 16.1$ %, $F_c = 15.7$ %, mientras que $F_t = 15.4$ %. Para una velocidad $U_{exit} = 22.29$ m/s, $F_s = 14.3$ %, $F_c = 14.8$ %, mientras que $F_t = 14$ %.

En general, en la región laminar, la fracción de radiación mostró una disminución con el incremento de la velocidad, mientras que en la región de transición, la fracción de radiación mostró un incremento en la fracción de radiación con el incremento de la velocidad de salida del combustible. En la región turbulenta la fracción de radiación mostró una disminución en la fracción de radiación con el incremento de la velocidad

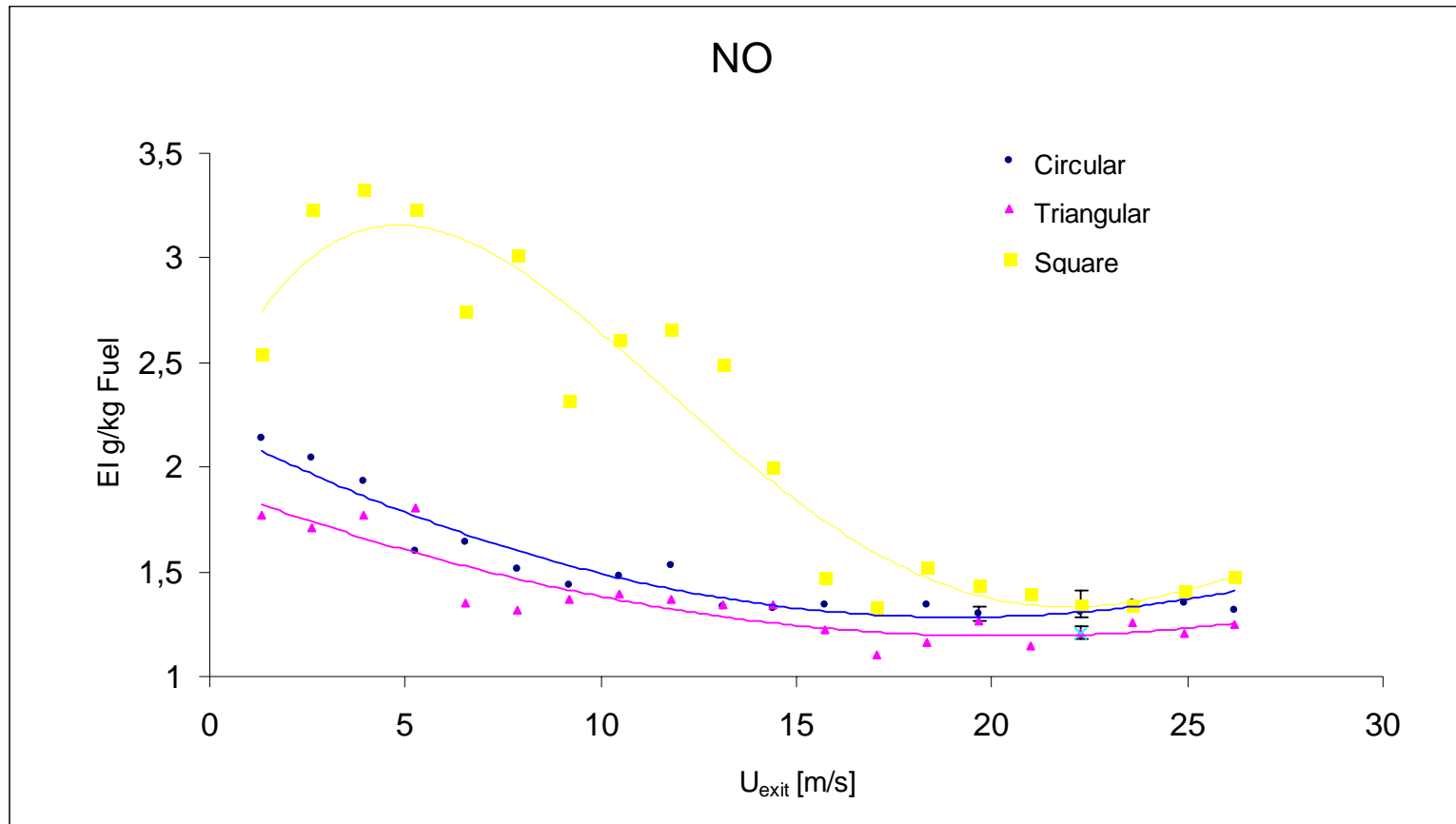
Los datos medidos para la fracción de radiación están tabulados en los cuadros 9, 10 y 11, mientras que la tabla 12 muestra la comparación en porcentaje de las fracciones de radiación para los regímenes aproximados de flujo de combustible. La incertidumbre estimada en las mediciones de radiación de llama está registrada en el cuadro 13.

3.5 ÍNDICES DE EMISIONES DE NO y CO

El índice de emisiones está definido como la cantidad de contaminantes producido por kilogramo de combustible quemado. Los resultados de los índices de emisiones en función de la velocidad de salida de combustible se ilustran en la figura 32 y 33.

Las llamas del quemador triangular produjeron una cantidad más baja de óxido nítrico que las llamas del quemador circular. Este comportamiento es explicado por la longitud de las llamas del quemador triangular, las cuales son más cortas y permiten menor tiempo de residencia para la formación de NO. Este resultado concuerda con Subba and Gollahalli (1997), quienes mostraron que los quemadores triangulares reducen la cantidad de NO en los productos de la combustión para llamas laminares.

Figura 32. Índice de Emisiones de NO de los Quemadores Circular, Cuadrado y Triangular en Función de la velocidad de salida del Combustible.



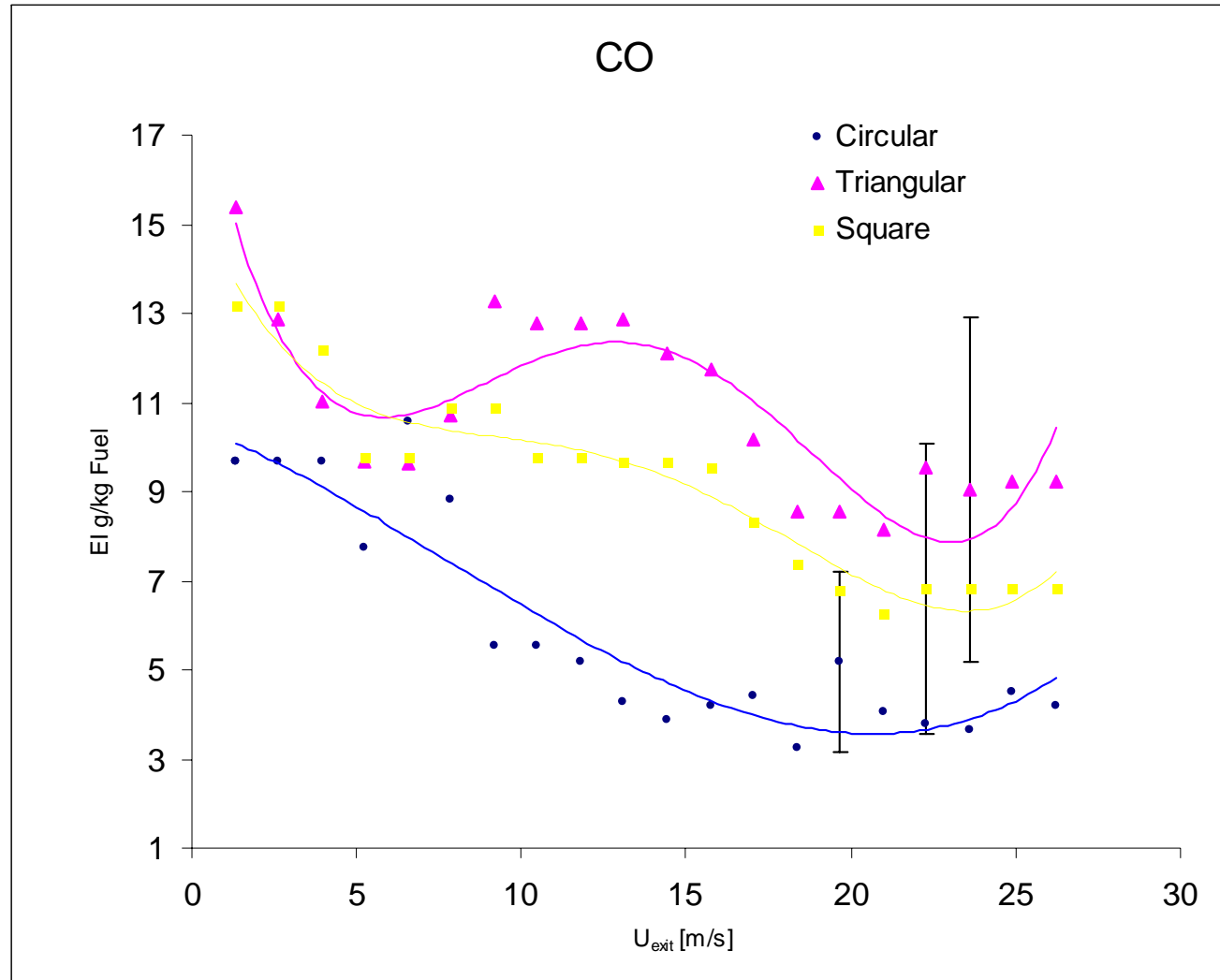
Las llamas del quemador cuadrado producen los mas altos indices de emisiones de NO y este índice decrece con el aumento en la velocidad de salida del combustible. Para la región de turbulencia, el nivel de producción de NO de el quemador cuadrado es el mismo que el del quemador circular. La investigación mostró que los quemadores triangulares producen alrededor de 9% menos de acido nítrico que el quemador circular, en cualquier condición de salida de combustible.

No hay una tendencia definida en el índice de emisiones de monóxido de carbono y la velocidad de salida de combustible. La Figura 33 muestra una comparación entre el índice de emisiones de CO producido por el quemador circular, cuadrado y triangular, en el cual se muestra que el quemador circular tiene una leve tendencia a producir menores índices de emisiones de CO. Los índices de emisiones de del quemador cuadrado y triangular son similares.

