

**CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.**

**Caracterización de Llamas mediante
Termometría de Doble Longitud de Onda e
Interferometría de Desplazamiento Lateral**

Tesis como requisito para obtener el grado de
Maestro en Ciencias (Óptica)

Presenta
JUAN CARLOS RAMÍREZ GRANADOS

Asesor
Dr. Gonzalo Páez Padilla

León, Gto.

Agosto del 2006

ÍNDICE

RESUMEN	i
OBJETIVOS	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS	vii

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1. Introducción	1
1.2. Definiciones	3
1.3. Combustible	6
1.3.1. Combustibles Líquidos	6
1.3.1.1. Gasolina	7
1.3.1.1.1. Composición	7
1.3.1.1.2. Propiedades	8
1.3.1.1.3. Características Ambientales	8
1.3.1.2. Gasoil	9
1.3.1.2.1. Composición	9
1.3.1.2.2. Propiedades	9
1.3.1.2.3. Características Ambientales	10
1.3.2. Combustibles Gaseosos	10
1.3.2.1. Gases Licuados del Petróleo	10
1.3.2.1.1. Composición	10
1.3.2.1.2. Propiedades	11
1.3.2.1.3. Características Ambientales	11
1.3.2.2. Gas Natural	12
1.3.2.2.1. Composición	12
1.3.2.2.2. Propiedades	13
1.3.2.2.3. Características Ambientales	13
1.3.2.2.4. Consumo de Gas Natural	14
1.3.2.2.5. Reservas Mundiales de Gas Natural	15

1.4. Comburente	16
1.4.1. Propiedades del Aire	16
1.5. Diagnóstico de la Combustión	18
1.6. Conclusiones	19

CAPÍTULO II. LLAMAS LAMINARES DE DIFUSIÓN A CHORRO

2.1. Introducción	21
2.2. Conceptos Básicos de Termodinámica	22
2.3. Estequiometría de los Procesos de Combustión	22
2.3.1. Cálculos Estequiométricos	24
2.4. Efectos de la Disociación	26
2.5. Temperatura Adiabática de la Llama	27
2.6. Estructura Geométrica de las Llamas de Difusión a Chorro	31
2.6.1. Factores que Afectan a la Longitud de la Llama	36
2.6.1.1. Flujo Volumétrico de Combustible y Geometría de la Boquilla	36
2.6.1.2. Estequiometría de la Combustión	38
2.6.1.2.1. Tipo de Combustible	38
2.6.1.2.2. Aire Primario	39
2.6.1.2.3. Contenido de Oxígeno en el Aire	40
2.6.1.2.4. Disolución del Combustible en Gas Inerte	41
2.7. Propiedades Ópticas de las Llamas	42
2.7.1. Clasificación de los Espectros de Emisión	44
2.7.2. Espectros de las Llamas	46
2.8. Conclusiones	51

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE

3.1. Introducción	53
3.2. Técnicas para la Caracterización de los Flujos de la Combustión	53
3.2.1. Medidores de Desplazamiento Positivo	54
3.2.2. Manómetros	55
3.2.3. Anemometría Mediante Alambre Caliente	55

3.2.4. Velocimetría de Imágenes de Partículas (<i>PIV</i>)	56
3.2.5. Velocimetría por Patrones de Moteado	57
3.2.6. Velocimetría Láser por Efecto Doppler	57
3.3. Composición Química de los Productos de la Combustión	58
3.3.1. Absorción Selectiva	58
3.3.2. Cromatografía de Gases	58
3.3.3. Espectrometría de Masas	59
3.4. Técnicas para el Diagnóstico de las Llamas	59
3.4.1. Técnicas Ópticas para el Diagnóstico de las Llamas	60
3.4.1.1. Tomografía	63
3.4.1.2. Interferometría	64
3.4.1.3. Deflectometría de Moiré	64
3.4.1.4. Espectroscopia Raman	64
3.4.1.5. Esparcimiento Raman Anti-Stokes Coherente	65
3.4.1.6. Fluorescencia Inducida por Láser (<i>LIF</i>)	66
3.4.1.7. Incandescencia Inducida por Láser	67
3.4.2. Termometría de Llamas	68
3.4.2.1. Termometría por Contacto	68
3.4.2.2. Pirometría	70
3.4.2.2.1. Pirómetros de Banda Ancha	72
3.4.2.2.2. Pirómetros de Banda Estrecha	73
3.4.2.2.3. Pirómetros de Doble Longitud de Onda	74
3.4.2.2.4. Pirómetros Multiespectrales	76
3.4.2.2.5. Pirómetros Ópticos	77
3.4.2.2.5.1. Pirómetros Ópticos Manuales	78
3.4.2.2.5.2. Pirómetros Ópticos Automáticos	78
3.4.2.2.6. Consideraciones Generales de la Pirometría	79
3.5. Conclusiones	80

**CAPÍTULO IV. CARACTERIZACIÓN DE LLAMAS MEDIANTE
TERMOMETRÍA DE DOBLE LONGITUD DE ONDA**

4.1. Introducción	82
4.2. Fundamentos de la Termometría de Doble Longitud de Onda (<i>TDLO</i>)	83
4.3. Condiciones para el Uso de la <i>TDLO</i>	85
4.4. Longitudes de Llama Teóricas	87
4.5. Arreglo Experimental	90
4.5.1. Sistema de Combustión	90
4.5.2. Sistema Óptico	91
4.5.3. Sistema de Procesamiento de Datos	92
4.6. Mediciones	93
4.7. Resultados	98
4.8. Verificación de las Condiciones para el Uso de la <i>TDLO</i>	102
4.9. Conclusiones	103

**CAPÍTULO V. CARACTERIZACIÓN DE LLAMAS MEDIANTE
INTERFEROMETRÍA DE DESPLAZAMIENTO LATERAL**

5.1. Introducción	105
5.2. Fundamentos de la Interferometría de Desplazamiento Lateral (<i>IDL</i>)	106
5.3. Arreglo Experimental	109
5.4. Análisis de Fourier de los Interferogramas de Desplazamiento Lateral	112
5.5. Resultados	116
5.6. Conclusiones	120

CONCLUSIONES GENERALES	122
-------------------------------------	-----

TRABAJO A FUTURO	124
-------------------------------	-----

REFERENCIAS	125
--------------------------	-----

RESUMEN

La combustión de los materiales fósiles tiene un gran impacto en el desarrollo de la vida del hombre. Los combustibles fósiles más consumidos son la gasolina, los gases licuados del petróleo y el gas natural. Estos combustibles son usados mayoritariamente en la generación de energía eléctrica, procesos industriales, casas, comercios y vehículos de transporte. Los combustibles fósiles son fuentes de energía no-renovables y se cree que en las próximas décadas su escasez puede provocar conflictos sociales. La escasez de los energéticos también incrementa su precio de venta. Otro factor importante de cualquier proceso de combustión es la emisión de contaminantes a la atmósfera. Productos de la combustión como los óxidos nitrosos, los óxidos de azufre; el monóxido de carbono, el dióxido de carbono y el ozono deterioran la calidad del aire que respiramos. Estos gases contribuyen al calentamiento global y algunos de ellos son responsables de la lluvia ácida. Todos los sistemas de combustión están regulados por las normas ambientales de cada país o región. Estas normas generalmente establecen las emisiones contaminantes máximas y las características que deben tener las llamas para que los usuarios las manipulen con seguridad.

Los altos costos de los energéticos, las emisiones contaminantes y los riesgos de sufrir quemaduras pueden ser minimizados mediante sistemas de combustión más eficientes, limpios y seguros. Un sistema de combustión eficiente transforma la máxima cantidad de energía química en energía térmica y al mismo tiempo produce una cantidad mínima de contaminantes. El diseño de sistemas de combustión más eficientes, limpios y seguros contribuye al aprovechamiento de los recursos energéticos y reduce el costo de producción de innumerables artículos.

Para diseñar mejores quemadores es necesario conocer los procesos que ocurren durante la combustión y las características de las llamas. Algunas de las principales características de las llamas como su distribución de temperatura y su longitud son

difíciles de medir con instrumentos de contacto. Una de las dificultades radica en que las llamas son objetos de fase cuyas propiedades varían en su interior. Las altas temperaturas de las llamas pueden dañar al instrumento de medición si éste es de contacto. Igualmente, la estructura geométrica de la llama es modificada al contacto con otros objetos.

Así pues, para conocer las características de las llamas necesitamos una técnica de diagnóstico capaz de realizar mediciones sin perturbar a la llama. Las técnicas ópticas nos ofrecen la posibilidad de realizar mediciones sin-contacto. En esta tesis caracterizamos a las llamas mediante termometría de doble longitud de onda e interferometría de desplazamiento lateral. Las características que determinamos son la distribución de temperatura y la longitud de las llamas. Ambas características nos proporcionan información acerca de la eficiencia global de la combustión y de la estructura geométrica de la llama. Las llamas que analizamos son llamas laminares de difusión a chorro parcialmente premezcladas. El combustible que usamos es gas *LP*, sin embargo, nuestra metodología puede ser adaptada a cualquier combustible gaseoso. Como sistema de combustión usamos un quemador tipo Bunsen.

La tesis está dividida en cinco capítulos. En el capítulo I presentamos las definiciones y los conceptos básicos usados para describir los procesos de combustión. En este capítulo estudiamos las propiedades de los combustibles con potencial aplicación en los quemadores de gas atmosféricos. También presentamos las propiedades físico-químicas del aire atmosférico debido a que es el comburente más usado.

En el capítulo II describimos detalladamente las propiedades químicas, termodinámicas y ópticas de las llamas laminares de difusión con premezcla de aire. Calculamos la temperatura adiabática y los parámetros estequiométricos de las llamas que queman una mezcla gaseosa aire-gas *LP*.

El capítulo III contiene una descripción general de las técnicas y de los dispositivos que han sido usados en el diagnóstico de los procesos de combustión. A

través de las técnicas y de los dispositivos descritos en este capítulo podemos determinar la velocidad, la composición química y la temperatura de la mezcla gaseosa que constituye a la llama. El capítulo nos proporciona la información necesaria para seleccionar la técnica que usamos en la caracterización de las llamas.

En el capítulo IV presentamos los fundamentos de la termometría de doble longitud de onda. Desarrollamos una metodología de medición para determinar la distribución de temperatura y la longitud de las llamas axi-simétricas. La metodología está basada en el análisis de la radiación visible que emiten las llamas. Analizamos tres llamas que queman mezclas aire-gas *LP* con diferentes contenidos de aire primario.

El capítulo V contiene los fundamentos de la interferometría de desplazamiento lateral. Aquí desarrollamos otra metodología de medición para determinar la distribución de temperatura y la longitud de las llamas. La metodología está basada en el análisis de Fourier de los interferogramas. Analizamos una llama que quema una mezcla gaseosa aire-gas *LP*. Los resultados de este experimento nos permiten corroborar los resultados obtenidos a través de la termometría de doble longitud de onda.

Finalmente presentamos las conclusiones generales y el trabajo futuro.

Objetivo General

Desarrollar dos metodologías de medición para determinar la distribución de temperatura y la longitud de las llamas axi-simétricas mediante técnicas ópticas.

Objetivos Particulares

- a. Diseñar y armar un instrumento experimental para validar cada una de las metodologías de medición que proponemos.
- b. Calcular teóricamente la temperatura máxima y la longitud de las llamas axi-simétricas.
- c. Evaluar el desempeño de nuestras metodologías de medición mediante la comparación de los resultados experimentales con los valores teóricos.
- d. Seleccionar la metodología de medición más apropiada para diseñar y construir un instrumento de medición que opere en condiciones industriales.

Lista de Figuras

1.1. Tipos de llamas.....	4
1.2. Histograma del consumo mundial de gas natural.....	14
2.1. Definición gráfica de la temperatura adiabática.....	28
2.2. Estructura geométrica de las llamas laminares de difusión a chorro.....	32
2.3. Dependencia de la longitud de la llama con la forma de la boquilla.....	37
2.4. Dependencia de la longitud de la llama con el tipo de combustible.....	39
2.5. Efecto del aire primario en la longitud de las llamas laminares.....	40
2.6. Efecto del contenido de oxígeno atmosférico en la longitud de las llamas.....	41
2.7. Regiones del espectro electromagnético.....	42
2.8. Representación gráfica de la <i>ley de radiación de Planck</i>	43
2.9. Espectro de emisión infrarroja de una llama.....	43
2.10. Fragmento del espectro de emisión del átomo de níquel.....	45
2.11. Espectro de emisión visible de una llama rica en combustible.....	45
2.12. Espectro de transmitancia del agua.....	46
2.13. Espectro de transmitancia del dióxido de carbono.....	47
2.14. Fragmento del espectro de emisión ultravioleta del radical <i>OH</i>	48
2.15. Fragmento del espectro de emisión del radical <i>CH</i>	48
2.16. Espectro de emisión del radical <i>C₂</i>	49
2.17. Espectro de emisión de una llama rica aire-butano.....	51
3.1. Esquema del principio de funcionamiento de los caudalímetros.....	54
3.2. Distribución de velocidad obtenida con <i>PIV</i>	56
3.3. Transición energética de Stokes y anti-Stokes.....	62
3.4. Tomografías de una flama laminar aire-metano.....	63
3.5. Configuración experimental para detectar el esparcimiento Raman.....	65
3.6. Transiciones energéticas en el esparcimiento Raman anti-Stokes coherente.....	66
3.7. Transiciones energéticas de la fluorescencia inducida por láser.....	66
3.8. Excitación para generar incandescencia inducida por láser en una llama.....	67
3.9. Esquema de un termopar.....	69

3.10. Diagrama de bloques de un pirómetro.....	71
3.11. Dependencia del cociente de radiancias con la temperatura del objeto.....	74
3.12. Esquema de un pirómetro de doble longitud de onda.....	75
3.13. Distribución de la energía emitida por diferentes tipos de objetos.....	76
3.14. Esquema de un pirómetro multiespectral.....	77
3.15. Esquema de un pirómetro óptico de operación manual.....	78
3.16. Esquema de un pirómetro óptico automático.....	79
4.1. Arreglo experimental basado en la termometría de doble longitud de onda.....	90
4.2. Fotografía de una vista lateral del sistema óptico.....	91
4.3. Llamas caracterizadas.....	93
4.4. Esquema de una vista lateral del quemador y direcciones de exploración.....	94
4.5. Espectros de emisión de la llama con 5% de aire primario.....	95
4.6. Espectros de emisión de la llama con insuficiencia de aire primario.....	96
4.7. Espectros de emisión de la llama de difusión.....	97
4.8. Clasificación de las bandas espectrales que emiten las llamas.....	98
4.9. Distr. de temperatura de la llama con máximo contenido de aire primario.....	99
4.10. Distribución de temperatura de la llama con 5% de aire primario.....	100
4.11. Distribución de temperatura de la llama de difusión.....	101
4.12. Espectro de emisión y curva de Planck para $T = 2038 \text{ }^\circ\text{C}$	102
5.1. Interferograma generado por dos frentes de onda desplazados lateralmente.....	107
5.2. Diagrama del interferómetro de desplazamiento lateral.....	110
5.3. Fotografía del interferómetro de desplazamiento lateral que implementamos....	110
5.4. Interferogramas de desplazamiento lateral.....	112
5.5. Manto de la llama perturbada por una corriente de aire.....	113
5.6. Espectro de amplitud con respecto de x del interferograma de interferencia.....	114
5.7. Espectro de amplitud después de la aplicación del filtro pasabanda.....	115
5.8. Fase del interferograma de referencia en $y = 10 \text{ mm}$	115
5.9. Fotografía de la llama que analizamos e interferograma correspondiente.....	116
5.10. Distribución de temperatura de la llama.....	118

Lista de Tablas

1.1. Consumo mundial de energía por fuente.....	1
1.2. Usos principales de la energía en el mundo.....	2
1.3. Propiedades físico-químicas del gasoil.....	9
1.4. Composición química del gas natural.....	13
1.5. Reservas mundiales de gas natural por país.....	15
1.6. Composición química del aire seco.....	17
1.7. Propiedades físico-químicas del aire.....	18
2.1. Relaciones estequiométricas de varia mezclas aire-combustible.....	25
2.2. Propiedades térmicas de los reactivos y de los productos de la combustión.....	29
2.3. Temperaturas adiabáticas de varias llamas.....	30
2.4. Resultados experimentales de Roper para el cálculo de la longitud de la llama.....	36
3.1. Clasificación de los manómetros y sus rangos de operación.....	55
5.1. Parámetros usados para calcular la distribución de temperatura de las llamas.....	117

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1. Introducción

La combustión y sus aplicaciones son esenciales para el sustento y el desarrollo de la vida moderna. Una gran cantidad de dispositivos y productos requieren de la combustión de manera directa o indirecta. Algunos de los dispositivos que requieren directamente de la combustión son las estufas, los motores de combustión interna, los hornos y los calentadores de agua. Dependemos indirectamente de la combustión a través de la energía eléctrica generada mediante la incineración de combustibles fósiles. Adicionalmente, la mayoría de los productos que utilizamos a diario requirieron del calor liberado por una reacción de combustión en una o varias etapas de su fabricación.

En el año 2005, el 90% de la energía consumida en todo el mundo fue generada mediante la combustión de diversos materiales.¹ La tabla 1.1 muestra la clasificación del consumo mundial de energía por fuente.

Fuente de energía	Porcentaje de energía consumida [%]
Petróleo	39.9
Gas natural	25.9
Carbón	24.2
Estaciones núcleo-eléctricas	5.8
Estaciones hidro-eléctricas	2.3
Otras	1.9
Total	100

Tabla 1.1. Consumo mundial de energía por fuente.²

La combustión es indispensable en una gran cantidad de procesos industriales. En el ámbito industrial los dispositivos de combustión más comunes son los hornos para fundición, los hornos para tratamientos térmicos, las calderas, los calentadores de fluidos químicos, los fundidores de vidrio, las cámaras de secado y los incineradores de materia orgánica, entre otros.

Los principales medios de transporte también queman combustibles para liberar su energía química y posteriormente transformarla en energía mecánica. En la tabla 1.2 podemos observar los principales usos de la energía consumida en el mundo.

Uso	Porcentaje de energía [%]
Industrial	37.8
Residencial y comercial	36.1
Transporte	26.1
Total	100

Tabla 1.2. Usos principales de la energía en el mundo.²

Por otra parte, en una reacción ideal o estequiométrica los productos de la combustión de los hidrocarburos son el agua y el bióxido de carbono. Una mezcla real de combustible y comburente puede clasificarse como rica o pobre. Una mezcla rica es aquella que tiene un exceso de combustible. Una mezcla es pobre cuando tiene una deficiencia de combustible. En ambos casos la reacción de combustión produce agua, bióxido de carbono y otros compuestos químicos que contribuyen a la contaminación ambiental.

Los principales contaminantes generados por los combustibles fósiles son los hidrocarburos no quemados o parcialmente quemados, los óxidos nitrosos (NO_x), el monóxido de carbono, los óxidos de azufre y las partículas sólidas suspendidas. Estas sustancias representan un gran riesgo para los seres vivos ya que generan smog, lluvia ácida, calentamiento global y adelgazan la capa de ozono.

En la mayoría de los países industrializados la emisión de los contaminantes está regulada por las normas ambientales correspondientes. Otro factor negativo de una combustión incompleta o no-ideal es la reducción de la energía térmica liberada. A medida que disminuye la eficiencia de la combustión, aumenta el costo de la energía térmica generada.

El diagnóstico y el control de la combustión son de vital importancia para reducir los costos de producción directos e indirectos de una inmensa cantidad de artículos. El uso eficiente de los combustibles también contribuye a mantener limpio nuestro medio ambiente.

En las secciones siguientes presentamos los conceptos básicos de la ciencia de la combustión, así como las propiedades físicas y químicas de los compuestos que intervienen en ella. A continuación establecemos las definiciones que utilizamos en el resto de este documento.

1.2. Definiciones

La *combustión* es una reacción química que consiste en la rápida oxidación de una sustancia con liberación de energía térmica y luminosa. Cualquier proceso de combustión requiere de un combustible, un comburente y energía de ignición. La energía de ignición puede ser suministrada mediante un arco eléctrico, una llama piloto o chispas generadas por fricción.

Algunos autores consideran que la oxidación lenta de un combustible con poca liberación de calor y sin emisión de radiación visible es un proceso de combustión. En el presente trabajo de investigación solamente analizamos reacciones químicas con rápida oxidación, ya que la mayoría de los sistemas de combustión industriales, comerciales y domésticos operan con este tipo de combustión. La rápida oxidación de un carburante siempre genera una llama.

La *llama* es una mezcla de gases a alta temperatura, originada por una sustancia en combustión, que produce calor y luz. La *flama* es la fracción de energía radiante emitida en forma de luz por una llama. Las llamas puede clasificarse como *llamas premezcladas* y *llamas no-premezcladas o de difusión*. Ambas clases están relacionadas con el estado de integración de los reactivos.

En las *llamas premezcladas* el combustible y el comburente son mezclados a escala molecular antes de que inicie la reacción química.³ Este tipo de llama es utilizado en motores de combustión interna, quemadores Bunsen, hornos de secado, sopletes de oxi-acetileno y otros dispositivos.

En el caso de *las llamas de difusión* los reactivos están inicialmente separados y la reacción de oxidación ocurre exclusivamente en la interfaz entre el combustible, el comburente y la energía de ignición.³ En esta interfaz se producen tanto el mezclado, como la combustión. Durante el mezclado las moléculas de combustible emigran hacia la llama en una dirección mientras que las moléculas del comburente son difundidas hacia la llama en la dirección opuesta. Un ejemplo de este tipo de llama es la generada por una vela común. En la figura 1.1 podemos apreciar varios tipos de llamas.

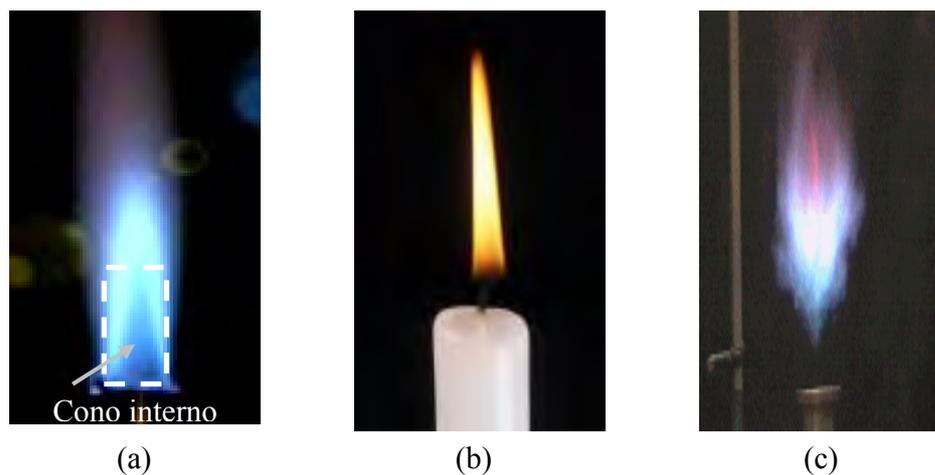


Figura 1.1. Tipos de llamas: a) Llama laminar premezclada (cono interno), b) Llama laminar de difusión y c) Llama turbulenta.

En algunos dispositivos ambos tipos de llamas (premezcladas y de difusión) están presentes en diferentes proporciones. El motor de combustión Diesel y los quemadores Bunsen con premezcla de aire son ejemplos de estos dispositivos.

Las *llamas turbulentas de difusión* son mezcladas a escala macroscópica mediante la convección del combustible y del comburente. Posteriormente, la difusión molecular completa el mezclado de los reactivos para que la reacción química pueda llevarse a cabo. La mezcla comburente-combustible fluye en trayectorias caóticas.

A continuación definiremos otros conceptos básicos para clarificar la terminología empleada en las definiciones anteriores.

- *Combustible*: Sustancia química con carácter reductor (gana electrones), capaz de reaccionar con un comburente de forma rápida y exotérmica. El carbón, la madera, la gasolina y el gas natural son ejemplos de combustibles comunes.
- *Comburente o oxidante*: Sustancia que favorece la combustión de otras mediante la aportación de electrones durante una reacción química. Generalmente el oxidante es la fracción de oxígeno que contiene el aire del medio ambiente. El aire atmosférico es el comburente más usado en los procesos de combustión.
- *Reactivos*: Sustancias que reaccionan químicamente.
- *Dosado estequiométrico*: Relación entre la cantidad de aire y la cantidad de combustible necesario para producir una combustión completa, es decir, sin que falten ni sobren reactivos. Este parámetro nos indica la cantidad de unidades de aire necesarias para reaccionar de modo ideal con una unidad de combustible.

Para analizar cualquier tipo de llama es indispensable conocer las características tanto del combustible, como del comburente involucrado en la combustión.

1.3. Combustibles

El análisis de un combustible requiere del conocimiento de sus propiedades físicas y químicas. Las propiedades físicas de un carburante determinan su capacidad para formar una mezcla gaseosa aire-combustible e influyen en su almacenamiento, transporte y criterios de venta. En cambio, las características químicas afectan principalmente a la cantidad de energía liberada durante la combustión.

Para que un combustible sea una fuente de energía práctica debe ser abundante y económico.

Los combustibles pueden clasificarse como gaseosos, líquidos y sólidos. Los quemadores más comunes en el sector industrial, comercial y doméstico utilizan sólo combustibles gaseosos y líquidos. A continuación examinaremos las propiedades de las dos últimas clases de combustibles.

1.3.1. Combustibles Líquidos

Los combustibles líquidos de mayor consumo son los derivados del petróleo crudo. Los principales productos de la refinación del petróleo son la gasolina, el diesel, el gasoil, y el combustible para turbinas.

Las características más importantes de los combustibles líquidos son el poder calorífico, la gravedad específica, la viscosidad, el punto de inflamación, la temperatura de autoignición, el contenido de azufre y de plomo, el número de octano, el número de cetano, entre otras.

El *poder calorífico* es el calor liberado por unidad de masa. El poder calorífico debe ser medido con el combustible inicialmente a 25 °C y con los productos de la combustión a la misma temperatura.

La *gravedad específica* es la relación entre la densidad del combustible y la densidad del agua a la misma temperatura.

La *viscosidad* de un líquido es una medida de su resistencia a fluir. La viscosidad disminuye cuando la temperatura aumenta.

El *punto de inflamación* es la máxima temperatura a la cual podemos almacenar y manipular un combustible sin riesgo de ignición.

La *temperatura de autoignición* es la mínima temperatura requerida para iniciar la combustión sin llama, ni arco eléctrico.

Las propiedades de los combustibles como la curva de destilación, el número de octano y el número de cetano son útiles para determinar el desempeño de los motores de combustión interna. En la referencia 4 podemos encontrar un estudio detallado de estas propiedades. A continuación describiremos las propiedades físicas y químicas de los combustibles líquidos con potencial aplicación en quemadores industriales, comerciales y domésticos.

1.3.1.1. Gasolina

La gasolina es un producto de la refinación de petróleo. A temperatura ambiente la gasolina es un líquido incoloro, pardo o rosa y extremadamente inflamable.

1.3.1.1.1. Composición

La gasolina es una mezcla de hidrocarburos de cinco a nueve átomos de carbono. Suele contener pequeñas cantidades de aditivos que mejoran el proceso de combustión. La volatilidad de la gasolina es moderada.

La composición química más habitual es $C_{7.18}H_{13.1}O_{0.1}$, siendo sus componentes básicos el hidrógeno y el carbono. La gasolina es una mezcla de un centenar de compuestos que varían desde el butano hasta el metil-naftaleno.

1.3.1.1.2. Propiedades

Las principales propiedades de la gasolina son las cuatro que describimos a continuación.

- *Número de octano*: Es la habilidad de un combustible para quemarse sin causar detonación. Las gasolinas tienen un número de octano entre 90 y 100.
- *Volatilidad*: Esta propiedad representa de forma indirecta el contenido de los componentes volátiles que brindan la seguridad en el transporte y almacenamiento de la gasolina. La volatilidad de la gasolina tiene un valor de 0.7 a 0.85 mmHg.
- *Contenido de azufre*: Los compuestos de azufre son sustancias naturales de la gasolina. Si el contenido de azufre sobrepasa la norma establecida, entonces la gasolina puede tener efectos nocivos sobre el ambiente, siendo un factor importante en la producción de lluvia ácida.

Además de ser un líquido fácilmente inflamable, la gasolina tiene una densidad relativa de 0.70 a 0.77.

1.3.1.1.3. Características Ambientales

Los contaminantes emitidos por la combustión de la gasolina son los hidrocarburos sin quemar, los óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono, los aditivos y los óxidos de azufre.

1.3.1.2. Gasoil

El gasoil es un combustible obtenido de la destilación fraccionada del petróleo.

1.3.1.2.1. Composición

El gasoil es una mezcla de hidrocarburos compuesta principalmente de alcanos e hidrocarburos aromáticos. El número de carbonos que forman al gasoil fluctúa entre 10 y 22 átomos. Existen dos composiciones químicas principales para el gasoil: $C_{14,3}H_{26,2}$ y $C_{12}H_{23}$. Por lo tanto, la composición promedio es $C_{13,15}H_{24,6}$.

1.3.1.2.2. Propiedades

El gasoil es un líquido viscoso de color rojizo semitransparente. El gasoil tiene una masa molecular y una densidad mayor que la gasolina. Posee un contenido de compuestos volátiles menor que la gasolina. Las propiedades físicas y químicas de este carburante están tabuladas a continuación.

Propiedad	Unidades	Valor
Poder calorífico másico	MJ/Kg	42.69
Poder calorífico volumétrico	MJ/m ³	35581
Densidad	Kg/m ³	840-890
Densidad relativa	Adimensional	0.84-0.89
Viscosidad a 40 °C	cSt	3.2
Temperatura de auto-ignición	°C	200-400
Límite de inflamabilidad	% volumen	0.7-5

Tabla 1.3. Propiedades físico-químicas del gasoil.⁴

1.3.1.2.3. Características Ambientales

La combustión del gasoil provoca altas emisiones de óxidos nitrosos y de partículas sólidas suspendidas. Estos contaminantes afectan a la salud de las personas debido a que degradan la calidad del aire que respiran. En este caso, las partículas sólidas son generadas por los hidrocarburos no quemados y el anhídrido sulfuroso formado por el azufre del combustible.

1.3.2. Combustibles Gaseosos

Los principales combustibles gaseosos son los gases licuados del petróleo y el gas natural. Otros gases como el acetileno y el hidrógeno son usados en aplicaciones especiales que requieren de llamas extremadamente calientes. Los quemadores que usamos en este trabajo de investigación pueden quemar tanto gases licuados del petróleo, como gas natural.

1.3.2.1. Gases Licuados del Petróleo (GLP)

Los *GLP* son productos del petróleo almacenados y transportados en forma líquida, aunque siempre van acompañados de una porción de carburante en fase gaseosa. El butano, el propano y sus mezclas son los principales gases licuados del petróleo.

Los gases licuados del petróleo son producidos en plantas de procesamiento de gas natural y recolectados a presión en tanques de almacenamiento. Los *GLP* comerciales tienen una presión de vapor máxima de 208 KPa a 38 °C.

1.3.2.1.1. Composición

En la composición química de los *GLP* predominan los hidrocarburos como el butano, el propano y sus mezclas. Las impurezas principales son el propileno, butileno o

una mezcla de ambos. Los gases butano y propano en estado puro son hidrocarburos del tipo C_nH_{2n+2} . Las fórmulas químicas del propano y del butano son C_3H_8 y C_4H_{10} respectivamente. La composición más habitual de los *GLP* es un 60% de propano y un 40% de butano.

1.3.2.1.2. Propiedades

Algunas de las propiedades más importantes de los gases licuados del petróleo son las siguientes:

- No son tóxicos, ni corrosivos. No es recomendable respirarlos por largos periodos debido a que desplazan al oxígeno.
- No contienen plomo.
- No contienen azufre.
- En estado puro son inodoros e incoloros.

Los gases licuados del petróleo son más pesados que el aire y si ocurre alguna fuga pueden extenderse por el suelo. Los *GLP* son combustibles económicos por su rendimiento en comparación con otros carburantes. Los *GLP* son almacenados a temperaturas bajo cero y su contacto con la piel produce quemaduras similares a las que produce el fuego.

1.3.2.1.3. Características Ambientales

Una de las principales ventajas de los gases licuados del petróleo es su baja tendencia a formar ozono, prácticamente la mitad que la gasolina. Además los *GLP* casi no emiten compuestos poliaromáticos, ni aldehídos. La combustión del *GLP* no genera emisiones de dióxido de azufre que son responsables junto los óxidos nitrosos de la lluvia ácida. Las emisiones de CO , NO_x , HC y CO_2 generadas por la combustión de los *GLP* son menores que las emisiones de los combustibles líquidos y sólidos.

1.3.2.2. Gas Natural

El gas natural está compuesto principalmente por metano. El metano es el primer miembro de la familia de los alcanos. En condiciones atmosféricas se encuentra en fase gaseosa. Su composición varía en función de la procedencia del yacimiento. En caso de contener hidrocarburos líquidos en suspensión decimos que el gas natural está “*húmedo*”. Si no contiene compuestos en fase líquida, entonces el gas está “*seco*”.

Usualmente el gas natural está comprimido dentro de rocas porosas y entre los estratos rocosos sellados en el subsuelo. Frecuentemente podemos encontrarlo cerca o sobre los yacimientos de petróleo.

El gas natural es purificado y condensado mediante la compresión y el enfriamiento del gas en bruto. El gas natural seco suele transportarse a través de gasoductos. Si lo enfriamos a $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$ podemos licuarlo y transportarlo en tanques por vía terrestre o marítima.

El gas natural es uno de los combustibles más limpios ya que emite menos dióxido de sulfuro, dióxido de carbono, y partículas sólidas que el petróleo y el carbón.

1.3.2.2.1. Composición

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos gaseosos o disueltos en el petróleo crudo. Este combustible contiene principalmente metano (proporción mayor que el 90%) y pequeñas cantidades de etano, propano, butano y pentano. El gas natural también contiene azufre, hidrógeno, helio, sulfuro de hidrógeno, nitrógeno y CO_2 ; sin embargo típicamente sus concentraciones son marginales.

La composición química de dos tipos de gas natural y su composición promedio es mostrada en la tabla 1.4.

Compuesto	Gas natural tipo 1 [%]	Gas natural tipo 2 [%]	Composición química promedio [%]
Metano CH_4	85.2	91.4	88.3
Etano C_2H_6	13.6	7.2	10.4
Nitrógeno N_2	0.8	0.6	0.7
Hidrocarburos superiores	0.4	0.8	0.6

Tabla 1.4. Composición química del gas natural.⁴

En los cálculos posteriores consideramos que la composición química equivalente del gas natural es $C_{1.16}H_{4.32}$. Los elementos combustibles del gas natural son el metano y los hidrocarburos superiores. El N_2 y el CO_2 son elementos inertes. Otros elementos como el SH_2 son perjudiciales y es necesario eliminarlos.

1.3.2.2.2. Propiedades

El gas natural no es corrosivo, ni tóxico. Además tiene una temperatura de combustión elevada, consecuentemente el gas natural es un combustible más seguro, en comparación con otras fuentes de energía. La densidad relativa del gas natural en promedio es 0.60. En condiciones ambientales el gas natural tiende a elevarse y puede fugarse fácilmente por cualquier grieta del depósito de almacenamiento. El gas natural sin procesar es inodoro, incoloro e insípido. Su densidad es menor que la del aire. A temperaturas mayores que $-161\text{ }^\circ\text{C}$ su fase es gaseosa.

1.3.2.2.3. Características Ambientales

El gas natural es considerado como el combustible fósil más limpio en términos de contaminación. Su bajo contenido de azufre produce una insignificante emisión de dióxidos de azufre. Sus emisiones de dióxido de carbono son menores que las emisiones de otros combustibles fósiles como la gasolina. Además, la producción de gas natural es mucho más ecológica que el proceso de transportar y refinar el petróleo.