La incertidumbre en las mediciones del índice de emisiones de CO fueron muy altas. Para el caso del quemador circular, las mediciones variaron en ± 38 %, para el quemador cuadrado variaron en ± 40 %, mientras que para el quemador triangular variaron en ± 53 %. Esta alta variación era debida al posicionamiento de la probeta de cuarzo en la llama, cuando la probeta se acercaba a la llama, los valores de CO incrementaban, mientras que cuando se alejaba resultaba en valores menores de CO.

Debido a las altas incertidumbres, se concluye que el índice de emisiones de CO de los tres tipos de quemadores se encaja dentro rangos muy similares. Los valores típicos de emisiones de NO del quemador circular estuvo entre 1,2 y 1,77 gramos por kilogramo de combustible, en el quemador cuadrado el

Figura 33. Índice de Emisiones de CO de los Quemadores Circular, Cuadrado y Triangular en Función de la velocidad de salida del Combustible.



rango estuvo entre 1,33 y 3,33 gramos por kilogramo de combustible, mientras que para el quemador circular las emisiones estuvieron entre 1,32 y 2,14 gramos por kilogramo de combustible quemado.

Los índices de emisiones para los tres quemadores están tabulados en los cuadros 14 y 15. La incertidumbre en la medición de índices de emisiones están registrados en el cuadro 16.

Cuadro 14. Índice de Emisiones de NO de los Quemadores Circular, Cuadrado y Triangular.

U _{exit} [m/s]	EINO Circular	EINO Cuadrado [g/kg _{fuel}]	EINO Triangular [g/kg _{fuel}]
1,31	2,14	2,54	1,77
2,62	2,05	3,24	1,71
3,93	1,94	3,33	1,77
5,25	1,60	3,24	1,80
6,56	1,64	2,74	1,35
7,87	1,51	3,01	1,32
9,18	1,43	2,32	1,37
10,49	1,48	2,61	1,40
11,80	1,53	2,66	1,37
13,11	1,33	2,49	1,34
14,42	1,33	2,00	1,35
15,74	1,35	1,47	1,22
17,05	1,30	1,33	1,10
18,36	1,34	1,52	1,17
19,67	1,30	1,43	1,26
20,98	1,38	1,39	1,15
22,29	1,31	1,35	1,21
23,60	1,35	1,35	1,26
24,91	1,35	1,41	1,20
26,23	1,32	1,48	1,25

Cuadro 15. Índice de Emisiones de CO de los Quemadores Circular, Cuadrado y Triangular.

U_{exit} [m/s]	EICO Circular [kg/kg _{fuel}]	EICO Cuadrado [kg/kg _{fuel}]	EICO Triangular [kg/kg _{fuel}]
1,31	4,89	13,19	15,40
2,62	12,85	13,19	12,85
3,93	9,66	12,18	11,03
5,25	7,73	9,76	9,66
6,56	10,57	9,76	9,61
7,87	8,81	9,76	10,73
9,18	5,53	9,76	13,27
10,49	5,53	9,76	12,78
11,80	5,16	14,07	6,62
13,11	4,30	14,07	15,97
14,42	3,87	14,97	14,69
15,74	4,17	9,55	11,72
17,05	4,42	8,31	10,16
18,36	3,23	7,40	8,56
19,67	5,17	6,79	8,56
20,98	4,08	6,26	8,14
22,29	3,79	6,83	9,56
23,60	3,66	6,83	9,04
24,91	4,48	6,83	9,23
26,23	4,20	6,83	11,15

Cuadro 16. Incertidumbre Estimada en las Mediciones Índices de Emisiones de CO y NO.

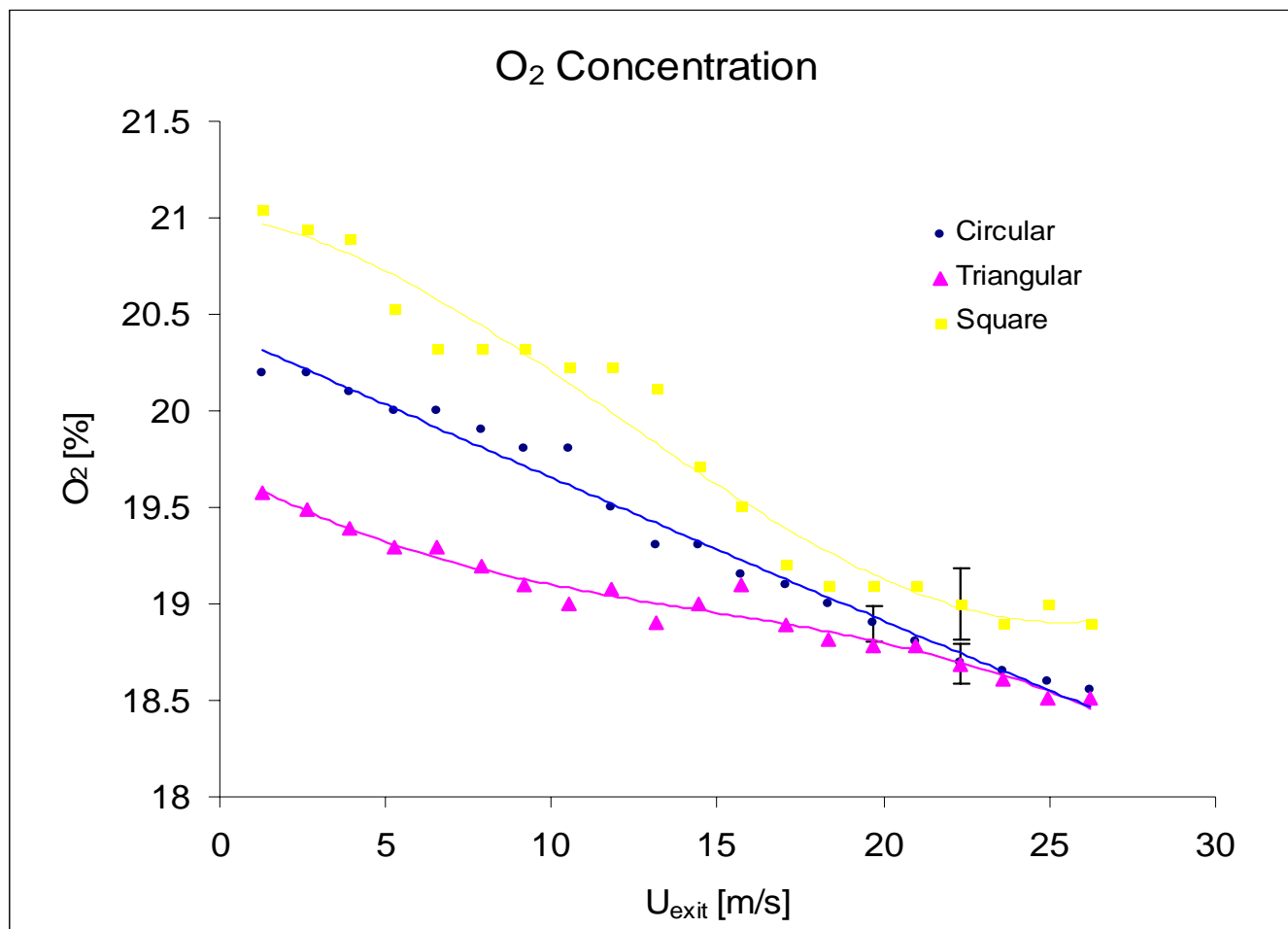
	U_{exit} [m/s]	NO [g/kg _{fuel}]	CO [g/kg _{fuel}]
Quemador Circular	19.67	0.03	2.01
Quemador Cuadrado	22.29	0.07	3.26
Quemador Triangular	22.29	0.03	3.86

3.6 CONCENTRACIONES GLOBALES DE O₂

Altas concentraciones de O₂ en los productos de la combustión significan, que la combustión se llevo a cabo de manera incompleta. Basado en la figura 34 se puede deducir que en la región laminar, el quemador triangular tiene una combustión mas completa que el quemador circular y cuadrado. Después de cierta velocidad de salida de combustible de alrededor de $U_{\text{exit}} = 15 \text{ m/s}$ la geometría de los quemadores no afecta la concentración de O₂ En los productos de la combustión. Los resultados mostraron que la combustión llevada a cabo por el quemador cuadrado es la mas incompleta hasta la velocidad de $U_{\text{exit}} = 15 \text{ m/s}$. en la región laminar y región de transición, el quemador triangular produjo 7% menos O₂. que el quemador circular y 11% menos O₂ que el quemador cuadrado.

Las concentraciones de O₂ para cada velocidad de salida de combustible se encuentran indicadas en el cuadro 17. La incertidumbre de las mediciones de concentraciones de O₂ están registradas en el cuadro 18

Figura 34. Concentración Global de O₂ en los Productos de la Combustión de Quemadores Circular, Cuadrado y Triangular en Función de la Velocidad de Salida del combustible.



Cuadro 17. Concentraciones Globales de O₂ en los Quemadores Circular, cuadrado y Triangular

U _{exit} [m/s]	O ₂ Circular [%]	O ₂ Cuadrado [%]	O ₂ Triangular [%]
1,31	20,20	21,04	19,58
2,62	20,20	20,94	19,48
3,93	20,10	20,89	19,39
5,25	20,00	20,53	19,29
6,56	20,00	20,33	19,29
7,87	19,90	20,33	19,19
9,18	19,80	20,33	19,10
10,49	19,80	20,23	19,00
11,80	19,50	20,23	19,07
13,11	19,30	20,12	18,91
14,42	19,30	19,72	19,00
15,74	19,15	19,51	19,10
17,05	19,10	19,20	18,89
18,36	19,00	19,10	18,81
19,67	18,90	19,10	18,79
20,98	18,80	19,10	18,79
22,29	18,70	19,00	18,69
23,60	18,65	18,90	18,61
24,91	18,60	19,00	18,51
26,23	18,55	18,90	18,51

Cuadro 18. Incertidumbre Estimada en las Mediciones de Concentraciones Globales de O₂

	U _{exit} [m/s]	O ₂ [%]
Quemador Circular	19.67	0.09
Quemador Cuadrado	22.29	0.18
Quemador Triangular	22.29	0.10

3.7 CONCENTRACIONES GLOBALES DE CO₂

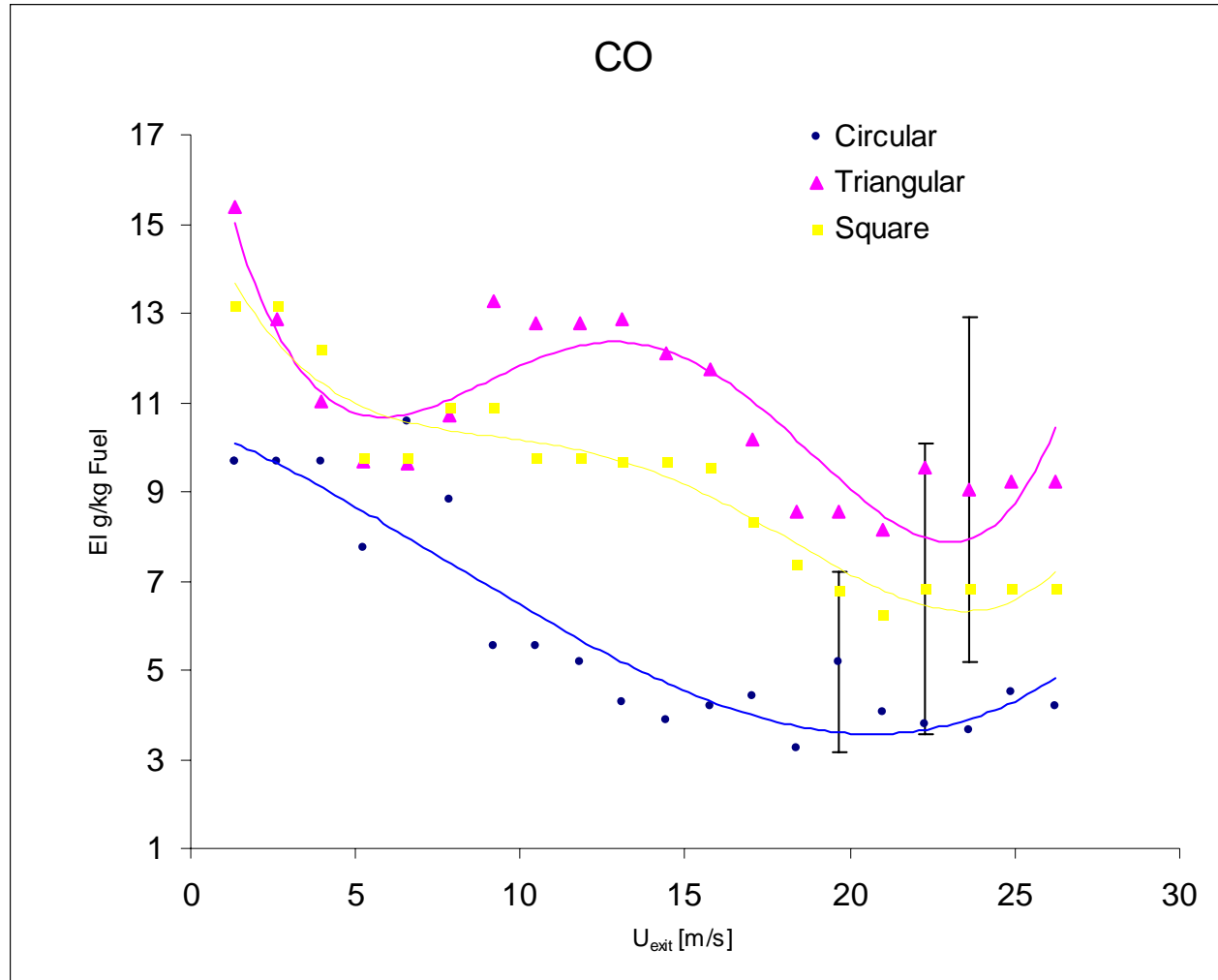
No se encontró diferencia aparente en las concentraciones globales de CO₂ para el quemador circular y triangular. El quemador cuadrado mostró la menor producción de CO₂ en los productos en la región laminar, pero mientras se incremento la velocidad de salida de combustible, la geometría de los quemadores no afecta la concentración de CO₂ en los productos.

Las concentraciones globales de CO₂ para cada velocidad de salida del combustible están tabuladas en el cuadro 19. La incertidumbre en las mediciones de concentraciones de CO₂ se encuentra registrada en el cuadro 20.

3.8 RESUMEN

En este capítulo se presentaron los resultados de las características globales de la llama, como la longitud de la llama, índices de emisiones de contaminantes, concentraciones de productos y fracción de radiación de la llama. Todas las características anteriores se dieron en función de la velocidad de salida del combustible.

Figura 35. Índice de Emisiones de CO de los Quemadores Circular, Cuadrado y Triangular en Función de la velocidad de salida del Combustible.



Cuadro 19. Concentraciones Globales de CO₂ en los Quemadores Circular, cuadrado y Triangular

U _{exit} [m/s]	CO ₂ Circular [%]	CO ₂ Cuadrado [%]	CO ₂ triangular [%]
1,31	0,25	0,10	0,25
2,62	0,30	0,10	0,25
3,93	0,40	0,20	0,25
5,25	0,50	0,20	0,40
6,56	0,50	0,30	0,55
7,87	0,60	0,30	0,63
9,18	0,70	0,40	0,65
10,49	0,70	0,40	0,68
11,80	0,75	0,40	0,80
13,11	0,90	0,50	0,85
14,42	1,00	0,65	0,93
15,74	1,10	1,00	1,10
17,05	1,20	1,15	1,20
18,36	1,20	1,10	1,20
19,67	1,30	1,20	1,20
20,98	1,30	1,30	1,35
22,29	1,40	1,40	1,35
23,60	1,45	1,40	1,35
24,91	1,50	1,40	1,48
26,23	1,60	1,40	1,48

Cuadro 20. Incertidumbre Estimada en las Mediciones de Concentraciones Globales de CO₂

	U _{exit} [m/s]	CO ₂ [%]
Circular Burner	19.67	0
Square Burner	22.29	0.08
Triangular Burner	22.29	0.05

4. TEST EN CFD

4.1 INTRODUCCIÓN

Un análisis numérico fue llevado a cabo para examinar los patrones de flujo de la inyección de propano en un estado estable de aire, utilizando diferentes geometrías de los puertos de los inyectores. Para este propósito, se utilizaron dos fuentes de inyección, un inyector triangular y un inyector circular, las figura 36 y 37 muestran la descripción del problema planteado, el cual pretende simular las condiciones experimentales. Este estudio computacional se realizó con la intención de averiguar los efectos que tiene la geometría de los inyectores de combustibles gaseosos en los parámetros que afectan la mezcla de propano y aire. Este estudio también intenta mostrar las aplicaciones de herramientas CFD en el momento de analizar la dinámica de fluidos. En la simulación numérica se estudiaron propiedades relacionadas con la mezcla de aire y propano, específicamente se estudió los parámetros de energía cinética turbulenta y velocidad. Este fue un análisis básico, en el cual se graficaron las propiedades en el eje central de la cámara de combustión y también se analizaron los contornos de energía cinética turbulenta y velocidad en el plano central de la cámara de combustión donde toma lugar la mezcla de propano y aire.

4.2 GENERACIÓN DE GEOMETRÍAS Y ENMALLADO

Para la generación de la geometría y el enmallado de la situación experimental, se utilizó un software generador de geometrías y enmallados

llamado GAMBIT 2.1. en las figuras 38 y 39 se muestran las geometrías y las mallas creadas y exportadas al programa CFD que permitieron hacer la simulación de la inyección de propano en un estado estable de aire usando un inyector circular y un inyector triangular. Los puertos de los inyectores triangular y circular fueron dimensionados de la misma forma que se hizo experimentalmente. La cámara de combustión fue hecha en forma cilíndrica para reducir el tiempo computacional.

Para el enmallado se utilizaron las mallas predeterminadas automáticamente por GAMBIT las cuales fueron cuadrática tipo mapeado para facilitar una malla mas densa en el área de la inyección de propano, y de esta manera adquirir resultados mas precisos del análisis.

4.3 ANÁLISIS NUMÉRICO

Las mallas fueron importadas desde un código CFD comercial llamado FLUENT 6.0, el cual fue usado para resolver el modelo numérico. Este estudio fue hecho para una condición de régimen turbulento con una velocidad de salida de combustible de $U_{exit} = 20.98$ m/s. La simulación fue basada en modelo Standard de turbulencia k-epsilon. En el anexo 4 se muestra un reporte de los parámetros, propiedades y suposiciones utilizadas en el modelo.

4.4 RESULTADOS

Los contornos de velocidad de las inyecciones de combustible gaseoso usando inyectores circular y triangular se muestran en las figuras 40 y 41. El contorno de velocidad corresponde al plano central del modelo y en el se

puede apreciar que el contorno de velocidad del quemador triangular es mas estrecho, también se observa que el perfil de velocidad abarca una distancia mucho mas larga que el inyector circular. Esto indica que mayor cantidad de combustible interactúa con el aire debido a que esta velocidad que abarca gran longitud, hace que la presión disminuya y se cree un diferencial de presión que es utilizado en la introducción de aire. En las figuras 44 y 45 se muestran las graficas de los valores de velocidad del combustible en el eje central de la cámara de combustión en función del desplazamiento de combustible, tomando como eje de referencia la salida del inyector. Este grafico muestra valores similares de velocidad hasta una distancia desde la salida del inyector de 0,85 m. Después de este punto, la velocidad cae a cero en el caso del inyector circular, mientras que en el caso del inyector triangular, aun existe un valor de velocidad

Los contornos de energía cinética turbulenta de los inyectores circular y triangular se muestran en la figura 42 y 43. En la figura 46 y 47 se observan los gráficos de la energía cinética de turbulencia en función de la distancia recorrida por el combustible desde la salida del inyector, el inyector triangular muestra valores de energía cinética turbulenta mucho mas altos que los del inyector circular, es decir la turbulencia creada por el flujo de combustible gaseoso a través de un puerto triangular es mayor que el flujo a través de un puerto circular.