1.3.2.2.4. Consumo de Gas Natural

El gas natural es la fuente de energía con mayor crecimiento de consumo en los últimos años. Según la revista Oil & Gas Journal,⁵ en el año 2005 fueron consumidos 3 billones de m³ y la tendencia indica que en el año 2020 el consumo de este energético será un 60% mayor. En cuanto a su contribución al total de energía consumida, los análisis estadísticos indican que aumentará desde un 24% en el año 2005 a un 29% en el 2020. Las ventajas funcionales y ambientales del gas natural hacen que la estimación de crecimiento de su consumo sea la más alta entre los combustibles tradicionales. El gas natural es usado principalmente para la generación de electricidad, en múltiples procesos industriales y en los hogares. La figura 1.2 es un histograma que muestra el consumo mundial de gas natural e incluye estimaciones hasta el año 2020.

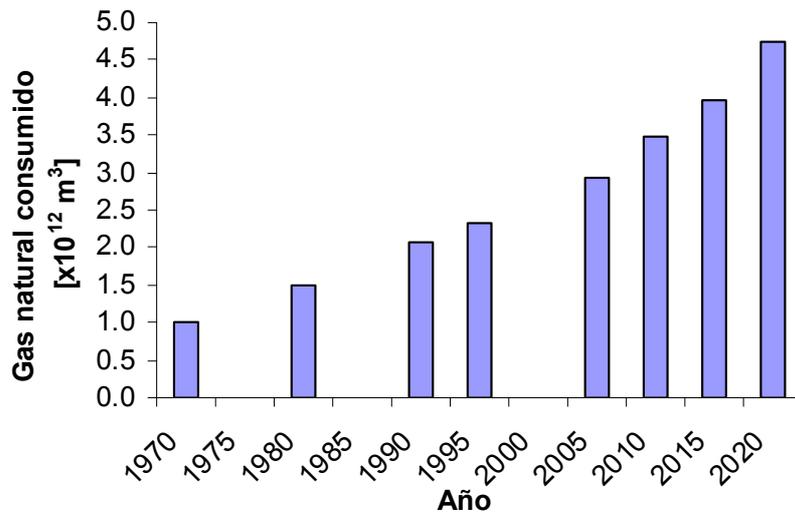


Figura 1.2. Histograma del consumo mundial de gas natural.⁵

Para Estados Unidos y Canadá, los analistas estiman un crecimiento en el consumo de gas natural del 1.6% anual entre 1997 y 2020. Para México pronostican que el crecimiento será del 2.4% anual durante el mismo periodo.

1.3.2.2.5. Reservas Mundiales de Gas Natural

Las reservas mundiales de gas natural han aumentado en más del doble en los últimos 20 años por descubrimientos geográficos y desarrollos tecnológicos. Durante el mismo periodo las reservas de gas natural crecieron un 62% más que las reservas de petróleo. Según *Oil & Gas Journal*; al 1 de enero del 2006, las reservas mundiales de gas natural eran de $145.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$. Las reservas estimadas han crecido rápidamente en el Medio Oriente, la ex-Unión Soviética, Centroamérica, Sudamérica y Asia. En la tabla 1.5 están tabuladas las reservas de gas natural por país.

País	Reservas [x 10¹² m³]	Porcentaje mundial [%]
Federación Rusa	48.1	33.0
Irán	22.9	15.8
Katar	8.5	5.8
Emiratos Árabes Unidos	6.0	4.1
Arabia Saudita	5.8	4.0
Estados Unidos	4.6	3.2
Algeria	4.5	3.1
Venezuela	4.0	2.8
Nigeria	3.5	2.4
Iraq	3.1	2.1
Turkmenistán	2.8	2.0
Malasia	2.3	1.6
Indonesia	2.0	1.4
Uzbekistan	1.9	1.3
Kazakhstan	1.8	1.3
Canadá	1.7	1.2
Holanda	1.7	1.2
Kuwait	1.5	1.0
China	1.4	0.9
México	0.85	0.6
Resto del mundo	16.3	11.2
Mundial	145.7	100.0

Tabla 1.5. Reservas mundiales de gas natural por país.⁵

De acuerdo con los datos anteriores, las reservas mundiales de gas natural están distribuidas más equitativamente que las reservas de petróleo. El Medio Oriente, que

posee cerca del 65% de las reservas mundiales de petróleo, cuenta con sólo el 34% de las reservas de gas. Katar, Iraq, Arabia Saudita y los Emiratos Árabes Unidos también poseen volúmenes importantes de gas natural.

Por el contrario, algunas regiones con reservas limitadas de crudo tienen grandes reservas de gas. La ex-Unión Soviética cuenta con el 6% de las reservas mundiales de petróleo, pero tiene el 40% de las reservas probadas de gas natural, estando la mayor parte (33%) en la Federación Rusa. Las reservas rusas son las más grandes en el mundo, más del doble que Irán.

Las tasas *Reserva/Producción (R/P)*, exceden los 100 años en el Medio Oriente y África. Para la ex-Unión Soviética la tasa es de 83.4 años, mientras que para Centroamérica y Sudamérica es de 71.5 años. Norte América y Europa tienen tasas más bajas con 11.4 años y 18.3 años respectivamente. La tasa *R/P* del gas natural en el mundo es de 63.4 años, superior a la del petróleo que es de 21 años.

1.4. Comburente

El comburente más usado en los dispositivos de combustión es el aire atmosférico. Sólo la fracción de oxígeno contenida en el aire actúa como oxidante en la reacción de combustión. El oxígeno permite que los combustibles reaccionen químicamente y sean capaces de liberar su contenido energético. A continuación describiremos las principales propiedades del aire.

1.4.1. Propiedades del Aire

El aire es un fluido incoloro, inodoro, insípido y tiene una baja conductividad térmica y eléctrica, especialmente cuando está seco, es decir, sin vapor de agua. Podemos considerar que el aire seco se comporta como un gas ideal. Las propiedades físicas y químicas del aire dependen de la presión atmosférica y de su temperatura.

La composición química del aire también depende de la altitud y de la localización geográfica. La tabla 1.6 muestra la composición aproximada del aire seco a nivel del mar.

Compuesto	Fórmula química	Concentración [% vol.]
Nitrógeno	N_2	78.03
Oxígeno	O_2	20.99
Argón	Ar	0.94
Dióxido de Carbono	CO_2	0.03
Neón	Ne	0.00123
Helio	He	0.0004
Metano	CH_4	0.0002
Criptón	Kr	0.0001
Hidrógeno	H_2	0.00005
Xenón	Xe	0.000006
Ozono	O_3	0.000002
Óxido Nitroso	NO_x	0.000001
Partículas sólidas	-----	Variable

Tabla.1.6. Composición química del aire seco.⁴

Usualmente la concentración del vapor de agua en el aire fluctúa entre el 0.1% y el 2.8% del volumen total. Los principales factores que modifican la concentración del vapor de agua son la temperatura ambiental, la evaporación de las aguas superficiales y la ubicación geográfica.

Desde el punto de vista químico, las propiedades específicas del aire son las propiedades de los gases que lo constituyen. Sin embargo, los únicos gases que influyen en la combustión son el oxígeno y el nitrógeno; los demás componentes podemos considerarlos inertes.

A continuación, en la tabla 1.7, podemos encontrar las propiedades físico-químicas del aire. En estas propiedades consideramos que el aire se comporta como un gas ideal.

Propiedad	Unidades	Valor
Peso molecular promedio	g/mol	28.96
Densidad en condiciones normales	Kg/m ³	1.2929
Densidad en condiciones estándar		1.2256
Densidad en condiciones ambientales		1.1847
Calor específico a presión constante (C_p)	KCal/(Kg °C)	0.241
Calor específico a volumen constante (C_v)	KCal/(Kg °C)	0.172

Tabla 1.7. Propiedades físico-químicas del aire.⁴

1.5. Diagnóstico de la Combustión

El diagnóstico de la combustión consiste en determinar su comportamiento espacial y temporal. En los capítulos posteriores presentamos un diagnóstico térmico de llamas laminares de difusión a chorro producidas por quemadores tipo Bunsen.

La combustión siempre involucra complejas interacciones termoquímicas y de mecánica de fluidos. En consecuencia, la instrumentación necesaria para restringir, diagnosticar y controlar las variables de interés también es compleja.

La llama es la parte de la combustión analizada con mayor frecuencia. La determinación de la temperatura de la llama y su geometría es fundamental para la comprensión y el modelado de los sistemas de combustión.

Por otra parte, las llamas son afectadas por un fenómeno de inestabilidad conocido como parpadeo o “flicker” que dificulta la obtención de un estado estable. Este efecto causa errores de medición significativos y depende de la estructura del quemador y de la atmósfera que lo rodea. Por esta razón la llama debe ser protegida de las corrientes de aire y de las fluctuaciones en el suministro del combustible.

Anteriormente, la mayoría de los detectores empleados para el diagnóstico de la combustión actuaban mediante el contacto directo con la llama. Sin embargo, los

detectores ópticos son cada vez más usados debido a que pueden operar en ambientes más agresivos sin introducir perturbaciones. Aunque los detectores de contacto directo pueden ser empleados en el diagnóstico y en el análisis de las llamas, las técnicas ópticas son más apropiadas para esta aplicación particular.

Actualmente, varias técnicas ópticas son usadas en la investigación de los procesos de combustión. Estas sofisticadas técnicas nos permiten analizar objetos a alta temperatura ($T > 1000 \text{ K}$), con pequeñas dimensiones ($< 1 \text{ mm}$) y con grandes gradientes de temperatura (10^6 K/m).

El diagnóstico y el control de los procesos de combustión contribuyen a diseñar quemadores seguros, a minimizar las emisiones de sustancias contaminantes y a mejorar la calidad de múltiples procesos de producción.

1.6. Conclusiones

La importancia de la combustión radica en la transformación de la energía almacenada en los enlaces químicos del combustible, en energía radiante. La combustión interviene en la mayoría de los aspectos de la vida moderna del hombre.

Presentamos las definiciones y los conceptos básicos usados en el análisis y la descripción de los procesos de combustión. Con esta información evitaremos cualquier confusión o mal uso del lenguaje técnico.

Hicimos una descripción de los combustibles con potencial aplicación en los quemadores tipo Bunsen. El gas natural es una fuente de energía de gran importancia para los sectores industrial, comercial y doméstico, ya que su combustión es limpia y eficiente. Una de las ventajas principales de usar gas natural en los quemadores es que podemos generarlo a partir de la degradación anaerobia de la materia orgánica. Por lo tanto, podemos considerar al gas natural como una fuente de energía renovable.

El diagnóstico y el control de la combustión son indispensables para el aprovechamiento de las fuentes de energía y para reducir la contaminación ambiental. El uso eficiente de la energía será cada vez más importante, especialmente en el caso de los combustibles no-renovables.

En el capítulo siguiente describimos detalladamente las propiedades físicas, químicas y ópticas de las llamas. También analizamos la estructura geométrica de las llamas y los principales factores que la modifican.

CAPÍTULO II

LLAMAS LAMINARES DE DIFUSIÓN A CHORRO

2.1. Introducción

En este capítulo describimos las características físicas, químicas y ópticas de las llamas producidas por los quemadores de gas tipo Bunsen. Estas llamas son conocidas como llamas laminares de difusión a chorro. Los quemadores Bunsen usualmente premezclan una fracción del aire estequiométrico con el chorro de combustible para disminuir la longitud de la llama y reducir la formación de partículas carbón. La premezcla parcial de aire produce una llama combinada. La llama combinada está constituida por dos tipos de llamas: una premezclada y otra de difusión. La llama premezclada es rica en combustible y tiene forma de cono. La llama de difusión envuelve a la llama premezclada. La interfaz entre la llama y la atmósfera circundante es conocida como el manto de la llama.

Los quemadores Bunsen industriales, comerciales y domésticos están diseñados para quemar gas natural o gas *LP*. En las siguientes secciones describimos analíticamente a las llamas considerando ambos combustibles. Examinamos la estructura geométrica de las llamas de difusión a chorro. Presentamos las ecuaciones que predicen la longitud de las llamas producidas por quemadores Bunsen con boquillas circulares, cuadradas y rectangulares. Determinamos algunas de las propiedades de las mezclas gaseosas como la relación estequiométrica aire-combustible, la relación equivalente y la temperatura adiabática de la llama. Estudiamos los efectos del premezclado, la presión atmosférica, la temperatura ambiental y la disociación. Finalmente, analizamos los espectros de emisión y de transmisión de las llamas que queman una mezcla de hidrocarburos y aire.

2.2. Conceptos Básicos de Termodinámica

Las propiedades extensivas son aquellas cuyo valor numérico depende de la cantidad de sustancia considerada. Las propiedades extensivas son denotadas mediante letras mayúsculas, por ejemplo, $V = [\text{m}^3]$ para el volumen, $U = [\text{J}]$ para la energía interna y $H = [\text{J}]$ para la entalpía. La *entalpía* es la suma de la energía interna y del trabajo realizado por un fluido. Una propiedad intensiva está expresada por unidad de masa y su valor numérico no depende de la cantidad de sustancia presente. Las propiedades intensivas son denotadas con letras minúsculas, por ejemplo, $v = [\text{m}^3/\text{Kg}]$ para volumen específico, $u = [\text{J}/\text{Kg}]$ para la energía interna específica y $h = [\text{J}/\text{Kg}]$ para la entalpía específica.

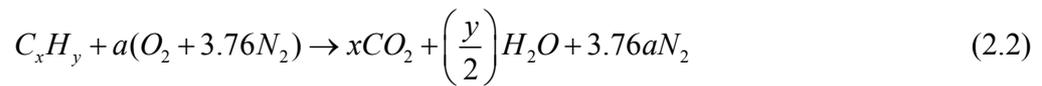
En los procesos de combustión debemos considerar los cambios de fase líquido-gas y viceversa. Si el vapor de agua, que es un producto de la combustión, es enfriado lo suficiente, entonces puede condensarse. El cambio de fase de una sustancia libera o requiere energía. La cantidad de calor requerida para evaporar una unidad de masa de un líquido, a presión y temperatura constante, es el *calor latente de vaporización*. La siguiente ecuación es la definición matemática del calor latente de vaporización. Donde $T = [\text{K}]$ es la temperatura, $P = [\text{Pa}]$ es la presión y h es la entalpía específica.

$$h_{fg}(T, P) \equiv h_{\text{vapor}}(T, P) - h_{\text{liquido}}(T, P) \quad [\text{J}/\text{Kg}] \quad (2.1)$$

2.3. Estequiometría de los Procesos de Combustión

La estequiometría establece la cantidad de reactivos necesarios para que una reacción química se lleve a cabo completamente, es decir, para que no sobren ni falten reactivos. Una cantidad estequiométrica de comburente es la sustancia necesaria para quemar completamente una cierta cantidad de combustible. Si la cantidad de comburente es mayor que la estequiométrica, entonces la mezcla es pobre en combustible. Si la cantidad de comburente es menor que la estequiométrica, entonces la mezcla es rica en

combustible. La relación estequiométrica entre el comburente y el combustible está determinada por un balance de átomos. La reacción química balanceada (2.2) describe la combustión de los hidrocarburos mezclados con aire.



Donde,

$$a = x + \frac{y}{4} \quad [\text{adimensional}] \quad (2.3)$$

Por simplicidad asumimos que la composición química del aire es 79% de N_2 y 21% de O_2 . Los porcentajes están expresados en volumen. La ecuación (2.4) es la *relación estequiométrica de aire-combustible* $(A/F)_E$.

$$(A/F)_E = \frac{m_{\text{aire}}}{m_{\text{combustible}}} = 4.76a \frac{PM_{\text{aire}}}{PM_{\text{combustible}}} \quad \left[\frac{\text{Kg}_{\text{aire}}}{\text{Kg}_{\text{combustible}}} \right] \quad (2.4)$$

Donde $m = [\text{Kg}]$ y $PM = [\text{g/mol}]$ son la masa y el peso molecular respectivamente, del aire o del combustible. La *relación equivalente* (Φ) nos indica la calidad de la mezcla aire-combustible. Enseguida definimos la relación equivalente.

$$\Phi = \frac{(A/F)_E}{(A/F)} \quad [\text{adimensional}] \quad (2.5)$$

Si la mezcla es rica en combustible, entonces $\Phi > 1$. Si la mezcla es pobre en combustible, entonces $\Phi < 1$. Cuando la mezcla es estequiométrica, entonces $\Phi = 1$. A continuación calculamos los parámetros estequiométricos y termodinámicos más importantes de las mezclas aire-gas natural y aire-gas LP.