El general, el estudio numérico muestra el comportamiento de la inyección de propano en aire estable a través de puertos de geometría circular y triangular. En general el inyector triangular muestra mejor tendencia a la introducción de aires a la zona de mezcla y mejor mezclado entre el combustible gaseoso inyectado y el aire estable.

Figura 36. Parámetros para el Inyector Circular.

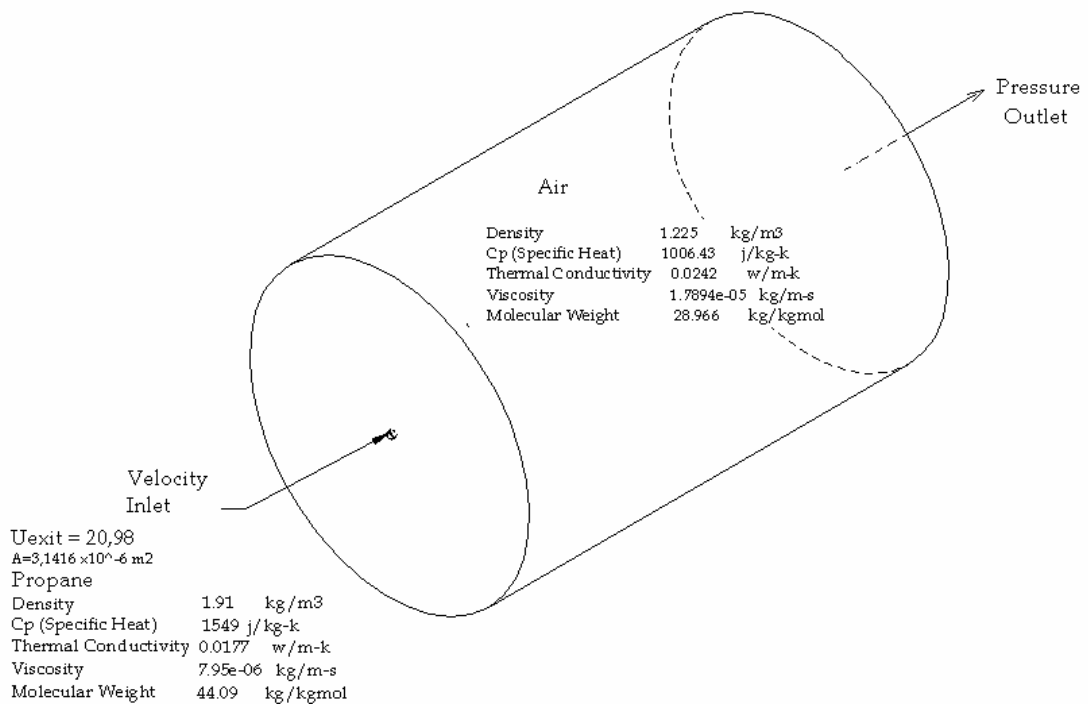


Figura 37. Parámetros para el Inyector Triangular.

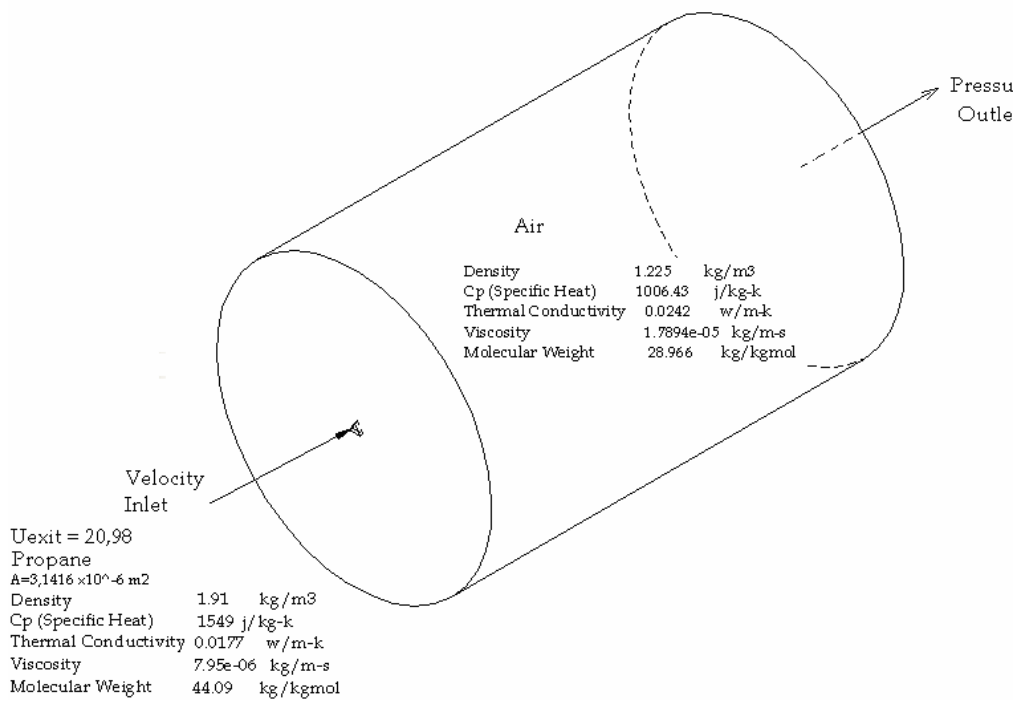


Figura 38. Geometría y Enmallado del Inyector Circular.

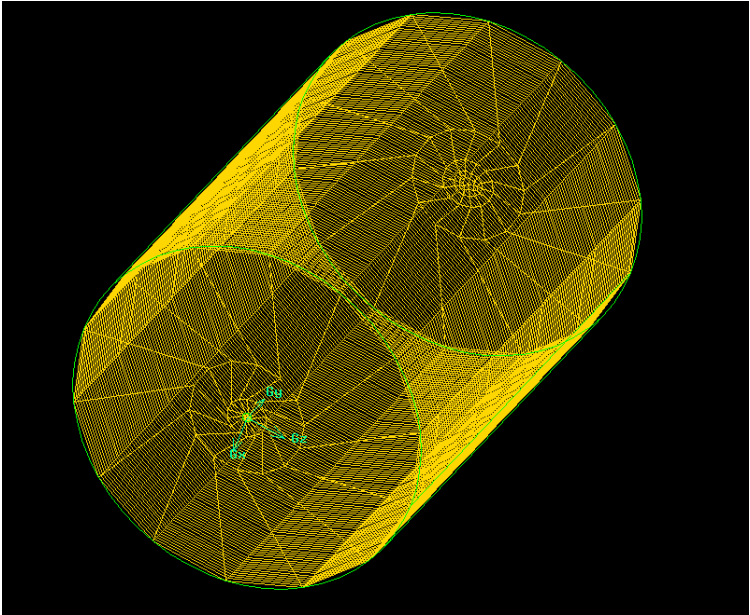


Figura 39. Geometría y Enmallado del Inyector Triangular.

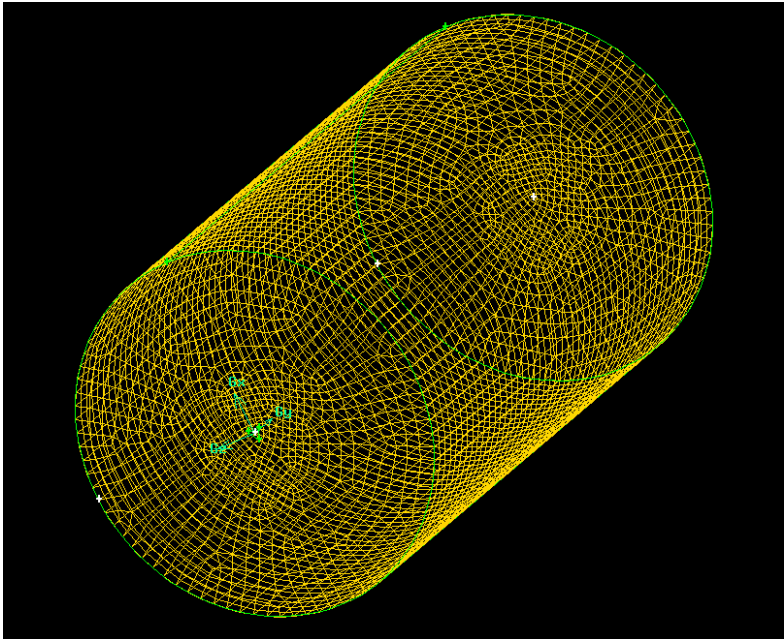


Figura 40. Contorno de Velocidad en el Plano Central de Cámara del Inyector Circular.

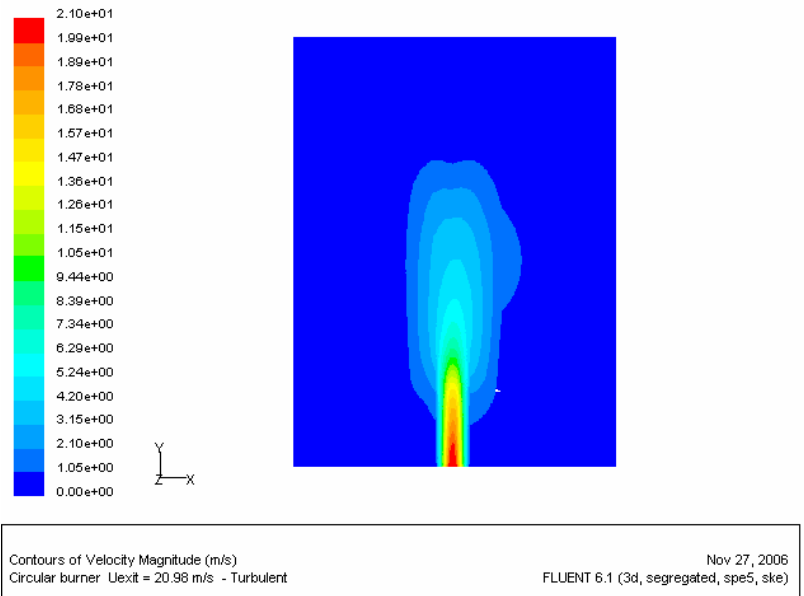


Figura 41. Contorno de Velocidad en el Plano Central de Cámara del Inyector triangular.

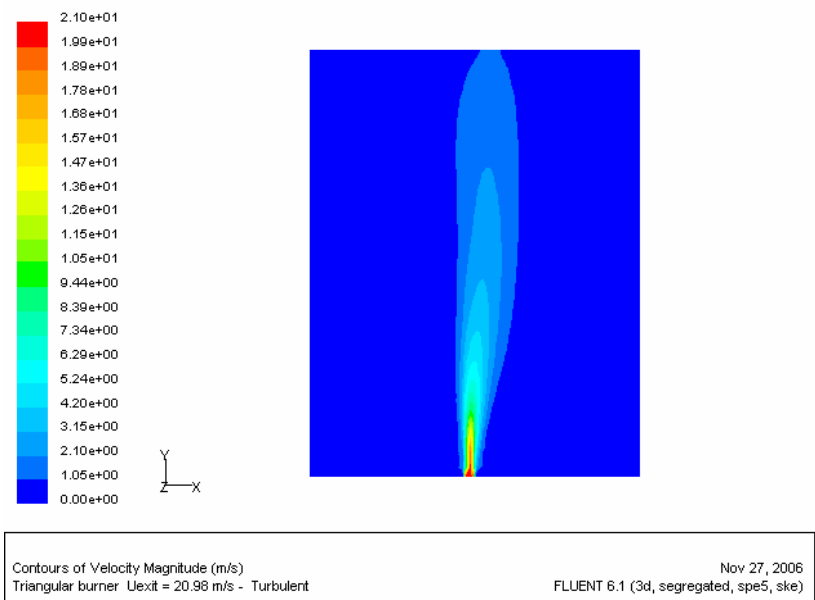


Figura 42. Contorno de Energía Cinética Turbulenta en el Plano Central de Cámara del Inyector Circular.

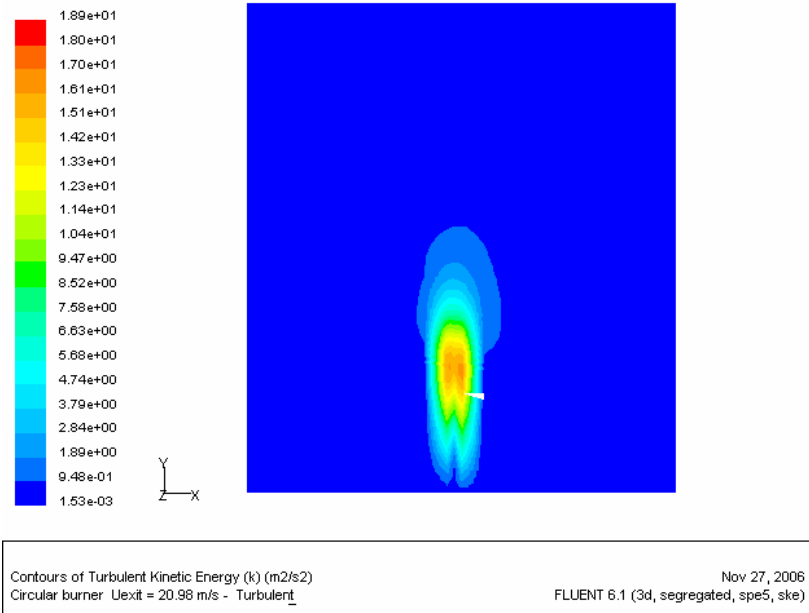


Figura 43. Contorno de Energía Cinética Turbulenta en el Plano Central de Cámara del Inyector Triangular.

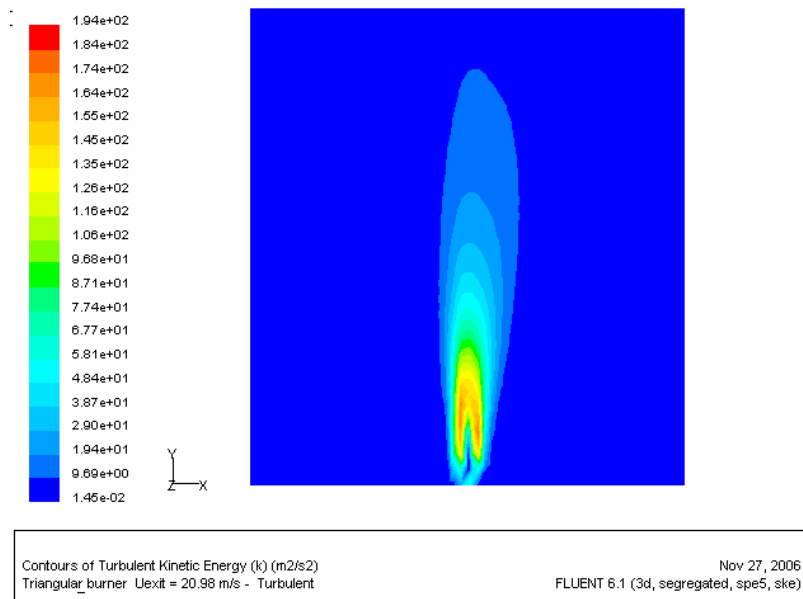


Figura 44. Perfil de Velocidad en el Eje Central de Cámara del Inyector Circular.

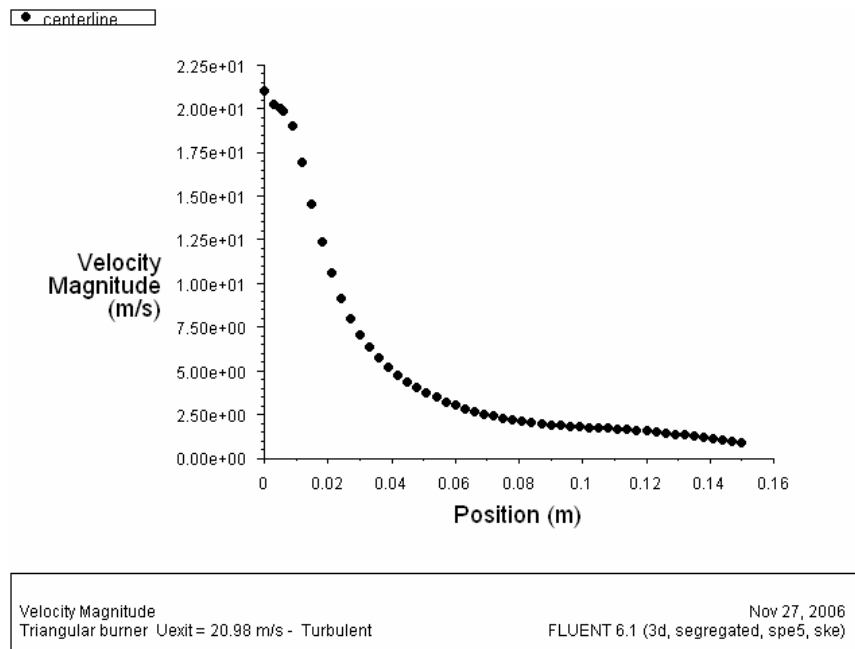


Figura 45. Perfil de Velocidad en el Eje Central de Cámara del Inyector Triangular.

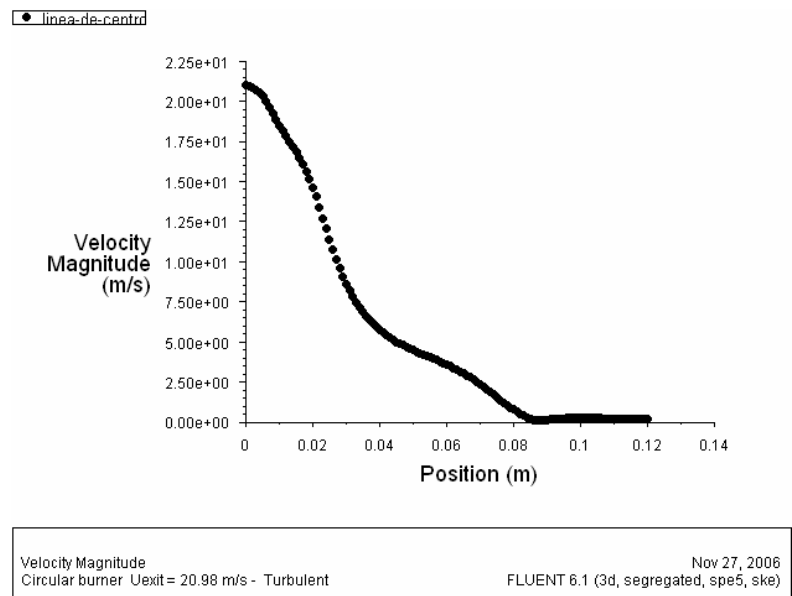


Figura 46. Perfil de Energía Cinética Turbulenta en el Eje Central de Cámara del Inyector Circular.