2.3.1. Cálculos Estequiométricos

Primero calcularemos la relación estequiométrica de la mezcla aire-gas natural. La composición química equivalente del gas natural es $C_{1.16}H_{4.32}$. Los pesos moleculares del aire, del carbono y del hidrógeno son 28.85 g/mol, 12.01 g/mol y 1.01 g/mol respectivamente. Ahora calculamos el peso molecular del gas natural.

$$PM_{Gas_Natural} = xPM_C + yPM_H = 1.16(12.01_g/mol) + 4.32(1.01_g/mol) = 18.29_g/mol$$

Calculamos el valor del parámetro “a” de la ecuación (2.3).

$$a_{Gas_Natural} = x + \frac{y}{4} = 1.16 + \frac{4.32}{4} = 2.24$$

Sustituyendo este valor y los pesos moleculares del aire y del gas natural en la ecuación (2.4) obtenemos la relación estequiométrica de la mezcla aire-gas natural.

$$(A/F)_E = 4.76a \frac{PM_{aire}}{PM_{Gas_Natural}} = 4.76(2.24) \left(\frac{28.85_g/mol}{18.29_g/mol} \right) = 16.82$$

El gas LP comercial es una mezcla que típicamente contiene un 60% de propano (C_3H_8) y un 40% de butano (C_4H_{10}) en volumen. El peso molecular de los combustibles compuestos puede calcularse mediante la ecuación (2.6).

$$PM_{Mezcla} = \sum_i \left(\frac{V_i}{V} \right) PM_i \quad [g/mol] \quad (2.6)$$

Donde V es el volumen total de la mezcla, V_i y PM_i son el volumen y el peso molecular del compuesto químico en cuestión. A continuación calculamos los pesos moleculares del gas propano y del butano.

$$PM_{C_4H_{10}} = 4(12.01 \text{ g/mol}) + 10(1.01 \text{ g/mol}) = 58.14 \text{ g/mol}$$

$$PM_{C_3H_8} = 3(12.01 \text{ g/mol}) + 8(1.01 \text{ g/mol}) = 44.11 \text{ g/mol}$$

Usando los valores anteriores en la ecuación (2.6) obtenemos el siguiente resultado para el peso molecular del gas *LP*.

$$PM_{Gas_LP} = \frac{40}{100}(58.14 \text{ g/mol}) + \frac{60}{100}(44.11 \text{ g/mol}) = 49.72 \text{ g/mol}$$

Con la ecuación (2.3) calculamos el parámetro “*a*” para el gas natural.

$$a_{Gas_LP} = 0.6a_{C_4H_{10}} + 0.4a_{C_3H_8} = 0.60(6.50) + 0.40(5.00) = 5.90$$

Sustituyendo el valor anterior y los pesos moleculares del aire y del gas *LP* en la ecuación (2.4) obtenemos la relación estequiométrica de la mezcla aire-gas *LP*.

$$(A/F)_E = 4.76a \frac{PM_{aire}}{PM_{Gas_LP}} = 4.76(5.9) \left(\frac{28.85 \text{ g/mol}}{49.72 \text{ g/mol}} \right) = 16.30$$

Aplicando el procedimiento anterior podemos calcular la relación estequiométrica de cualquier mezcla aire-combustible. La tabla 2.1 contiene las relaciones estequiométricas para varios combustibles mezclados con aire.

Combustible	Relación estequiométrica (A/F) _E
Gas natural	16.8
Gas <i>LP</i>	16.3
Metano	17.2
Gasolina	14.7
Metanol	6.5
Etanol	9.0

Tabla 2.1. Relaciones estequiométricas para varias mezclas aire-combustible.

2.4. Efectos de la Disociación

La disociación es cualquier reacción química que consiste en la transformación de las moléculas iónicas en otras moléculas más sencillas o en iones. Una de las reacciones de disociación más importantes en los procesos de combustión es la disociación del dióxido de carbono. La disociación del CO_2 , mostrada en la reacción química (2.7) produce monóxido de carbono y oxígeno molecular.



La ecuación anterior nos indica que durante la disociación, dos moléculas de CO_2 son separadas en una molécula de oxígeno diatómico y dos moléculas de monóxido de carbono. Dos átomos de oxígeno que fueron separados por disociación se unen para formar oxígeno molecular O_2 . El oxígeno molecular es la configuración más estable del oxígeno.

Para romper los enlaces químicos de las moléculas requerimos de una cierta cantidad de energía térmica. La disociación siempre reduce la temperatura de las llamas debido a que parte de la energía liberada por la combustión es utilizada en la disociación de las moléculas. La disociación es despreciable en llamas estequiométricas y pobres a temperaturas menores que 1900 K. En estas condiciones podemos calcular la temperatura de la llama suponiendo que los únicos productos de la combustión son el agua y el dióxido de carbono. Si la presión aumenta, entonces la disociación de los productos de la combustión disminuye y la temperatura de la llama aumenta.

La temperatura de una llama es máxima cuando la mezcla aire-combustible es estequiométrica y no hay disociación. Si consideramos los efectos de la disociación, entonces la llama más caliente es obtenida con mezclas ligeramente ricas en combustible. A continuación determinaremos la temperatura adiabática de las llamas producidas por la combustión de los hidrocarburos mezclados con aire.

2.5. Temperatura Adiabática de la Llama

Un proceso adiabático es aquel que no gana ni pierde energía térmica. El concepto de llama adiabática es una abstracción que simplifica el análisis físico y matemático de los procesos de combustión. La temperatura adiabática es la máxima temperatura que una llama puede alcanzar manteniendo la presión constante. La temperatura adiabática de una llama es un parámetro de referencia que nos sirve para evaluar la eficiencia de un sistema de combustión. Cuanto más aproximada es la temperatura máxima de una llama a la temperatura adiabática, más eficiente es el sistema de combustión.

La primera ley de la termodinámica establece que la potencia total de un sistema es igual al cambio en el trabajo realizado sobre el sistema por unidad de tiempo más el cambio en la energía calorífica por unidad de tiempo. Podemos expresar matemáticamente a la primera ley de la termodinámica mediante la ecuación (2.8).

$$\frac{dm}{dt} \left(h_2 - h_1 + \frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right) = q + \frac{dw}{dt} \quad [\text{W}] \quad (2.8)$$

Donde,

dm/dt : Flujo másico del sistema [Kg/s].

h_i : Entalpía específica del sistema en los puntos 1 y 2 [J/Kg].

$v_i^2/2$: Energía cinética de la mezcla gaseosa en los puntos 1 y 2 [m²/s²].

q : Cambio en la energía térmica del sistema por unidad de tiempo [W].

dw/dt : Potencia añadida al sistema [W].

Para calcular la temperatura adiabática de una llama consideramos un proceso de combustión adiabático a presión constante. Si la energía cinética de los productos de la

combustión es pequeña comparada con su entalpía y además los gases no realizan ningún trabajo, entonces podemos re-escribir la ecuación (2.8).

$$h_{\text{reactivos}}(T_0, P) = h_{\text{productos}}(T_{\text{ad}}, P) \quad [\text{J/Kg}] \quad (2.9)$$

Donde,

$h_{\text{reactivos}}$: Entalpía específica de los reactivos de la combustión [J/Kg].

$h_{\text{productos}}$: Entalpía específica de los productos de la combustión [J/Kg].

P : Presión constante del proceso de combustión [Pa].

T_0 : Temperatura inicial del aire y del combustible [K].

T_{ad} : Temperatura adiabática de los productos de la combustión [K].

La ecuación (2.9) está ilustrada de manera gráfica en la figura 2.1.

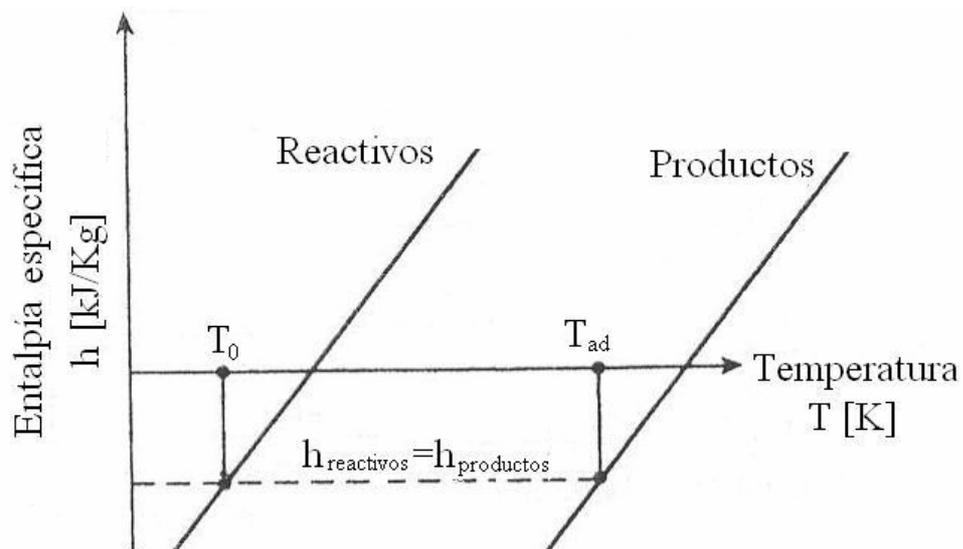


Figura 2.1. Definición gráfica de la temperatura adiabática.

La temperatura adiabática de una llama es la temperatura de los productos de la combustión manteniendo constante la entalpía específica del sistema y sin pérdidas de

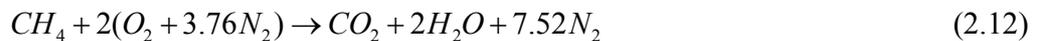
energía térmica. La entalpía específica de los reactivos y de los productos puede ser determinada mediante las ecuaciones (2.10) y (2.11) respectivamente.²

$$h_{\text{reactivos}} = \sum_{\text{reactivos}} N_i h_f \quad [\text{J/Kg}] \quad (2.10)$$

$$h_{\text{productos}} = \sum_{\text{productos}} N_i [h_f + c_{p,i} (T_{ad} - T_0)] \quad [\text{J/Kg}] \quad (2.11)$$

Donde N_i es el número de moles, $c_{p,i} = [\text{J}/(\text{mol K})]$ es el calor específico a presión constante y h_f es la entalpía específica de formación del compuesto químico en cuestión.

Ahora calculamos la temperatura adiabática de una llama producida por la combustión de una mezcla estequiométrica de aire y gas metano. La presión barométrica es de una atmósfera y la temperatura inicial es de 298 K. En este cálculo asumimos que no hay disociación. La reacción química que rige la combustión de la mezcla aire-metano es la expresión (2.12).



En la tabla 2.2 están tabuladas las entalpías de formación y los valores específicos de los principales compuestos que intervienen en la combustión de la mezcla aire-metano.

Compuesto químico	Entalpía de formación h_f [KJ/Kmol] a 298 K	Calor específico c_p [KJ/(Kmol K)] a 1200 K	Número de moles
CH_4	-74831		1
C_3H_8	-103847		1
C_4H_{10}	-124733		1
CO_2	-393546	56.21	1
H_2O	-241845	43.87	2
N_2	0	33.71	7.52
O_2	0		2

Tabla 2.2. Propiedades térmicas de los reactivos y de los productos de la combustión.²

Usando los valores de la tabla 2.2 en las ecuaciones (2.10) y (2.11) obtenemos las siguientes igualdades.

$$h_{\text{reactivos}} = (1 \text{ Kmol})(-74831 \text{ KJ / Kmol}) + (2 \text{ Kmol})(0) + (7.52 \text{ Kmol})(0) = -74831 \text{ KJ}$$

$$h_{\text{productos}} = (1 \text{ Kmol})[-393546 \text{ KJ / Kmol} + 56.21(T_{ad} - 298 \text{ K})] + (2 \text{ Kmol})[-241845 \text{ KJ / Kmol} + 43.87(T_{ad} - 298 \text{ K})] + (7.52 \text{ Kmol})[0 + 33.71(T_{ad} - 298 \text{ K})]$$

Igualando las dos expresiones anteriores obtenemos la temperatura adiabática de los productos de la combustión de la mezcla estequiométrica aire-metano.

$$T_{ad \text{ aire-metano}} = 2317 \text{ K}$$

Siguiendo el procedimiento anterior calculamos la temperatura adiabática de la llama para las siguientes mezclas estequiométricas: aire-propano, aire-butano, aire-gas natural y aire-gas LP. La tabla 2.3 contiene los resultados de los cálculos.

Mezcla estequiométrica	Temperatura adiabática sin disociación [K]	Temperatura adiabática con disociación ² [K]
Aire-Metano	2317	2226
Aire-Propano	2388	2267
Aire-Butano	2395	2270
Aire-Gas natural	2200	2115
Aire-Gas LP	2390	2268

Tabla 2.3. Temperaturas adiabáticas de las llamas producidas por la combustión de los principales combustibles gaseosos mezclados con aire. $P = 1 \text{ atm}$ y $T_0 = 298 \text{ K}$.

La tabla 2.3 también contiene las temperaturas adiabáticas de las llamas considerando los efectos de la disociación a una atmósfera de presión. La disociación es prácticamente nula cuando la presión es igual o mayor que 100 atmósferas.

2.6. Estructura Geométrica de las Llamas de Difusión a Chorro

En esta sección estudiamos la combustión de los flujos laminares. El comportamiento de un flujo es laminar cuando su número de Reynolds ($Re \equiv \rho_s v_s R / \mu$) es menor que 2300. $\rho_s = [\text{Kg}/\text{m}^3]$, $v_s = [\text{m}/\text{s}]$ y $\mu = [\text{Kg}/(\text{m s})]$ son la densidad, la velocidad y la viscosidad del fluido en la boquilla del quemador; $R = [\text{m}]$ es el radio de la boquilla del quemador. En las llamas de difusión o llamas no-premezcladas, los reactivos están inicialmente separados. En la interfaz entre el combustible, el aire y la energía de ignición se produce tanto el mezclado de los reactivos, como la combustión. Durante el proceso de mezclado las moléculas de combustible emigran hacia la llama en una dirección, mientras que las moléculas de aire emigran hacia la llama en la dirección contraria. Un ejemplo de una llama laminar de difusión a chorro son las llamas sin premezcla de aire producidas por los quemadores de gas tipo Bunsen. Dispositivos industriales, comerciales y residenciales como las estufas, los hornos y los secadores emplean llamas laminares de difusión a chorro. En estos dispositivos, el flujo de combustible es parcialmente premezclado con el aire para reducir o eliminar la formación de hollín. El hollín está constituido por partículas de carbón que se forman cuando la mezcla aire-hidrocarburo es rica en combustible.

Uno de los principales temas de interés en el diseño y operación de los sistemas de combustión es la geometría de las llamas. Las llamas cortas frecuentemente son deseadas. También son de interés los factores que modifican a la estructura geométrica de la llama como la presión, el tipo de combustible y la cantidad de aire premezclado.

Las características esenciales de las llamas de difusión a chorro están ilustradas en la figura 2.2.a. El quemador tiene una boquilla circular de radio R . La mezcla aire-combustible fluye a lo largo del eje de la llama y es difundida radialmente hacia afuera. Las gráficas 2.2.b, 2.2.c y 2.2.d muestran la distribución de temperatura en los planos $x = 0$, $0 < x < L_f$ y $x = L_f$ respectivamente. $L_f = [\text{m}]$ es la longitud de la llama.

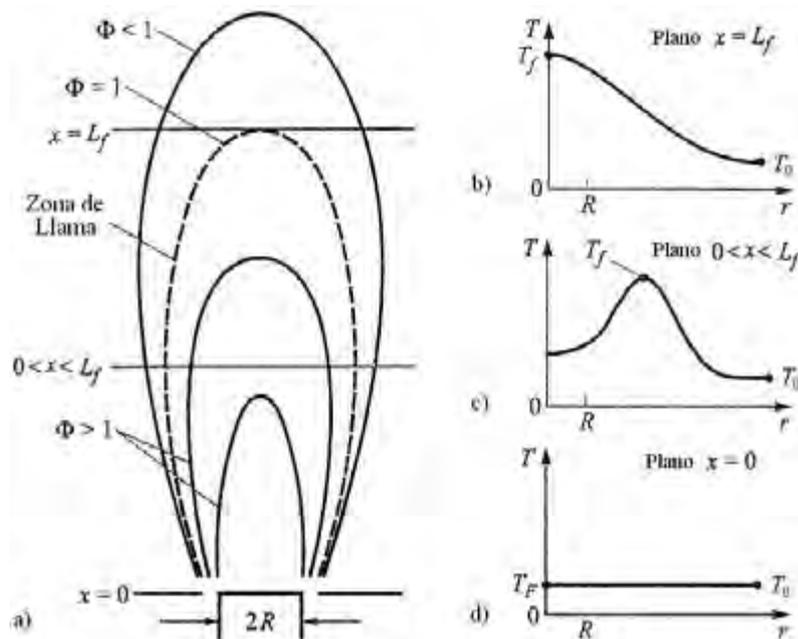


Figura 2.2. a) Estructura geométrica de las llamas laminares de difusión a chorro. b), c) y d) Distribución de temperatura en los planos $x=0$, $0 < x < L_f$ y $x=L_f$ respectivamente.²

La *superficie de la llama* es la región en donde el combustible y el aire están mezclados en proporciones estequiométricas. En la figura 2.2 a), la superficie de llama está indicada con línea discontinua. Aunque el combustible y el aire son quemados en la llama, la relación equivalente Φ aún tiene significado ya que la composición de los productos de la combustión están relacionados a un valor único de Φ . En llamas sobre-ventiladas, donde hay más aire que el necesario para la combustión, la longitud de la llama (L_f) está determinada por el punto axial en donde se cumple la condición (2.13).

$$\Phi(r=0, x=L_f) = 1 \quad [\text{adimensional}] \quad (2.13)$$

F. G. Roper desarrolló^{6,8} y verificó^{7,8} expresiones matemáticas que predicen la longitud de las llamas laminares de difusión a chorro. Las expresiones fueron desarrolladas considerando varios regímenes de flujo y boquillas con geometría circular, cuadrada y rectangular. Las verificaciones experimentales de Roper produjeron los resultados que presentamos a continuación.

Para estimar la longitud de la llama en los quemadores con boquillas circulares y cuadradas podemos usar las ecuaciones (2.14) y (2.15). Los resultados son aplicables a flujos dominados por efecto boyante o por momento. Los resultados son válidos para flujos de combustible en aire cuasi-estático, flujos en la misma dirección y llamas sobre-ventiladas.

Boquilla Circular

$$L_{f,circ} = 1330 \frac{Q_c (T_0 / T_c)}{\ln(1+1/S)} \quad [\text{m}] \quad (2.14)$$

$S = 4.76[x+(y/4)]$ es la relación estequiométrica molar aire-combustible. $T_0 = [\text{K}]$ y $T_c = [\text{K}]$ son la temperatura inicial del aire y la temperatura inicial del combustible respectivamente. $Q_c = [\text{m}^3/\text{s}]$ es el flujo volumétrico de combustible. Todas las variables de la ecuación (2.14) deben evaluarse en unidades del sistema internacional (SI).

Boquilla Cuadrada

$$L_{f,cuad} = 1045 \frac{Q_c (T_0 / T_c)}{\left\{ \text{ferc} \left[(1+S)^{-0.5} \right] \right\}^2} \quad [\text{m}] \quad (2.15)$$

Donde *ferc* es la función error complementaria. Todas las variables de la ecuación (2.15) deben estar en unidades del SI.

Boquilla Rectangular-Combustión Controlada por el Momento del Flujo

$$L_{f,Rect.-M} = 8.6 \times 10^4 \frac{b\beta^2 Q_c}{hIY_{c,estequiométrica}} \left(\frac{T_0}{T_c} \right)^2 \quad [\text{m}] \quad (2.16)$$

Donde $b = [m]$ y $h = [m]$ son el ancho y la longitud de la boquilla respectivamente. La función β está dada por la ecuación (2.17).

$$\beta = \frac{1}{4 \operatorname{ferc} \left[\frac{1}{1+S} \right]} \quad [\text{adimensional}] \quad (2.17)$$

La variable I es el cociente entre el momento inicial del flujo que sale de la boquilla y el momento de un flujo uniforme.

$$I = \frac{J_s}{\left(\frac{dm_c}{dt} \right) v_s} \quad [\text{adimensional}] \quad (2.18)$$

$J_s = [Kg \text{ m/s}^2]$ y v_s son el momento y la velocidad respectivamente de la mezcla aire-combustible en la salida de la boquilla. $dm_c/dt = [Kg/s]$ es el flujo másico de combustible. Si el flujo es uniforme, entonces $I = 1$. Para flujos con un perfil de velocidad parabólico en la boquilla del quemador $I = 1.5$, suponiendo que $h \gg b$. $Y_{c,estequiométrica}$ es la fracción másica de combustible estequiométrico y está determinada por la siguiente ecuación.

$$Y_{c,estequiométrica} = \frac{m_c}{m_c + m_{aire}} \quad [\text{adimensional}] \quad (2.19)$$

La ecuación (2.16) aplica sólo para llamas sobre-ventiladas con aire estancado.

Boquilla Rectangular-Combustión Controlada por el Efecto Boyante

$$L_{f,Rect-B} = 2x10^3 \left[\frac{b\beta^4 Q_c^4 T_0^4}{a_b h^4 T_c^4} \right]^{\frac{1}{3}} \quad [m] \quad (2.20)$$

La variable a_b es la aceleración boyante media de los productos de la combustión y podemos evaluarla mediante la ecuación (2.21).

$$a_b \cong 0.6g \left(\frac{T_f}{T_0} - 1 \right) \quad [\text{m/s}^2] \quad (2.21)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$).

Boquilla Rectangular-Régimen de Transición

Para determinar si una llama está dominada por el efecto boyante o por momento debemos evaluar el número de Froude (Fr). El número de Froude es el cociente entre el momento inicial de los reactivos y la fuerza boyante que experimenta la llama. Para llamas laminares de difusión a chorro en aire estancado, el número de Froude está determinado por la ecuación (2.22).

$$Fr \equiv \frac{\left(v_s I Y_{c,estequiometrica} \right)^2}{a_b L_f} \quad [\text{adimensional}] \quad (2.22)$$

Mediante los siguientes criterios determinamos el régimen del flujo.

$Fr \gg 1$ Llama dominada por el momento de los gases.

$Fr \approx 1$ Llama en régimen de transición.

$Fr_f \ll 1$ Llama dominada por el efecto boyante.

Para calcular el valor de L_f , en boquillas rectangulares, debemos conocer el régimen del flujo y para conocer el régimen del flujo necesitamos el valor de L_f . Por lo tanto, debemos aplicar un proceso iterativo para validar la elección del régimen del flujo. En régimen de transición la longitud de la llama puede estimarse con la ecuación (2.23).

$$L_{f,Rect.-T} = \frac{4}{9} L_{f,Rect.-M} \left(\frac{L_{f,Rect.-B}}{L_{f,Rect.-M}} \right)^3 \left\{ \left[1 + 3.38 \left(\frac{L_{f,Rect.-M}}{L_{f,Rect.-B}} \right)^3 \right]^{\frac{2}{3}} - 1 \right\}$$

[m] (2.23)

Los resultados de Roper están resumidos en la tabla 2.4.

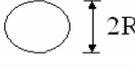
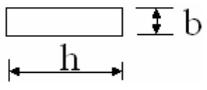
Geometría de la boquilla	Condiciones del flujo	Ecuación aplicable
Circular 	Controlado por momento o por efecto boyante.	(2.14)
Cuadrada 	Controlado por momento o por efecto boyante.	(2.15)
Rectangular 	Controlado por momento.	(2.16)
	Controlado por efecto boyante.	(2.20)
	Régimen de transición.	(2.23)

Tabla 2.4. Resultados experimentales de Roper para el cálculo de la longitud de la llama.⁷

2.6.1. Factores que Afectan a la Longitud de la Llama

Enseguida analizamos las expresiones matemáticas resumidas en la tabla 2.4 para conocer la manera en que algunos factores modifican a la longitud de la llama.

2.6.1.1. Flujo Volumétrico de Combustible y Geometría de la Boquilla

La figura 2.3 compara la longitud de la llama en quemadores con boquilla circular y rectangular. Las boquillas rectangulares analizadas en la gráfica tienen diferentes cocientes h/b . Todas las boquillas tienen la misma área. Si el área de la boquilla

es fija, entonces el flujo volumétrico de combustible es el mismo para todas las configuraciones de quemadores.

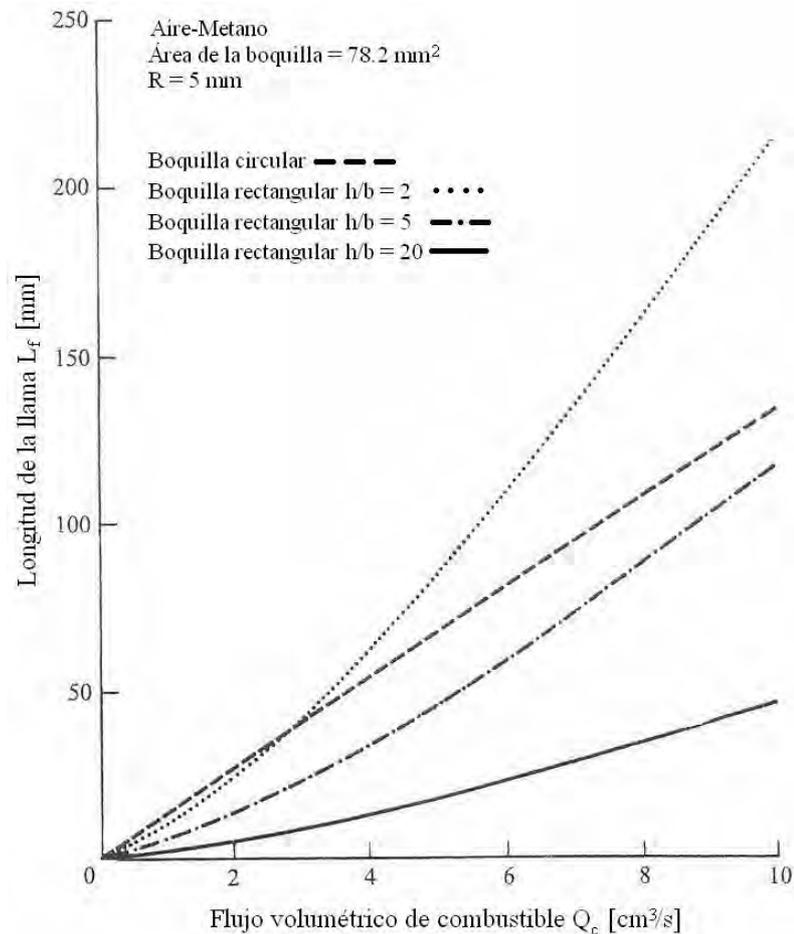


Figura 2.3. Dependencia de la longitud de la llama con el flujo volumétrico de combustible.²

En la figura 2.3 podemos observar una dependencia lineal de la longitud de la llama con el flujo volumétrico de combustible para la boquilla circular. Para boquillas rectangulares, la dependencia de la longitud de la llama con el flujo volumétrico de combustible es no-lineal. Para las condiciones seleccionadas, el número de Froude es mucho menor que uno, por lo tanto las llamas están dominadas por la fuerza boyante que experimentan. Las llamas son más cortas a medida que la boquilla rectangular es más estrecha (h/b aumenta), manteniendo Q_c constante.

2.6.1.2. Estequiometría de la Combustión

El cociente estequiométrico molar S está definido en términos del fluido que sale de la boquilla y del fluido que rodea a la llama. Con la ecuación (2.24) podemos calcular el parámetro S .

$$S = \left(\frac{\text{moles}_{\text{del fluido ambiental}}}{\text{moles}_{\text{del fluido de la boquilla}}}_{\text{estequiométrico}} \right) \quad [\text{adimensional}] \quad (2.24)$$

El valor del parámetro S es diferente para cada tipo de combustible y para combustibles diluidos. La fracción molar del oxígeno atmosférico también modifica al valor de S . Los parámetros estudiados en las siguientes secciones también son de interés en muchas aplicaciones y todos ellos alteran la magnitud del cociente molar S .

2.6.1.2.1. Tipo de Combustible

El cociente estequiométrico molar de la mezcla aire-combustible puede ser calculado mediante un simple balance de átomos. Para los hidrocarburos de la forma C_xH_y , el cociente estequiométrico puede expresarse como en la siguiente ecuación.

$$S = \frac{x + \frac{y}{4}}{\chi_{O_2}} \quad [\text{adimensional}] \quad (2.25)$$

Donde χ_{O_2} es la fracción molar de oxígeno atmosférico. La figura 2.4 muestra la longitud de la llama para combustiones estequiométricas que emplean diferentes combustibles. En la gráfica, las longitudes de llama son relativas a la longitud de la llama que quema una mezcla aire-metano. La geometría de la boquilla es circular. El flujo volumétrico de combustible es el mismo para todos los combustibles considerados.

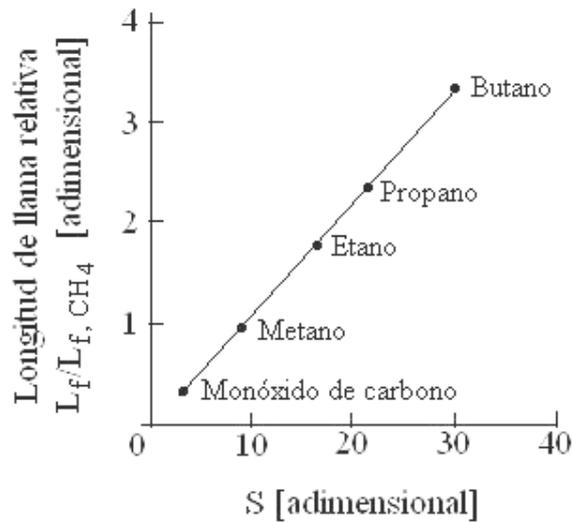


Figura 2.4. Dependencia de la longitud de la llama con el tipo de combustible.²

En la figura 2.4 observamos que la longitud de la llama es mayor para los hidrocarburos saturados superiores como el propano y el butano. La llama del propano es aproximadamente 2.5 veces más larga que la llama del metano.

2.6.1.2.2. Aire Primario

Los quemadores de gas premezclan una porción del aire estequiométrico con el combustible gaseoso antes de que la mezcla sea quemada. La porción de aire premezclado es conocida como *aire primario*. Típicamente el aire primario está entre un 40% y 60% del aire estequiométrico requerido. El aire primario tiende a reducir la longitud de la llama y minimiza la formación de hollín. Si el aire primario es superior al 60% del aire estequiométrico, entonces la llama puede propagarse hacia el interior del quemador. Este fenómeno es conocido como *retroceso*.

La figura 2.5 muestra el efecto del aire primario en la longitud de la llama. El combustible quemado es metano y la geometría de la boquilla es circular. En la gráfica observamos que la longitud de la llama es reducida aproximadamente al 90% de su longitud original en el rango del 40% al 60% del aire primario.

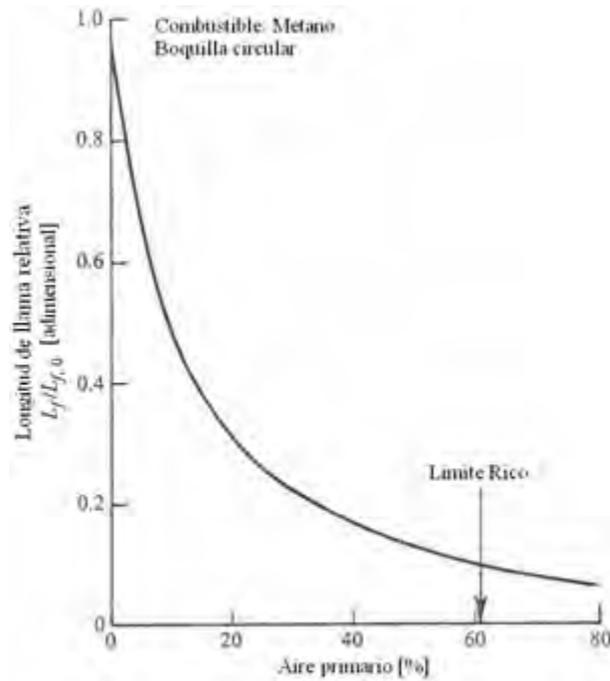


Figura 2.5. Efecto del aire primario en la longitud de las llamas laminares de difusión a chorro.²

Considerando al aire primario, el cociente estequiométrico molar S puede ser evaluado tratando al combustible como una mezcla de combustible real y aire primario.

$$S = \frac{1 - \psi_{\text{primario}}}{\psi_{\text{primario}} + \frac{1}{S_{\text{puro}}}} \quad [\text{adimensional}] \quad (2.26)$$

Donde ψ_{primario} es la fracción de aire primario y S_{puro} es el cociente estequiométrico molar del combustible puro o sin premezcla de aire.

2.6.1.2.3. Contenido de Oxígeno en el Aire

La cantidad de oxígeno en el aire tiene una fuerte influencia en la longitud de las llamas. La figura 2.6 nos muestra este efecto. Pequeñas reducciones en el contenido de oxígeno del aire (valor nominal de 21%), provocan un notable alargamiento de las llamas.

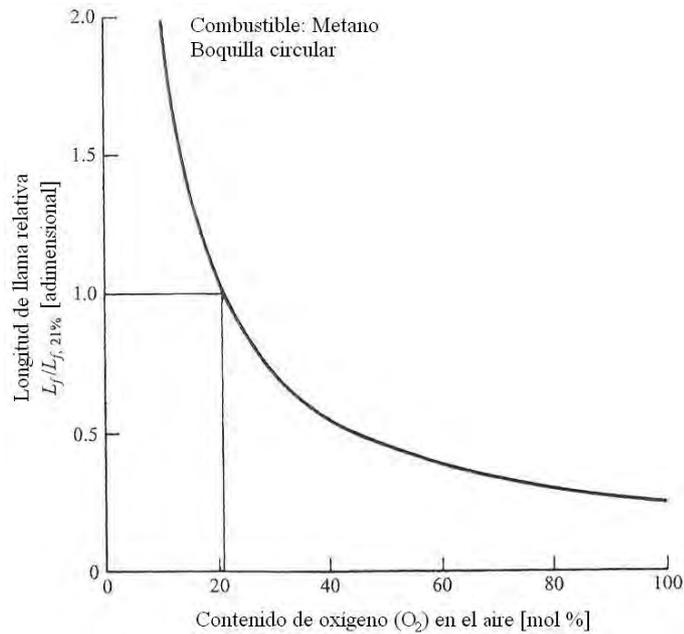


Figura 2.6. Efecto del oxígeno atmosférico en la longitud de las llamas.²

Cuando el comburente es oxígeno puro, la longitud de la llama de metano es aproximadamente un cuarto de su longitud en el aire.

2.6.1.2.4. Disolución del Combustible en Gas Inerte

La disolución del combustible con un gas inerte tiene el efecto de reducir la longitud de la llama. La disolución del combustible modifica el cociente estequiométrico molar. Para combustibles basados en hidrocarburos saturados podemos calcular el parámetro S mediante la ecuación (2.27).

$$S = \frac{x + \frac{y}{4}}{\left(\frac{1}{1 - \chi_{dil}}\right) \chi_{O_2}} \quad [\text{adimensional}] \quad (2.27)$$

χ_{dil} es la fracción molar del disolvente en el flujo de combustible.

2.7. Propiedades Ópticas de las Llamas

Cuando suministramos algún tipo de energía como calor o electricidad a un objeto, éste regresa parte de la energía en forma de radiación electromagnética. Un espectro electromagnético es una gráfica que nos muestra la clasificación de la radiación que emite un cuerpo en función de la longitud de onda. La figura 2.7 nos muestra las diferentes regiones del espectro electromagnético.

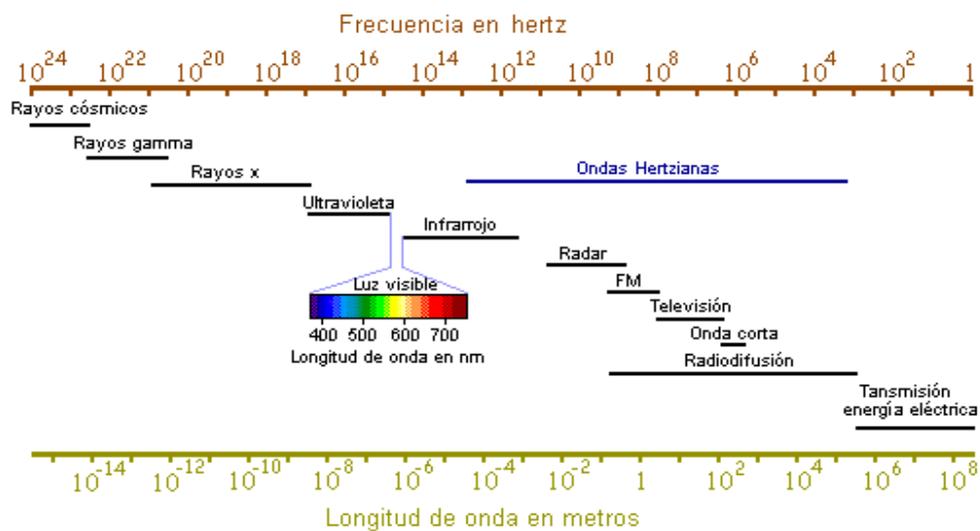


Figura 2.7. Regiones del espectro electromagnético.