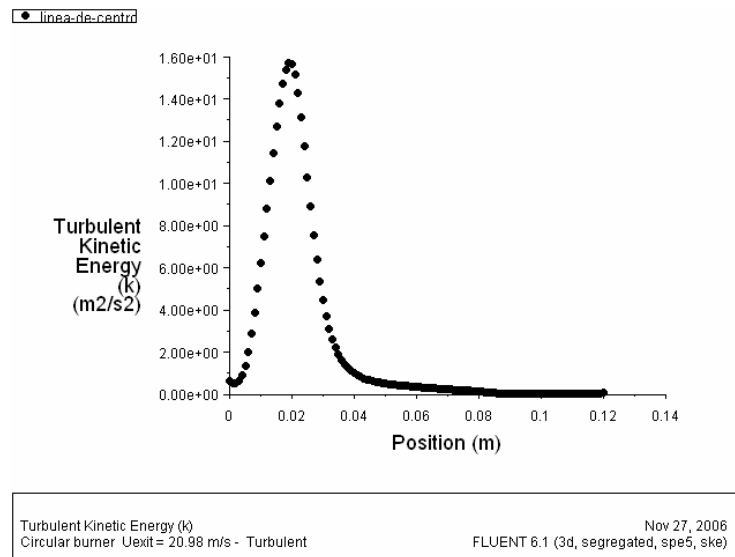
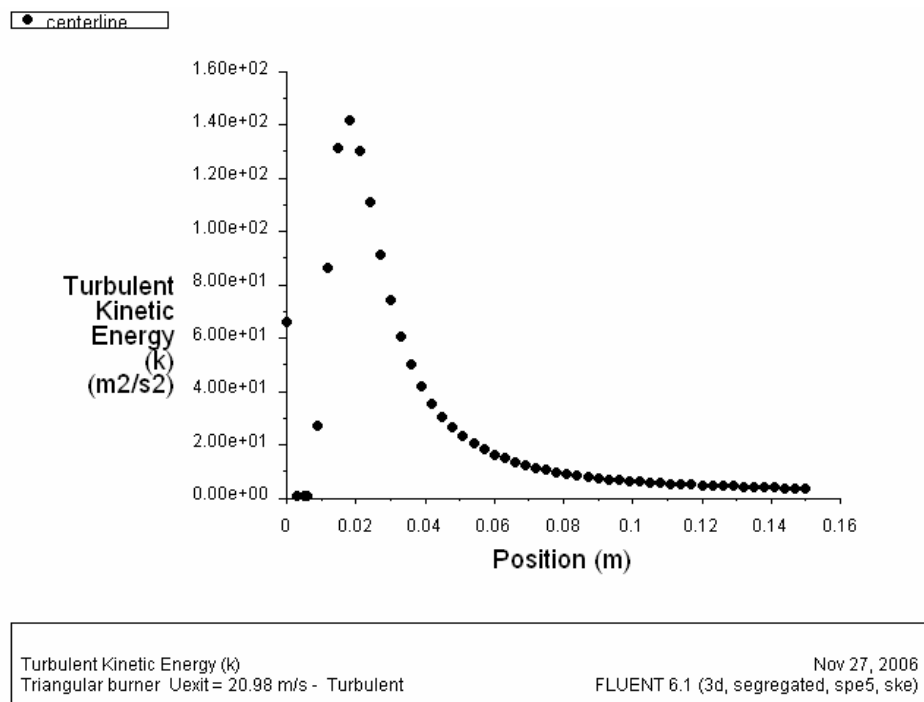


Figura 47. Perfil de Energía Cinética Turbulenta en el Eje Central de Cámara del Inyector Triangular.



CONCLUSIONES

Se realizaron estudios experimentales sobre llamas de difusión de combustible gaseoso orientadas verticalmente. Para el mecanismo de combustión se utilizaron quemadores circular, cuadrado y triangular con el fin de investigar el efecto de la geometría de los quemadores en las características de la llama. El rango de velocidad de salida estudiado estuvo entre 1.32 m/s y 26.23 m/s, velocidades que se encuentran dentro de las regiones laminar, de transición y turbulenta de la llama. Características globales de la llama (longitud de llama, Radiación, índices de emisiones y concentraciones) fueron medidas para delinear el efecto de la geometría en las llamas en función de la velocidad de salida de combustible.

Las siguientes conclusiones fueron extraídas de los resultados de la presente investigación.

LONGITUD DE LLAMA

- En la región laminar no hay diferencia apreciable en la longitud de la llama para el quemador circular, cuadrado y triangular, es decir, la geometría de salida del quemador no afecta la longitud de la llama para velocidades de salida de combustible que se encuentran dentro de esta región.
- En la región de transición, a medida que aumenta la velocidad de salida de combustible, las llamas producidas por el quemador triangular se van

volviendo mas cortas que las llamas producidas por el quemador cuadrado y circular.

- En la región de transición, el quemador cuadrado produce llamas levemente mas largas que el quemador circular. incrementando la velocidad de salida de combustible hasta la zona turbulenta, se presenta que el quemador circular produce las llamas mas largas mientras que el quemador triangular produce las llamas mas cortas.

RADIACIÓN Y EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN

- En la región laminar, el quemador circular tiene mayor fracción de radiación y por lo tanto es más eficiente que los quemadores triangular y cuadrado. Para esta región, el quemador cuadrado fue el menos eficiente para irradiar calor de la llama hacia los alrededores.
- El efecto de la geometría de los quemadores en la eficiencia de combustión decrece con el incremento de la velocidad de salida del combustible. Durante la etapa de transición, la radiación generada por los quemadores son similares.
- Para las velocidades de salida de combustible correspondientes a la región de turbulencia, se presenta que la radiación de las llamas del quemador circular es ligeramente mayor que la de los otros.

ÍNDICE DE EMISIONES DE NO

- El quemador triangular emite alrededor de 9% menos NO que el quemador circular.
- El quemador cuadrado emite la mayor cantidad de NO, aunque a medida que la velocidad de salida de combustible aumenta, la producción de NO del quemador cuadrado disminuye en comparación con los otros quemadores.

ÍNDICE DE EMISIONES DE CO

- No hay diferencia en la producción de CO de los tres quemadores, este comportamiento es explicado por la cantidad de CO₂ en los gases la cual es muy similar para las tres geometrías de quemadores.

CONCENTRACIÓN DE O₂

- El quemador triangular produce menos O₂ en los productos de la combustión, lo cual representa una combustión mas completa. La combustión más incompleta la presenta el quemador cuadrado, debido a que produce la mayor cantidad de O₂ en los productos de la combustión.
- El efecto de la geometría de los quemadores en la concentración de O₂ de los productos decrece a medida que aumenta la velocidad de salida del combustible.

CONCENTRACIÓN DE CO₂

- A medida que la velocidad de salida del combustible aumenta, la concentración de CO₂ en los productos de la combustión de los tres quemadores se hace similar. Para velocidades bajas, el quemador cuadrado

produce la menor cantidad de CO_2 en los productos, es decir, la combustión en la región laminar es mas incompleta que la de los otros quemadores.

- La producción de CO_2 del quemador triangular y el quemador circular no difieren para ningún régimen de flujo de combustible.

FLUENT TEST

El análisis hecho en CFD muestra que los patrones de flujo cuando se inyecta propano a través de puertos de diferente geometría son diferentes.

Los perfiles de velocidad mostraron que el inyector triangular permite una mayor introducción de aire hacia el área de mezcla.

Los perfiles de turbulencia muestran que la energía cinética turbulenta del inyector triangular es mayor que la del inyector circular, esto muestra que la geometría triangular permite una mezcla mas eficiente de aire y combustible gaseoso, debido a la mayor turbulencia generada en la zona de inyección.

En general, el quemador triangular definitivamente muestra una considerable reducción de las emisiones de NO para todos los rangos de flujo analizados, aunque a velocidades bajas, esta reducción de emisiones no justifica la disminución de fracción de radiación en comparación con el quemador circular.

Es muy importante, tener en cuenta el fenómeno de la levitación de llama, el cual es muy común de en muchos quemadores industriales, hornos, calderas e incluso en las estufas y calentadores de agua de los hogares se presenta este fenómeno. El aditamento de combustibles de baja densidad como el

hidrogeno son una excelente opción para evitar este fenómeno y eliminar el desgaste innecesario de combustible.

RECOMENDACIONES

Estudios relacionados con el efecto de la geometría de quemadores no circulares han mostrado que hay buenas posibilidades de reducir emisiones de gases contaminantes.

Se recomienda que este proyecto se extienda y que estudie el comportamiento estructural de la llama para determinar en su totalidad el efecto de la geometría de los quemadores en el proceso de combustión

BIBLIOGRAFÍA

CHEMICAL AND ENGINEERING NEWS, p. 59. July 10, 2006, "Production: Growth is the Norm".

FENIMORE, C.P., (1974) Formation of Nitric Oxide in premixed Hydrocarbon flames.

FLUENT 6.0 DOCUMENTATION, Fluent Inc., 2001.

FRISTROM, R.M and Westenberg, A.A. (1965). Flame Structure. NY: McGraw-Hill Publications.

HARIHARAN, P. (2004). An experimental study of elliptic turbulent partially premixed propane/hydrogen/air flames with and without coflow air. Masters thesis, AME, University of Oklahoma.

KANURY, A.M. (1984). Introduction to the combustion phenomena. NY: Gordon and Breach Science Publishers, New York, NY.

NIKITENKO, G., ROTHWELL, F.A., YAGIELA, A.S., and BURKHARDT, J. (October 18-20, 1993). Test results of a low NO_x combustion system for Boston Edison's new boston unit 1. paper BR-1540 International Joint Power Generation Conference. Kansas City, Missouri.

THIRTEEN SYMPOSIUM (INTERNATIONAL ON COMBUSTION). The Combustion institute Pittsburgh, PA. 373-380.

TURNS, S.R., *An introduction to combustion: Concepts and Applications*, 2nd Ed., McGraw-Hill, Boston, 2000.

SMITH, T.L. (2004). *Relative buoyancy and momentum effects in circular and elliptic burner jet flames*. Masters thesis, AME, University of Oklahoma.

SUBBA, S. and GOLLAHALLI, S.R. (1995). *Effects of burner exit geometry on combustion characteristics of inshot burners used in residential gas furnace systems*. Masters thesis, AME, University of Oklahoma.