Los cuerpos sólidos y líquidos con temperatura $T > 0$ K emiten de acuerdo con la *ley de radiación de Planck*. La ecuación (2.28) es la definición matemática de la ley de Planck y describe la radiancia espectral de un cuerpo a temperatura T .

$$L_{\lambda} = \varepsilon \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \right) \quad [\text{W}/(\text{cm}^2 \text{ sr } \mu\text{m})] \quad (2.28)$$

L_{λ} es la radiancia espectral, ε es la emisividad, $h = [\text{J s}]$ es la constante de Planck, $c = [\text{m/s}]$ es la velocidad de la luz en el vacío, $\lambda = [\mu\text{m}]$ es la longitud de onda de la radiación, k es la constante de Boltzmann y $T = [\text{K}]$ es la temperatura del cuerpo.

La figura 2.8 muestra curvas que representan la radiancia espectral de un cuerpo a diferentes temperaturas. Las curvas de radiancia espectral están graficadas para 500 K, 600 K, 800 K, 1000 K y 1200 K.

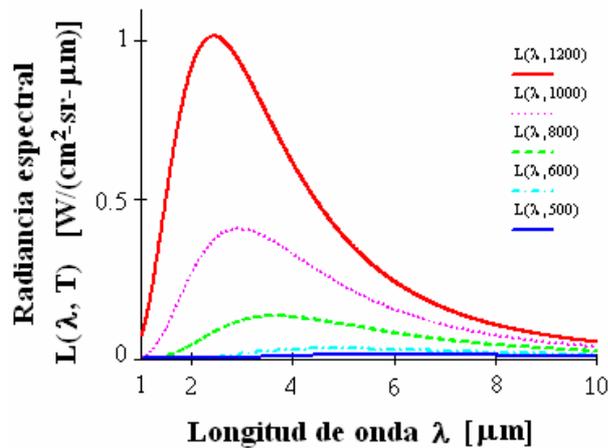


Figura 2.8. Representación gráfica de la ley de radiación de Planck.

La emisión espontánea de las llamas es un fenómeno complejo y difícil de describir en términos generales. La emisión de las llamas varía con la temperatura, la longitud de onda, el tipo de combustible, el quemador, las condiciones cinéticas de la mezcla y la zona de análisis en la llama. Las llamas producidas por la combustión de los hidrocarburos emiten con mayor intensidad en el rango espectral de $1 \mu\text{m}$ a $5 \mu\text{m}$ como observamos en la figura 2.9.

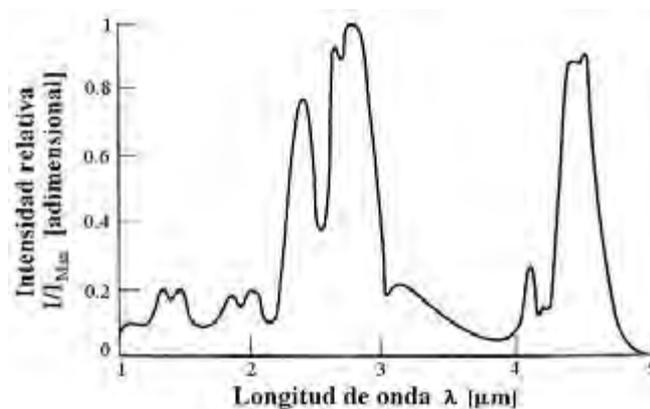


Figura 2.9. Espectro de emisión infrarroja de una llama que quema una mezcla aire-hidrocarburos.⁹

La emisión óptica de las llamas nos proporciona información acerca de los procesos que ocurren durante la combustión. Las técnicas espectroscópicas detectan la radiación emitida por la llama a lo largo de la línea de visión. La radiación detectada proviene tanto de la zona de combustión primaria, como de la zona de combustión secundaria. Generalmente los espectros de emisión resultantes son difíciles de interpretar. En la siguiente sección clasificamos a los espectros para facilitar la comprensión y el análisis de la información que contienen los espectros de emisión de las llamas.

2.7.1. Clasificación de los Espectros de Emisión

Los espectros de emisión espontánea de las llamas pueden clasificarse de acuerdo a la distribución de su energía radiante. En las llamas podemos encontrar las siguientes clases de espectros:

- a) *Espectro continuo*: La energía emitida por un cuerpo sólido o líquido a temperatura $T > 0$ K está distribuida en todas las longitudes de onda. La distribución de energía está determinada por la ley de radiación de Planck mostrada en la ecuación (2.28). El espectro de emisión de las lámparas incandescentes es un ejemplo de espectro continuo. En los procesos de combustión de los hidrocarburos, los espectros continuos son originados en la zona con hollín de las llamas ricas en combustible. La emisión continua de radiación también puede deberse a la recombinación de iones o la asociación de átomos y radicales.

- b) *Espectro discreto*: La radiación electromagnética emitida está confinada en un intervalo estrecho de longitudes de onda. Este tipo de espectros es atribuido a transiciones energéticas de átomos, moléculas o iones aislados. Los gases emiten espectros discretos debido a la escasa interacción entre sus átomos o moléculas. Los espectros discretos pueden ser clasificados a su vez en dos categorías: espectros atómicos y espectros de banda.

- b.1) *Espectros atómicos*: Los espectros atómicos están compuestos por líneas espectrales aisladas como en la figura 2.10. Este arreglo de líneas espectrales constituye un espectro de líneas. Las líneas espectrales están asociadas a átomos libres.

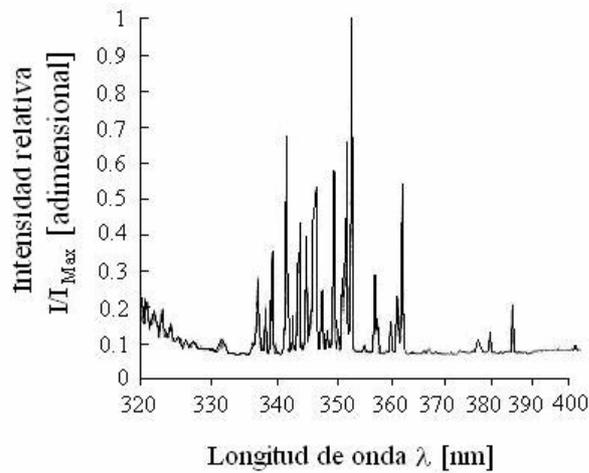


Figura 2.10. Fragmento del espectro de emisión del átomo de níquel.¹⁰

- b.2) *Espectros de banda*: En este caso las líneas espectrales están agrupadas. Cada grupo de líneas es una banda espectral. El nombre de espectro de banda es dado a los espectros que presentan el aspecto de la figura 2.11. Los *espectros moleculares* son generados por la superposición de las bandas espectrales de varios átomos.

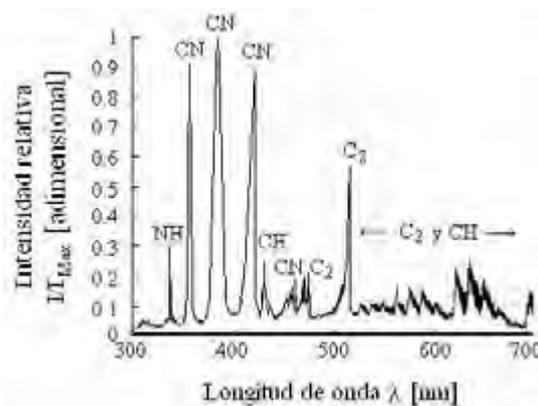


Figura 2.11. Espectro de emisión visible de una llama rica que quema óxido nítrico y acetileno.¹¹

2.7.2. Espectros de las Llamas

Los procesos de combustión generan compuestos químicos estables e inestables o radicales. Entre los productos estables está el agua, el bióxido de carbono, el monóxido de carbono, el oxígeno molecular y el nitrógeno molecular. Las figuras 2.12 y 2.13 muestran los espectros de transmitancia del agua y del dióxido de carbono.

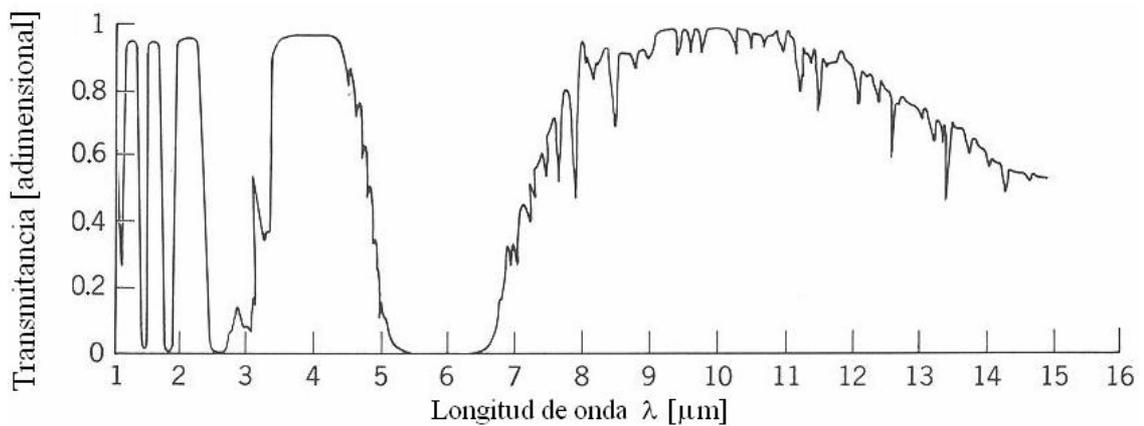


Figura 2.12. Espectro de transmitancia del agua producida por las llamas que queman hidrocarburos mezclados con aire.⁹

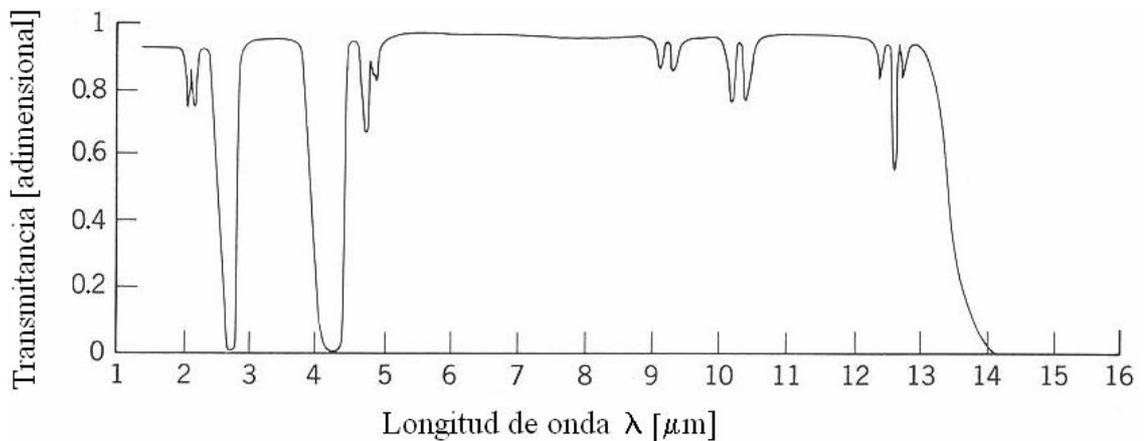


Figura 2.13. Espectro de transmitancia del CO_2 producido por las llamas que queman hidrocarburos mezclados con aire.⁹

El espectro de emisión visible y ultravioleta de las llamas es generado por cambios en la configuración electrónica de las moléculas. Estos cambios de configuración electrónica determinan la posición de un sistema de bandas en el espectro. Los cambios en la energía vibracional de los átomos de una molécula determinan la posición de las bandas individuales dentro del sistema de bandas. Las transiciones rotacionales determinan la estructura fina de las bandas individuales.

Ninguno de los productos estables de la combustión emite de manera apreciable en las regiones visible y ultravioleta del espectro electromagnético. El agua emite bandas vibracionales en 1.8 μm , 2.7 μm , 6.3 μm y una banda rotacional entre 10 μm y 100 μm . El bióxido de carbono emite bandas en 2.8 μm , 4.3 μm y 15 μm . El monóxido de carbono emite una banda en 2.3 μm y otra en 4.5 μm . El óxido nitroso presenta emisión en 2.6 μm y 5.2 μm . La banda vibracional del radical hidroxilo cubre aproximadamente desde el infrarrojo cercano hasta 4 μm .

Algunos de los radicales o productos inestables de la combustión de los hidrocarburos son: hidroxilo (OH), formil (HCO), CH y NH . Los radicales son formados en la zona de reacción de las llamas, que corresponde al cono interno de las llamas generadas en los quemadores Bunsen. Los radicales anteriores emiten una considerable cantidad de radiación visible y ultravioleta.

El único producto de la combustión con concentración en equilibrio y que emite un espectro intenso en el ultravioleta es el radical OH . La figura 2.14 muestra el espectro de emisión del radical OH observado en llamas que queman una mezcla pobre de aire y metano. Las llamas fueron producidas en un quemador Bunsen.

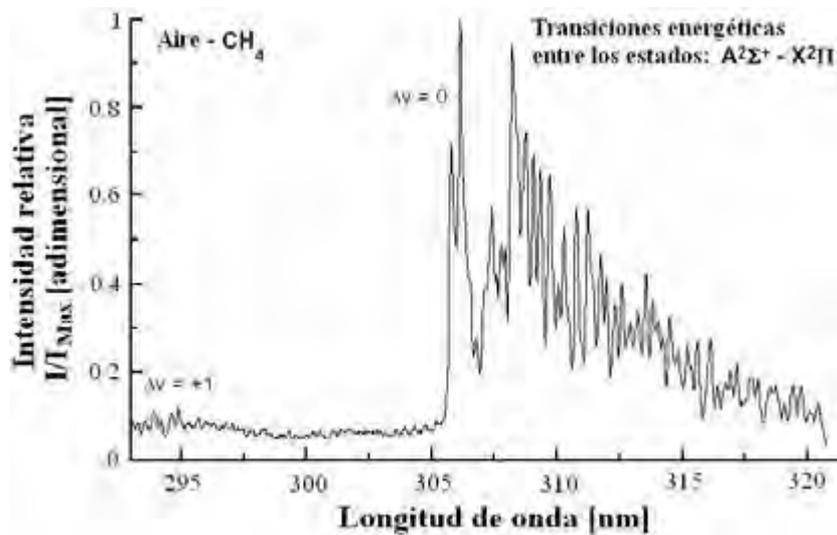


Figura 2.14. Fragmento del espectro de emisión ultravioleta del radical OH producido por las llamas que queman una mezcla estequiométrica aire-metano.¹¹

El radical hidroxilo tiene un sistema de bandas con emisión máxima en 306.4 nm. La figura 2.15 muestra el espectro de emisión del radical CH comúnmente observado en llamas que queman una mezcla pobre de aire-metano. La llama analizada fue producida en un quemador Bunsen.

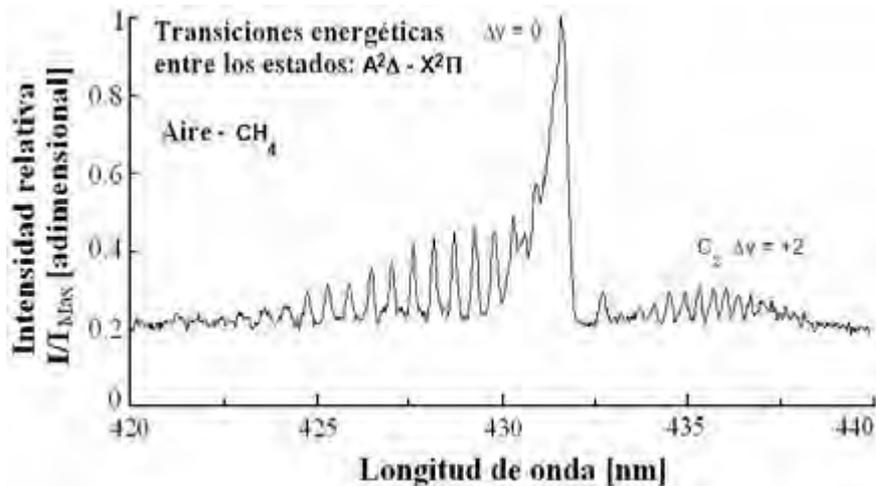


Figura 2.15. Fragmento del espectro de emisión del radical CH producido por las llamas que queman una mezcla estequiométrica aire-metano.¹¹

El radical CH formado en el cono interno de las llamas, que queman hidrocarburos, emite tres sistemas de bandas. El pico de emisión más intenso está en 431.5 nm. Una banda de emisión ultravioleta tiene su pico en 315 nm. En las llamas es particularmente visible la banda cuya emisión máxima está en 387.2 nm. La figura 2.16 nos muestra el espectro de emisión de los radicales C_2 formados en una llama aire-metano rica en combustible. La llama fue producida en un quemador Bunsen.

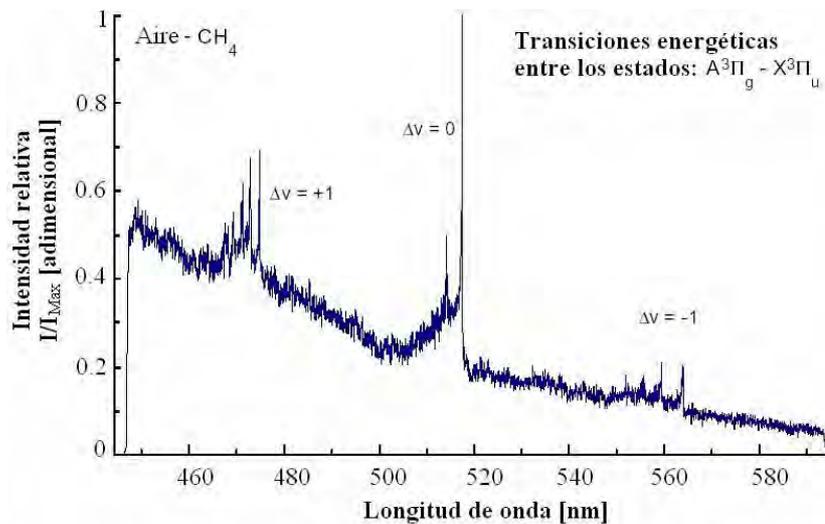


Figura 2.16. Espectro de emisión del radical C_2 producido por las llamas aire-metano.¹¹

Existen 7 sistemas de bandas espectrales que son atribuidas a los radicales C_2 y son los siguientes:

- *Swan*. Sistema de bandas más característico de las llamas de hidrocarburos y está situado entre 435 nm y 686.0 nm.
- *Fox-Herzberg*. Situado entre 237.8 nm y 300.0 nm.
- *Balik-Ramsey*. Situado alrededor de los 1765.7 nm.
- *Freymark*. Con emisión máxima en 214.3 nm.
- *Mulliken*. Situado alrededor de los 231.3 nm.
- *Deslandres-D'Azambuja*. Situado entre 358.0 nm y 386.0 nm.
- *Phillips*. Situado alrededor de los 1209.1 nm.