ANEXOS

Anexo 1. CALIBRACIÓN DE EQUIPOS

Rotámetro de Propano

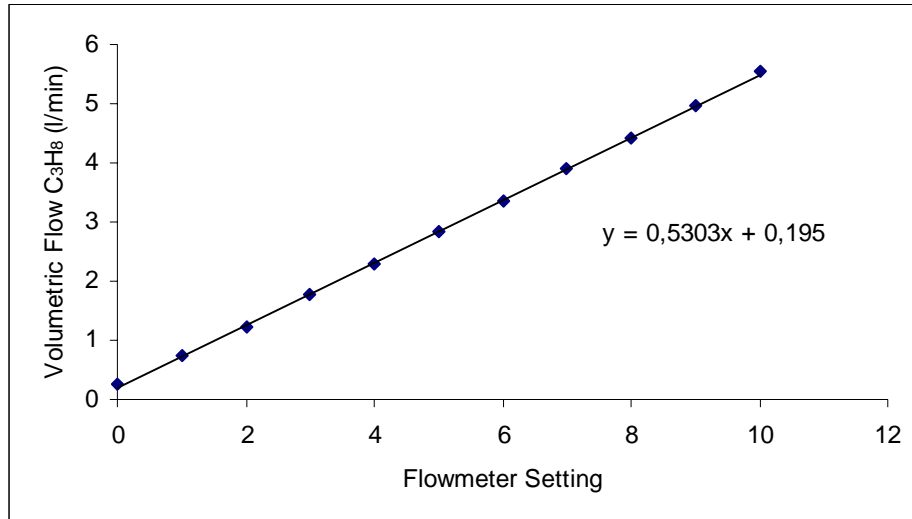


Fig. A.1.1 Calibración del Rotámetro de Propano

Rotámetro de Hidrogeno

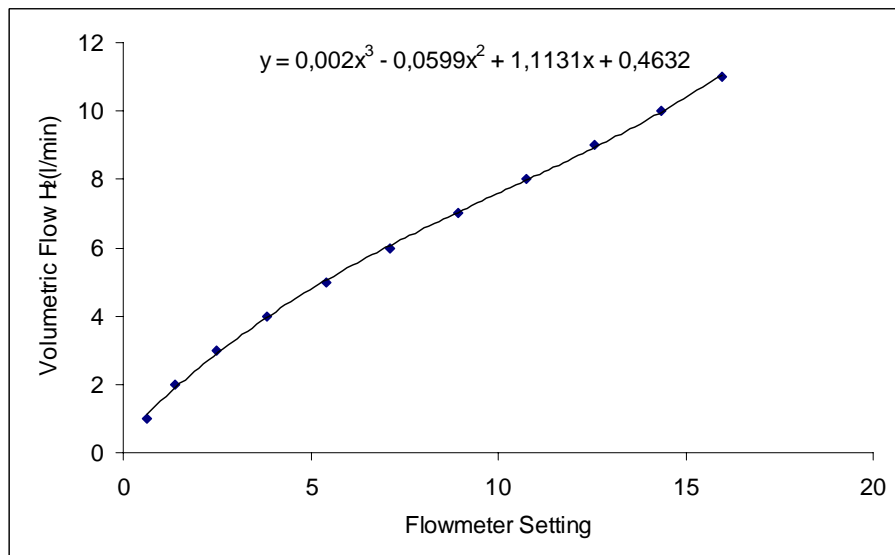


Fig. A.1.2 Calibración del Rotámetro de Hidrogeno

Pirheliómetro

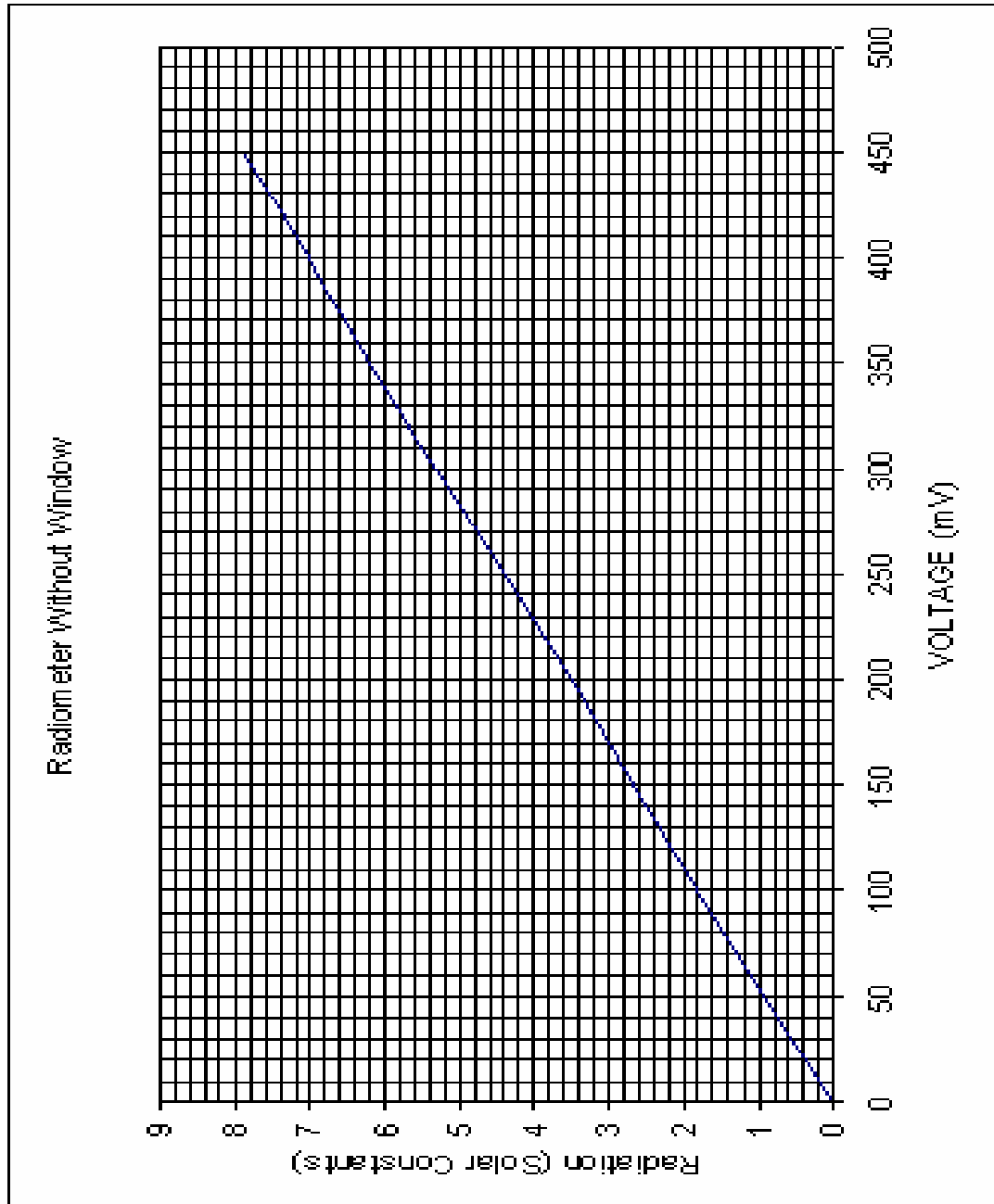


Fig A1.3 Grafica de Calibración del Pirheliómetro Suministrada por Hy-Cal Engineering

Anexo 2. CALCULO TIPO

- Velocidad de salida de co combustible U_{exit}

El contenido de hidrogeno en la mezcla es de 10% en base volumetrica

$$\begin{array}{cc} X_{H2} & X_{C3H8} \\ 0,1 & 0,9 \end{array}$$

$$U_{exit} = Re \cdot \mu / (\rho D)$$

Las siguientes ecuaciones dan la viscosidad de la mezcla

$$\mu_{mixture} = \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{X_i \mu_i}{\sum_{j=1}^{\infty} X_j \phi_{ij}} \right]$$

$$\phi_{ij} = 1 \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{MW_i}{MW_j} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{MW_j}{MW_i} \right)^{1/4} \right]^2$$

$\mu_{C3H8}(Ns/m^2)$	μ_{H2}	$\Phi_{H2,C3H8}$	$\Phi_{H2,H2}$	$\Phi_{C3H8,H2}$	$\Phi_{C3H8,C3H8}$
8,26E-06	9,00E-06	3,679648	1,00E+00	0,15319302	1,00E+00

$$\begin{array}{l} \mu_{mix} \\ 8,38E-06 \end{array}$$

La densidad de la mezcla esta definida como la suma de las densidades de cada componente multiplicadas por la fracción molar.

$\rho_{C_3H_8}$	ρ_{H_2}	ρ_{mix}
		[Kg/m ³]
1,7666466	0,080176	1,59799954

Las velocidades de salida de combustible fueron calculadas con base en el número de Reynolds del quemador circular para un rango desde 500 hasta 10000.

Diameter D [m]	0,002
Area A [m ²]	3,1416E-06

Para un número de Reynolds de 3000.

$$U_{exit} = \frac{Re \mu}{\rho D}$$

$$U_{exit} = 7,87 \text{ [m/s]}$$

- Ratasa de Flujo

Flujo Volumétrico de Combustible

$$Q_{mix} = U_{exit} A$$

$$Q_{mix} = 1,48 \text{ [l/min]}$$

Flujo Volumétrico de Hidrogeno

$$X_{H2} = Q_{H2} / Q_{mix}$$

$$Q_{H2} = 0,15 \text{ [l/min]}$$

Flujo Volumetrico de Propano

$$X_{C3H8} = Q_{C3H8} / Q_{mix}$$

$$Q_{C3H8} = 1,33 \text{ [l/min]}$$

$$m^o_{mix} = Q_{mix} \rho_{mix}$$

$$m^o_{mix} = 3,9497E-05 \text{ [Kg/s]}$$

- Radiación global

$$MW_{mix} = MW_{C3H8} X_{C3H8} + MW_{H2} X_{H2}$$

MW _{C3H8}	MW _{H2}	X _{H2}	X _{C3H8}	MW _{mix}
44.068	2	0.1	0.9	39.8612

$$Y_i = \frac{X_i MW_i}{MW_{mix}}$$

Y _{C3H8}	Y _{H2}
0,995	0,005

$$HV_{mix} = HV_{C3H8} Y_{C3H8} + HV_{H2} Y_{H2}$$

HV _{C3H8} [J/Kg]-	HV _{H2} [J/Kg]-	HV _{mix} [J/Kg]
46357000	141790000	46834165

Para el quemador circular, a una velocidad de $U_{exit} = 7,87 \text{ [m/s]}$

$$1 \text{ SC} = 1353 \text{ W/m}^2$$

$Q_R = 102.89 \text{ [W/m}^2\text{]} \text{ using}$

$D = 0,5 \text{ [m]}$

$$F = \frac{4Q_R\pi D^2}{m_{mix}^\circ (HV_{mix})}$$

$F = 17,47 \%$

- Índices de Emisiones

El índice de emisiones para una especie 'i' es la razón entre la masa de la especie 'i' y la masa de combustible quemado durante el proceso de combustión (Turns, 1996).

$$EI_i = \frac{m_{i,emitted}}{m_{F,burnt}}$$

El índice de emisiones para la combustión de hidrocarburos en aire puede ser expresada de la siguiente manera:

$$EI_i = \frac{X_i}{X_{CO} + X_{CO_2}} \left(\frac{xMW_i}{MW_{mix}} \right)$$

Donde

X =Fracción Molar

x = Numero de moles de carbón en una mol de combustible (C_xH_y)

MW_i = Peso molecular de la especie [Kg/Kg-mole]

MW_{mix} = Peso molecular del combustible [Kg/Kg-mole]

para $U_{exit} = 7,87$ [m/s]

$X_{NO} = 0,000004463$

$X_{CO} = 0,000026$

$X_{CO_2} = ,.006$

$x = 3$

$MW_{CO} = 28$ [Kg/Kg-mole]

$MW_{mix} = 44,068$ [Kg/Kg-mole]

$EI_{CO} = 8,22$ [g/Kg_{Fuel}]

$EI_{NO} = 1,512405578$ [g/Kg_{Fuel}]

Anexo 3. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

En este estudio, los errores al azar han sido estimados repitiendo los experimentos cuatro veces. La instrumentación fue calibrada antes de tomar mediciones.