Las llamas producidas por la combustión de los hidrocarburos en aire exhiben una emisión considerable de radiación cuyo espectro es cuasi-continuo. La emisión va desde 300 nm hasta 600 nm y es responsable del color azul de las llamas. Esta emisión es atribuida a las moléculas excitadas de bióxido de carbono CO_2^* . El espectro del radical C_2 en la figura 2.16 está superpuesto en el espectro continuo azul del CO_2^* . En las llamas ricas y al aire libre las emisiones azul y ultravioleta son observadas principalmente en la zona exterior de la llama. Si el suministro de oxígeno es insuficiente, entonces las bandas espectrales del agua y del bióxido de carbono son emitidas principalmente por la zona de reacción secundaria de la llama.

Según la ecuación (2.29) que es la *ley de desplazamiento de Wien*, en el rango de temperaturas de las llamas (1500 K – 3000 K), la emisión pico está en la región infrarroja entre 1 μm y 2 μm . La radiación infrarroja es emitida mayoritariamente por los productos de la combustión.

$$\lambda_{L_{Max}} T = 2898 \quad [\mu\text{m K}] \quad (2.29)$$

Donde T está en grados Kelvin y $\lambda_{L_{Max}}$ en micrómetros.

La zona primaria de combustión o cono interno de las llamas emite bandas espectrales en la región visible del espectro. Típicamente la radiación emitida por las llamas en la región visible y ultravioleta es menor que el 0.4% de la energía total liberada por la combustión. Las partículas calientes de carbón incrementan la radiación visible emitida por las llamas.

La figura 2.17 muestra el espectro de emisión de una llama generada por la combustión de una mezcla aire-gas butano.

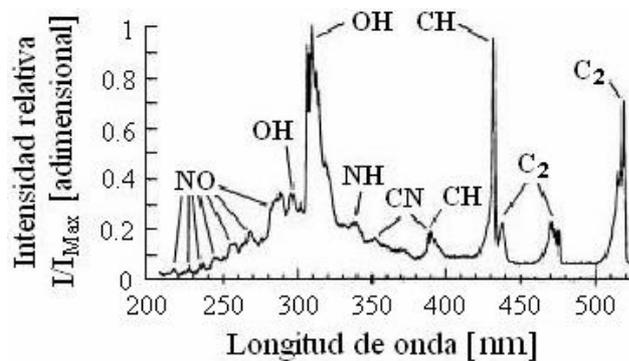


Figura 2.17. Espectro de emisión de una llama rica que quema una mezcla aire-butano.¹¹

Una de las bandas de la figura anterior es emitida por los radicales CH y tiene un pico de emisión en 387.2 nm. Los radicales C_2 emiten bandas espectrales de Swan entre 436 nm y 563 nm. La emisión ultravioleta del radical hidroxilo y la radiación de la molécula de CO provenientes de la zona de combustión son más intensas que las originadas fuera de la zona de reacción primaria. Con un exceso de combustible aparece la línea atómica del carbono en 247.8 nm. Si la deficiencia de oxígeno es considerable, entonces la llama incrementa su luminosidad como resultado de la emisión continua de las partículas de carbón no quemadas.

2.8. Conclusiones

Presentamos los fundamentos químicos, termodinámicos y ópticos que son necesarios para la descripción de las características y propiedades de las llamas laminares. Calculamos la relación estequiométrica aire-combustible y la relación equivalente para varios combustibles como el gas natural y el gas LP . Ambos parámetros nos proporcionan información acerca de las propiedades y de la calidad de la mezcla. Determinamos la temperatura adiabática de la llama para mezclas estequiométricas de los principales combustibles gaseosos con aire. Aunque la temperatura adiabática de la llama es sólo un concepto ideal, nos sirve como referencia para evaluar la eficiencia de la combustión. Por lo tanto, la temperatura adiabática es una herramienta indispensable en el diagnóstico de las llamas.

Describimos las características más importantes de las llamas laminares. Introdujimos conceptos básicos que nos permiten predecir con precisión la geometría de las llamas. Analizamos los principales factores que modifican al proceso de combustión y consecuentemente a la longitud de llama. Esta información nos permitirá controlar y adaptar un proceso de combustión a las necesidades particulares de cada aplicación. A menudo es deseable contar con llamas de poca longitud y alta temperatura.

Repasamos los conceptos básicos de espectroscopia. Analizamos los espectros de emisión y transmisión de las llamas que queman hidrocarburos saturados mezclados con aire. Los espectros de las llamas nos proporcionan información acerca de los procesos que ocurren durante la combustión. Si obtenemos el espectro de emisión de una llama, entonces podemos determinar sus principales propiedades y características como la temperatura y la concentración de sus productos.

En el siguiente capítulo discutimos las características de las técnicas y dispositivos que han sido desarrollados para el diagnóstico y el control de los procesos de combustión.

CAPÍTULO III

ESTADO DEL ARTE

3.1. Introducción

En aplicaciones industriales y de investigación es necesario conocer el comportamiento espacial y temporal de los procesos de combustión. Las técnicas para el diagnóstico de un proceso de combustión están orientadas al análisis del combustible, del comburente, de la mezcla aire-combustible, de las emisiones contaminantes y de la estructura geométrica de la llama. Los dispositivos de combustión operan bajo ciertas condiciones de seguridad. Las condiciones de seguridad para la operación de los quemadores de gas están reguladas por las normas oficiales de cada país o región.

El diagnóstico de los procesos de combustión puede realizarse a través de diversas técnicas. Podemos clasificar a las técnicas de diagnóstico en función de la variable que mediremos y/o controlaremos. Algunas de estas variables son la velocidad de los flujos, la composición química de los gases, la temperatura de la llama y la estructura geométrica de la llama. Actualmente es posible analizar simultáneamente múltiples variables con una sola técnica.

3.2. Técnicas para la Caracterización de los Flujos de la Combustión

La caracterización de los flujos de la combustión nos permite conocer su turbulencia, presión y velocidad. En el caso de las llamas también podemos determinar el tamaño, la distribución y la velocidad de las partículas de carbón.¹² Esta información es fundamental para reducir tanto la formación de hollín como las emisiones contaminantes.

Podemos determinar las características de los flujos a través las siguientes técnicas e instrumentos:

- Medidores de desplazamiento positivo.
- Manómetros.
- Anemómetros mediante alambre caliente (*HWA*: hot-wire anemometers).
- Velocimetría de imágenes de partículas (*PIV*: particle image velocimetry).
- Velocimetría por patrones de moteado.
- Velocimetría láser por efecto Doppler (*LDV*: laser Doppler velocimetry).

3.2.1. Medidores de Desplazamiento Positivo

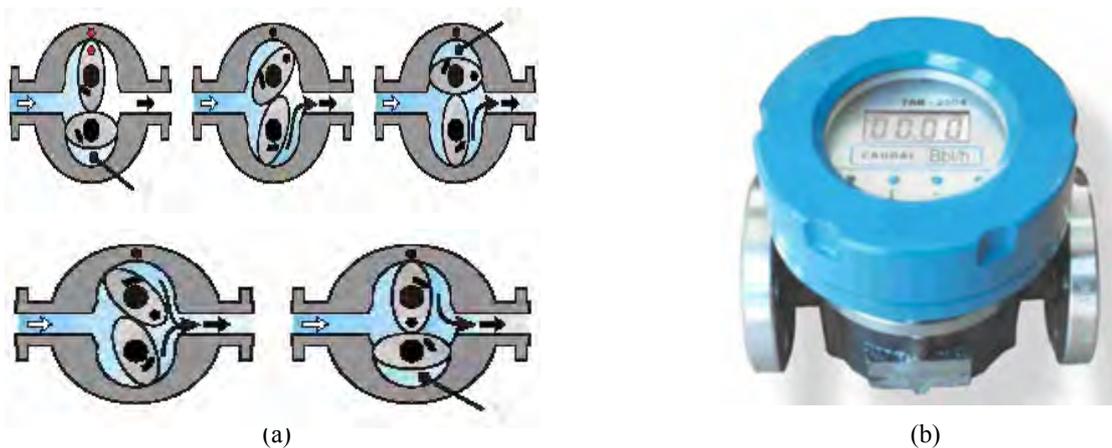


Figura 3.1. a) Esquema del principio de funcionamiento de los caudalímetros o medidores de desplazamiento positivo. b) Caudalímetro digital.

Los medidores desplazamiento positivo o caudalímetros miden el volumen de fluido que pasa a través de ellos por unidad de tiempo. La figura 3.1.a es un esquema del principio de funcionamiento de los caudalímetros. El flujo que entra al medidor hace girar un par de levas que desplazan un volumen fijo de fluido por vuelta. El caudal es calculado a partir del número de giros de las levas. Existen caudalímetros analógicos y digitales, este último tipo es mostrado en la figura 3.1.b.

3.2.2. Manómetros

La presión es la fuerza ejercida por unidad de área. La presión absoluta de un fluido tiene como referencia una presión igual a cero pascales [Pa]. La presión atmosférica o barométrica es la presión ejercida por los gases atmosféricos sobre la superficie de la tierra. La presión manométrica es la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica. Los dispositivos usados para la medición de la presión son conocidos como manómetros. La tabla 3.1 contiene una clasificación de los manómetros y sus rangos de operación.

Tipo de manómetro	Rango de operación [Pa]
De ionización	$1.3 \times 10^{-2} - 1.3 \times 10^{-1}$
De termopar	$1.3 \times 10^{-1} - 6.7$
De resistencia	$1.3 \times 10^{-1} - 1.3 \times 10^2$
Mc. Clau	$1.3 \times 10^{-2} - 1.3 \times 10^3$
Campana invertida	$0 - 7.4 \times 10^{-2}$
De fuelle abierto	1.3 - 23
De cápsula	$2.4 \times 10^{-2} - 2.4$
Campana de mercurio	0 - 49
En "u"	$0 - 20 \times 10^3$
De fuelle cerrado	$0 - 30 \times 10^3$
Espiral	$0 - 3.0 \times 10^6$
Bourdon "c"	$0 - 15 \times 10^6$
Medidor de esfuerzos	$0 - 35 \times 10^6$
Helicoidal	$0 - 10 \times 10^7$

Tabla 3.1. Clasificación de los manómetros y sus rangos de operación.

3.2.3. Anemometría mediante Alambre Caliente

La técnica consiste en calentar un alambre metálico por medio de una corriente eléctrica. El alambre transfiere parte de su energía térmica al flujo que deseamos caracterizar. Una vez que el alambre está en equilibrio térmico registramos su temperatura. La cantidad de energía disipada depende la transferencia de calor convectiva entre el alambre y el fluido. La transferencia de calor es una función de la velocidad del fluido en que está inmerso el alambre. Antes de obtener la primera medición de la

velocidad debemos calibrar al anemómetro con flujos cuya velocidad es conocida. Durante el proceso de calibración debemos establecer una relación cuantitativa entre la potencia eléctrica suministrada al alambre y la velocidad del fluido.

Los alambres generalmente están fabricados de platino o tungsteno y tienen un diámetro en el rango de $0.5 \mu\text{m}$ a $5 \mu\text{m}$. La longitud del alambre varía de 0.1 mm a 2 mm . Debido a su geometría, este tipo de sensores sólo puede medir una componente vectorial de la velocidad del fluido. Si necesitamos determinar la velocidad en un espacio tridimensional, entonces debemos usar un anemómetro con tres sensores orientados en direcciones ortogonales.

3.2.4. Velocimetría de Imágenes de Partículas

Consiste en agregar partículas de igual densidad que el fluido. El tamaño aproximado de las partículas es de $10 \mu\text{m}$. La cantidad de partículas agregadas debe ser la mayor posible sin que se traslapen sus imágenes. Si iluminamos al flujo con una delgada y potente hoja de luz, entonces podemos hacer un análisis bidimensional de su velocidad. Un láser pulsado es una fuente de iluminación apropiada para esta técnica debido a que evita el calentamiento por absorción. La radiación esparcida por las partículas individuales es recolectada por un sistema óptico y enfocada en un plano imagen. A partir de cuadros consecutivos medimos los cambios de posición de las partículas y posteriormente determinamos su velocidad.¹³ La imagen 3.2 fue obtenida mediante *PIV*.

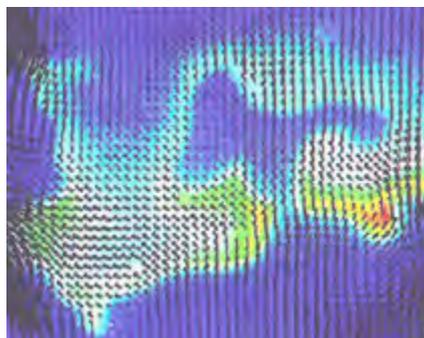


Figura 3.2. Imagen simultánea de una llama turbulenta y de la distribución de velocidad obtenida con *PIV*.¹⁴

La velocimetría de imágenes de partículas es aplicable a flujos planos en régimen estacionario. Los cambios en el índice de refracción del fluido distorsionan las imágenes y dificultan las mediciones.

3.2.5. Velocimetría por Patrones de Moteado

La velocimetría por patrones de moteado es similar a la *PIV* pero con la diferencia que las partículas agregadas al fluido son más pequeñas (en el orden de 1 μm). En esta técnica podemos agregar una cantidad de partículas considerablemente mayor que en la *PIV* porque necesitamos que las imágenes de las partículas se superpongan. La superposición de las imágenes forma un patrón de moteado. Cuando iluminamos al patrón de moteado con luz coherente generamos un patrón de franjas de interferencia.

La separación entre franjas es proporcional a la separación promedio entre las partículas. Si este patrón de franjas es sustraído de un interferograma de referencia, entonces podemos calcular la velocidad aparente del flujo.¹⁴

3.2.6. Velocimetría Láser por Efecto Doppler

La técnica consiste en la detección de la radiación láser esparcida por pequeñas partículas suspendidas en un fluido. La radiación esparcida por las partículas en movimiento tiene una frecuencia ligeramente diferente a la frecuencia de la radiación incidente. Si mezclamos la radiación emitida por el láser con la radiación esparcida por las partículas, entonces obtenemos una onda electromagnética cuya frecuencia de batido está relacionada con la velocidad del fluido.¹⁴

La velocimetría láser por efecto Doppler nos ofrece una respuesta rápida y precisa. A menudo podemos considerar a esta técnica como no-invasiva, ya que en algunas ocasiones es innecesario agregar partículas esparcidoras al fluido. La principal desventaja de esta sofisticada técnica es el carácter puntual del muestreo.

3.3. Composición Química de los Productos de la Combustión

Para optimizar un proceso de combustión necesitamos conocer la relación estequiométrica aire-combustible, los radicales formados y la composición química de los productos. Consiguientemente, varias etapas del proceso de combustión pueden requerir de un análisis químico cualitativo y cuantitativo.

Los principales compuestos químicos presentes en un proceso de combustión son: N_2 , O_2 , combustible, CO_2 y H_2O . Los componentes menores o trazas son: CO , NO_x , OH , O , H , CHO , OH_2 , OH , CHO , entre otros. La composición química de las sustancias involucradas en la combustión puede ser determinada mediante los absorbedores selectivos Orsat, la cromatografía de gases y la espectrometría de masas; además de otras técnicas.

3.3.1. Absorción Selectiva

El análisis de la composición química de un gas mediante absorbedores selectivos fue desarrollado por Orsat en la última parte del siglo XIX. La primera etapa de la técnica consiste en el filtrado de las partículas sólidas y la eliminación de las moléculas de agua que contiene el gas. En la segunda etapa determinamos la concentración de CO_2 mediante la comparación de los volúmenes de gas antes y después de hacerlo pasar a través de una solución de $NaOH$. Los hidrocarburos pueden ser removidos mediante una solución de KOH . Podemos separar el oxígeno del gas mediante una solución de NH_4Cl y $CuCl$. Finalmente el monóxido de carbono es eliminado con H_2SO_2 .

3.3.2. Cromatografía de Gases

Las técnicas cromatográficas están basadas en la segregación natural de los compuestos químicos en fases inmiscibles. En la cromatografía de gases una pequeña muestra de gas es diluida en un gas portador inerte como el helio o el argón.

Posteriormente pasamos el gas a través de un medio poroso que induce una reducción selectiva de velocidad en los diferentes compuestos químicos del gas. La disminución de la velocidad depende del tamaño y de la tendencia de cada compuesto a adherirse al material poroso. El fenómeno anterior nos permite recolectar o eliminar un compuesto químico particular. Después de la separación de los compuestos químicos del gas aplicamos un análisis químico tradicional (i.e. absorción óptica) para obtener mediciones cualitativas y cuantitativas.

3.3.3. Espectrometría de Masas

En la espectrometría de masas colocamos una muestra de gas en una cámara de vacío y la bombardeamos con un cañón de electrones. El bombardeo electrónico produce un flujo de partículas con diferentes cargas eléctricas y diferentes relaciones carga-masa. Cuando las partículas cargadas de un compuesto químico pasan a través de campos electromagnéticos son desviadas proporcionalmente a su masa, carga y concentración.