El error al azar es calculado como sigue:

tenemos x_1, x_2, \dots, x_n como las mediciones y \bar{x} con la media (el promedio) de estas mediciones.

La desviación estándar de la población que contiene el grupo de n mediciones es:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

La desviación estándar de la media es

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$

El error de precisión es dado por

$$P = t_{\alpha/2} S_{\bar{x}}$$

Donde $t_{\alpha/2}$ es el valor t de Student

Para una confiabilidad del $t_{\alpha/2} = 3.182$

Calculo Tipo de Incertidumbre

Quemador circular

Flame Length	trial 1	trial 2	trial 3	trial 4	Average	Sx	Sx'	P
[cm]	6.80	7.02	6.71	7.07	6.90	0.17	0.09	0.28

Anexo 4. PARÁMETROS DEL ANÁLISIS EN FLUENT 6.0

Models

Model	Settings
Space	3D
Time	Steady
Viscous	Standard k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Standard Wall Functions
Heat Transfer	Enabled
Solidification and Melting	Disabled
Radiation	None
Species Transport	Non-Reacting (5 species)
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

Boundary Conditions

Zones

name	id	type
fluid	2	fluid
wall	3	wall
outlet	4	pressure-outlet
inlet	5	velocity-inlet
default-interior	7	interior

Boundary Conditions

fluid

Condition

Value

Material Name	propane-air	
Specify source terms?	no	
Source Terms	()	
Specify fixed values?	no	
Local Coordinate System for Fixed Velocities		no
Fixed Values	()	
Motion Type	0	
X-Velocity Of Zone	0	
Y-Velocity Of Zone	0	
Z-Velocity Of Zone	0	
Rotation speed	0	
X-Origin of Rotation-Axis	0	
Y-Origin of Rotation-Axis	0	
Z-Origin of Rotation-Axis	0	
X-Component of Rotation-Axis		0
Y-Component of Rotation-Axis		0
Z-Component of Rotation-Axis		1
Deactivated Thread	no	
Laminar zone?	no	
Set Turbulent Viscosity to zero within laminar zone?		yes
Porous zone?	no	
Conical porous zone?	no	
X-Component of Direction-1 Vector		1
Y-Component of Direction-1 Vector		0
Z-Component of Direction-1 Vector		0
X-Component of Direction-2 Vector		0
Y-Component of Direction-2 Vector		1
Z-Component of Direction-2 Vector		0
X-Coordinate of Point on Cone Axis		1
Y-Coordinate of Point on Cone Axis		0
Z-Coordinate of Point on Cone Axis		0
Half Angle of Cone Relative to its Axis		0
Direction-1 Viscous Resistance		0
Direction-2 Viscous Resistance		0
Direction-3 Viscous Resistance		0
Direction-1 Inertial Resistance		0
Direction-2 Inertial Resistance		0
Direction-3 Inertial Resistance		0
C0 Coefficient for Power-Law		0
C1 Coefficient for Power-Law		0
Porosity	1	

Solid Material Name aluminum

wall

Condition	Value
Wall Thickness	0
Heat Generation Rate	0
Material Name	aluminum
Thermal BC Type	1
Temperature	300
Heat Flux	0
Convective Heat Transfer Coefficient	0
Free Stream Temperature	300
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
External Emissivity	1
External Radiation Temperature	300
Wall Roughness Height	0
Wall Roughness Constant	0.5
	(0)
	((constant . 0) (profile)))
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0

Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Surface tension gradient	0

outlet

Condition	Value

Gauge Pressure	0
Radial Equilibrium Pressure Distribution	no
Backflow Total Temperature	300
Backflow Direction Specification Method	1
Coordinate System	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Turbulence Specification Method	0
Backflow Turb. Kinetic Energy	1
Backflow Turb. Dissipation Rate	1
Backflow Turbulence Intensity	0.1
Backflow Turbulence Length Scale	1
Backflow Hydraulic Diameter	1
Backflow Turbulent Viscosity Ratio	10
Backflow	((constant . 0) (profile))
is zone used in mixing-plane model?	no
Specify targeted mass-flow rate	no
Targeted mass-flow	1

inlet

Condition	Value

Velocity Specification Method	2
Reference Frame	0

Velocity Magnitude	20.98
Coordinate System	0
X-Velocity	0
Y-Velocity	0
Z-Velocity	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Angular velocity	0
Temperature	300
Turbulence Specification Method	2
Turb. Kinetic Energy	10
Turb. Dissipation Rate	10
Turbulence Intensity	0.099999994
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	1
Turbulent Viscosity Ratio	10

(((constant . 1) (profile)) ((constant . 0) (profile))
((constant . 0) (profile)) ((constant . 0) (profile)))
is zone used in mixing-plane model? no

default-interior

Condition Value

Solver Controls

Equations

Equation Solved

Flow yes

Turbulence yes

c3h8 yes
o2 yes
co2 yes
h2o yes
Energy yes

Numerics

Numeric Enabled

Absolute Velocity Formulation yes

Relaxation

Variable	Relaxation Factor
-----	-----
Pressure	0.3
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.7
Turbulence Kinetic Energy	0.8
Turbulence Dissipation Rate	0.8
Turbulent Viscosity	1
c3h8	1
o2	1
co2	1
h2o	1
Energy	1

Linear Solver

Variable	Solver Type	Termination Criterion	Residual Tolerance	Reduction Tolerance
-----	-----	-----	-----	-----
Pressure	V-Cycle	0.1		
X-Momentum	Flexible	0.1	0.1	0.7
Y-Momentum	Flexible	0.1	0.1	0.7
Z-Momentum	Flexible	0.1	0.1	0.7
Turbulence Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.1	0.7
Turbulence Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.1	0.7
c3h8	Flexible	0.1	0.1	0.7

o2	Flexible	0.1	0.7
co2	Flexible	0.1	0.7
h2o	Flexible	0.1	0.7
Energy	Flexible	0.1	0.7

Discretization Scheme

Variable	Scheme
Pressure	Standard
Pressure-Velocity Coupling	SIMPLE
Momentum	First Order Upwind
Turbulence Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulence Dissipation Rate	First Order Upwind
c3h8	First Order Upwind
o2	First Order Upwind
co2	First Order Upwind
h2o	First Order Upwind
Energy	First Order Upwind

Solution Limits

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5000000
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

Material Properties

Material: propane-air (mixture)

Property	Units	Method	Value(s)
Mixture Species		names	(c3h8 o2 co2 h2o n2)
Density	kg/m3	incompressible-ideal-gas	#f

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	mixing-law	#f
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0454
Viscosity	kg/m-s	constant	1.72e-05
Mass Diffusivity	m ² /s	constant-dilute-appx	(2.88e-05)
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0

Material: nitrogen (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)

Density	kg/m ³	constant	1.138
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1040.67
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.663e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.0134
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.621
L-J Energy Parameter	k	constant	97.53
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: nitrogen (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)

Density	kg/m ³	constant	1.138
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1040.67
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.663e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.0134
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.621
L-J Energy Parameter	k	constant	97.53
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: water-vapor (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)

Density	kg/m ³	constant	0.5542
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	2014
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0261

Viscosity	kg/m-s	constant	1.34e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	18.01534
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	2.605
L-J Energy Parameter	k	constant	572.4
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: water-vapor (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m ³	constant	0.5542
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	2014
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0261
Viscosity	kg/m-s	constant	1.34e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	18.01534
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	2.605
L-J Energy Parameter	k	constant	572.4
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: carbon-dioxide (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m ³	constant	1.7878
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	840.37
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0145
Viscosity	kg/m-s	constant	1.37e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	44.00995
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.941
L-J Energy Parameter	k	constant	195.2
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: carbon-dioxide (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m ³	constant	1.7878
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	840.37

Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0145
Viscosity	kg/m-s	constant	1.37e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	44.00995
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.941
L-J Energy Parameter	k	constant	195.2
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: oxygen (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	1.2999
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	919.31
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0246
Viscosity	kg/m-s	constant	1.919e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	31.9988
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.458
L-J Energy Parameter	k	constant	107.4
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: oxygen (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	1.2999
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	919.31
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0246
Viscosity	kg/m-s	constant	1.919e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	31.9988
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.458
L-J Energy Parameter	k	constant	107.4
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: propane (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	1.91

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1549
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0177
Viscosity	kg/m-s	constant	7.95e-06
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	44.09
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	0
L-J Energy Parameter	k	constant	0
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: propane (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)

Density	kg/m ³	constant	1.91
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1549
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0177
Viscosity	kg/m-s	constant	7.95e-06
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	44.09
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	0
L-J Energy Parameter	k	constant	0
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)

Density	kg/m ³	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: aluminum (solid)

Property	Units	Method	Value(s)

Density kg/m³ constant 2719
Cp (Specific Heat) j/kg-k constant 871
Thermal Conductivity w/m-k constant 202.4

Anexo 5. CARTA AL COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO

Anexo 6 - Paper