Por otra parte, algunas de las técnicas más sofisticadas para el análisis de las llamas son la espectroscopia infrarroja, la espectroscopia Raman, la espectroscopia de microondas, la fluorescencia inducida por láser, el esparcimiento Raman anti-Stokes coherente y la termometría infrarroja. A continuación describiremos algunas de ellas.

3.4. Técnicas para el Diagnóstico de Llamas

La parte de la combustión analizada con mayor frecuencia es la llama. Los dispositivos tradicionalmente usados para el análisis de las llamas son los termómetros de contacto que operan con termopares, termistores o resistencias eléctricas. Sin embargo, actualmente preferimos los dispositivos ópticos porque tienen un mejor desempeño y no perturban a la llama que deseamos caracterizar.

Las técnicas ópticas usadas en el diagnóstico de las llamas están basadas en efectos ópticos clásicos y cuánticos. Entre las técnicas ópticas clásicas está la deflectometría de Moiré,¹⁷⁻²¹ y la interferometría.³⁵⁻³⁹ Las técnicas ópticas cuánticas²²⁻²⁷ analizan el espectro de emisión de las llamas. La frecuencia de las bandas o líneas espectrales está relacionada con un compuesto químico particular. La intensidad de las bandas nos proporciona información acerca de la concentración del compuesto.

A continuación describimos las características generales de las técnicas ópticas para el diagnóstico de las llamas.

3.4.1. Técnicas Ópticas para el Diagnóstico de las Llamas

Las técnicas ópticas son comúnmente usadas para el análisis de cualquier tipo de fluidos, incluyendo los gases que constituyen a las llamas. La naturaleza no-invasiva de las técnicas ópticas es especialmente útil en el diagnóstico de la combustión debido al reducido tamaño de las llamas y a su agresividad.

Las principales ventajas de las técnicas ópticas son:

- a. No introducen perturbaciones.
- b. Podemos analizar espacios multi-dimensionales.
- c. Obtenemos resultados cualitativos inmediatos con la posibilidad de realizar análisis cuantitativos.

Las técnicas ópticas de diagnóstico tienen algunas desventajas. Una desventaja consiste en que la radiación debe pasar a través de medios con propiedades ópticas inciertas o difíciles de controlar como las ventanas, los elementos ópticos y los gases atmosféricos. Otra desventaja es que los dispositivos ópticos son delicados y costosos. Usualmente, el costo de los instrumentos ópticos de medición es compensado por su alta resolución, rápida respuesta y excelente desempeño.

Las técnicas ópticas detectan y analizan la radiación electromagnética emitida por un objeto. Los objetos sólidos y líquidos con temperatura mayor que el cero absoluto emiten radiación continua de acuerdo con la ecuación (2.28) que es ley de radiación de Planck. La emisión electromagnética de la materia condensada depende de la temperatura del objeto.

Los gases emiten y absorben sólo determinadas bandas o líneas espectrales debido a su escasa interacción molecular. El espectro de emisión de cada gas es diferente porque cada tipo de molécula tiene una frecuencia de resonancia particular.

Algunas técnicas ópticas para el diagnóstico de llamas, como la fluorescencia inducida por láser, están fundamentadas en el análisis de la emisión estimulada. La emisión estimulada debida a la excitación con luz coherente produce los siguientes efectos:

- a) *Resonancia óptica*: Si la frecuencia de la radiación de excitación coincide con la frecuencia natural de oscilación del material, entonces sus moléculas emiten isotrópicamente en la frecuencia de resonancia.
- b) *Quimio-luminiscencia*: Si la frecuencia de la fuente de excitación coincide con la frecuencia natural del sistema, entonces las moléculas pueden irradiar a una frecuencia menor en todas las direcciones. Cuando el retraso entre la excitación y la emisión es mayor que 10^{-4} s el fenómeno es conocido como *fosforescencia*. Si el retraso es menor que 10^{-4} s hablamos de *fluorescencia*.
- c) *Esparcimiento elástico (esparcimiento de Rayleigh)*: El efecto se presenta cuando excitamos al objeto con una fuente luminosa de frecuencia arbitraria. En este caso, la radiación esparcida tiene la misma frecuencia que la fuente de excitación y una polarización lineal parcial o total. El tamaño de las moléculas del objeto debe ser menor que la longitud de onda de la fuente de excitación.

d) *Esparcimiento inelástico (esparcimiento Raman)*: El efecto Raman espontáneo ocurre cuando excitamos a las moléculas de un material con una fuente luminosa intensa y monocromática. El espectro de la radiación esparcida por el objeto consiste en múltiples líneas espectrales con frecuencia menor y mayor que la frecuencia de la fuente de excitación. Estas líneas son conocidas como líneas de Stokes y anti-Stokes respectivamente. El espectro Raman de cada material es diferente. En la figura 3.3 podemos observar los diagramas de las transiciones energéticas que originan al efecto Raman espontáneo.

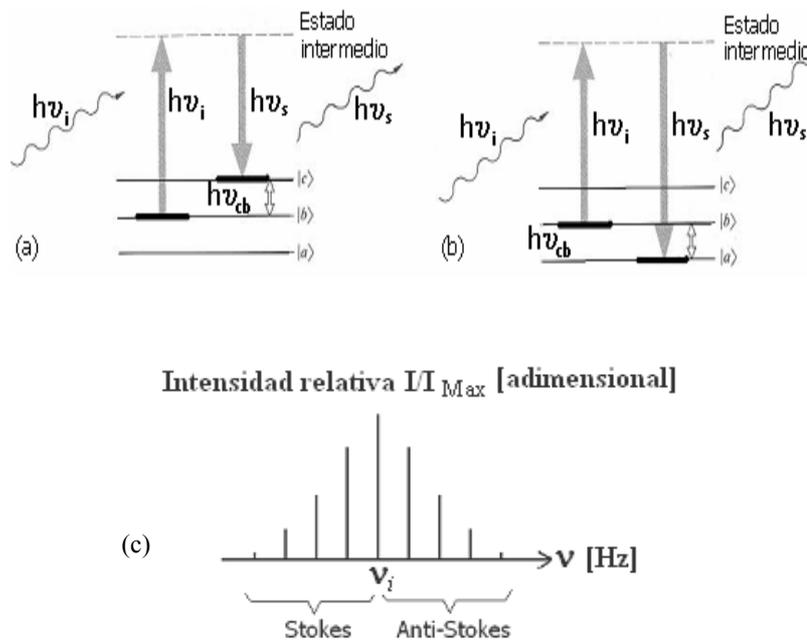


Figura 3.3. a) Transición energética de Stokes. b) Transición energética anti-Stokes. c) Líneas espectrales de Stokes y anti-Stokes.¹⁵

En el caso de los procesos de combustión es posible usar la radiación emitida por la llama para determinar las variables de interés. La radiación térmica y luminosa de las llamas nos proporciona información acerca de su temperatura, composición química, concentración y estructura geométrica. Una técnica óptica que ha sido usada exitosamente por varios grupos de investigadores para determinar la distribución de temperatura y la estructura geométrica de las llamas es la tomografía.¹⁶

3.4.1.1. Tomografía

Una tomografía es una imagen tridimensional reconstruida a partir de imágenes bidimensionales. El primer paso para obtener una tomografía de una llama consiste en el registro de imágenes bidimensionales de sus secciones transversales. Las imágenes bidimensionales son digitalizadas y procesadas con la ayuda de una computadora y un software especializado. Después del procesamiento digital obtenemos un modelo tridimensional de la llama.¹⁶

La tomografía evita la detección acumulada de todas las secciones de la llama. Esto nos permite analizar la estructura geométrica y la distribución de temperatura de la llama. En la figura 3.4 mostramos las imágenes reconstruidas de las secciones transaxiales de una llama laminar.

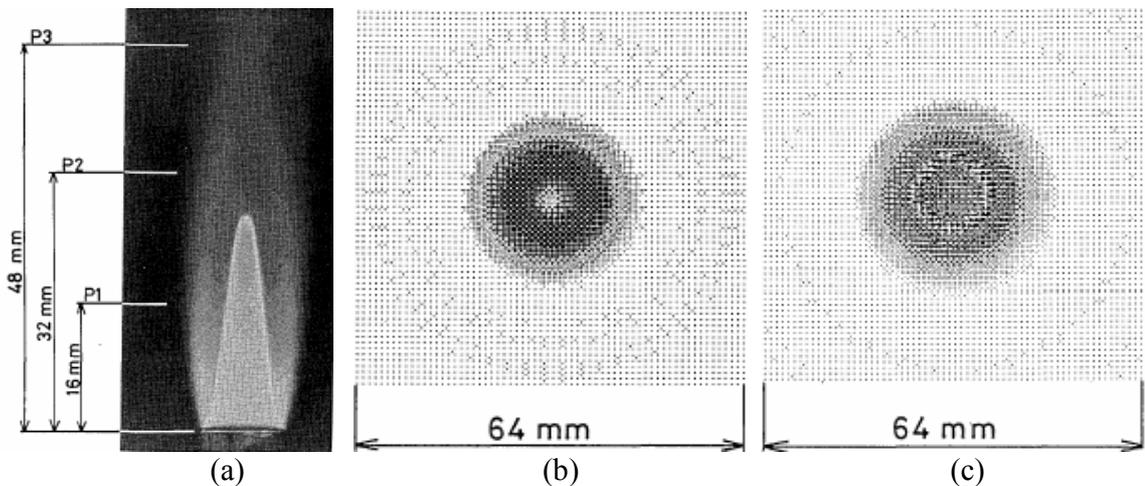


Figura 3.4. a) Fotografía convencional de una flama laminar aire- CH_4 . b) y c) Imágenes reconstruidas de la distribución de temperatura de la llama en los planos P_1 y P_2 respectivamente.¹⁶

3.4.1.2. Interferometría

Mediante la interferometría podemos determinar el índice de refracción de los objetos de fase. Un objeto de fase es cualquier líquido, gas u objeto transparente con índice de refracción diferente al índice de refracción del medio que lo rodea.³⁵⁻³⁹ El interferograma es formado por la superposición de un haz de referencia y un haz que pasa a través del objeto de fase. Tanto el haz de referencia, como el haz objeto deben tener coherencia espacial y temporal para formar franjas de interferencia. Esta condición puede satisfacerse fácilmente si dividimos un haz láser en dos haces. El índice de refracción de un fluido está directamente relacionado con su densidad. La densidad es una propiedad física del fluido que depende de su temperatura y de su composición química. A través de la interferometría también es posible determinar la temperatura del fluido y su composición química si todas las demás propiedades son conocidas.

3.4.1.3. Deflectometría de Moiré

La deflectometría de Moiré consiste en hacer pasar un haz de luz colimada a través de un objeto de fase y dos rejillas paralelas y separadas. Enseguida el haz es enfocado en un plano imagen. La superposición de las dos rejillas lineales produce un conjunto de franjas conocido como patrón de Moiré. El patrón de Moiré es distorsionado por la deflexión de los rayos que pasan a través del objeto. La sensibilidad de los deflectómetros de Moiré puede ser ajustada modificando la separación entre las rejillas o su rotación relativa.¹⁷⁻²¹

3.4.1.4. Espectroscopia Raman

El principio de funcionamiento de la espectroscopia Raman es el efecto de esparcimiento inelástico. La técnica consiste en la detección y el análisis del espectro Raman emitido por las moléculas de un medio esparcidor, que en nuestro caso es una llama laminar de difusión a chorro con premezcla de aire. Las líneas de Stokes y anti-

Stokes típicamente tienen una intensidad que es cuatro órdenes de magnitud menor que la intensidad de la fuente luminosa de excitación. La fuente de excitación generalmente es un potente láser que nos permite detectar la radiación esparcida por efecto Raman con mayor facilidad. La figura 3.5.a es un esquema de una configuración experimental usada para la detección y el análisis de una señal Raman. La figura 3.5.b es un espectro Raman.

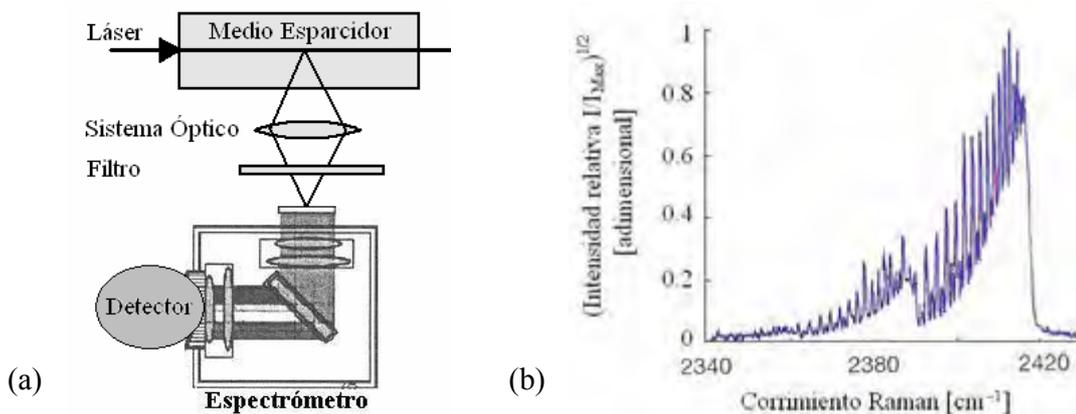


Figura 3.5. a) Esquema de una configuración experimental para detectar el esparcimiento Raman.
 b) Espectro Raman del hidrógeno.²⁶

Las frecuencias de las líneas de Stokes y anti-Stokes en el espectro Raman dependen de la composición química de los gases que constituyen a la llama. La intensidad de las líneas está relacionada con la concentración de los compuestos químicos. Si el efecto Raman es producido exclusivamente por un tipo de moléculas, entonces la intensidad relativa de las líneas espectrales está asociada con la energía roto-vibracional de las moléculas.

3.4.1.5. Esparcimiento Raman Anti-Stokes Coherente (CARS)

En esta técnica dos láseres son enfocados en la llama al mismo tiempo. Las frecuencias de los láseres deben sintonizarse de tal manera que favorezcan la emisión estimulada de un solo tipo de moléculas. En la figura 3.6 presentamos el diagrama de transiciones energéticas, la geometría de excitación-detección y un arreglo para CARS.

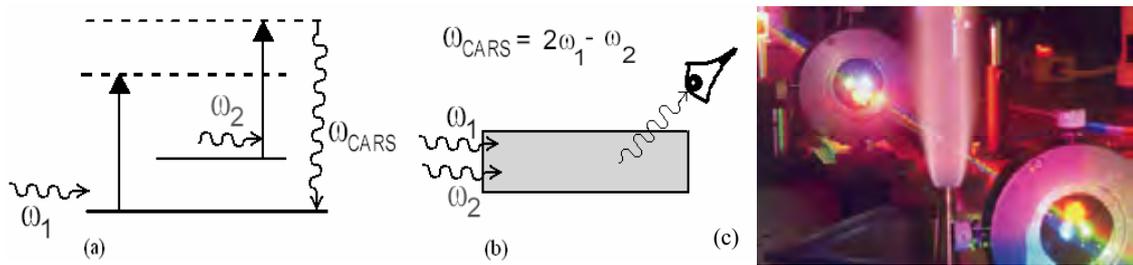


Figura 3.6. a) Diagrama de las transiciones energéticas que originan al esparcimiento Raman anti-Stokes coherente. b) Geometría de excitación y detección. c) Arreglo para la detección de CARS.²⁶

Con esta técnica varios grupos de investigadores han determinado con precisión la distribución de temperatura dentro de las cámaras de combustión de las turbinas.

3.4.1.6. Fluorescencia Inducida por Láser

Para producir el fenómeno de fluorescencia inducida por láser (*LIF*: Laser Induced Fluorescence) necesitamos enfocar un láser, con longitud de onda apropiada, sobre la llama. El láser excita los niveles energéticos de cierto tipo de moléculas. En las llamas, usualmente excitamos a los radicales *OH* o algunos hidrocarburos aromáticos poli-cíclicos.²⁷⁻³² Posteriormente, las moléculas excitadas se relajan a estados electrónicos menores emitiendo radiación fluorescente, la cual es propia de cada material. En la figura 3.7 mostramos las transiciones energéticas que producen fluorescencia inducida, la geometría de excitación-detección y una imagen de la fluorescencia de los radicales *OH*.

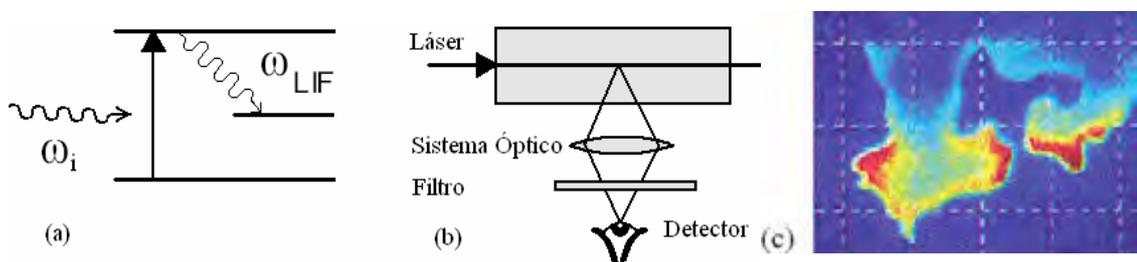


Figura 3.7. a) Esquema de las transiciones energéticas que ocurren durante la *LIF*. b) Disposición de los componentes ópticos básicos para la excitación y la detección de la fluorescencia inducida por láser. c) Imagen de la fluorescencia inducida en los radicales *OH* de las llamas.²⁷

La fluorescencia inducida fue aplicada en motores de combustión interna para determinar la distribución de temperatura dentro de sus cámaras de combustión.²⁹ Si añadimos moléculas trazadoras a un fluido es posible determinar su distribución espacial y su concentración.^{30,31}

3.4.1.7. Incandescencia Inducida por Láser

La incandescencia inducida nos permite estudiar detalladamente la formación del hollín. Normalmente la radiación visible emitida por las llamas formadoras de hollín proviene de todas las regiones de la llama. La figura 3.8.a es una fotografía de una llama formadora de hollín. La incandescencia natural sólo nos proporciona una descripción general de un fenómeno tridimensional que actualmente es poco entendido.

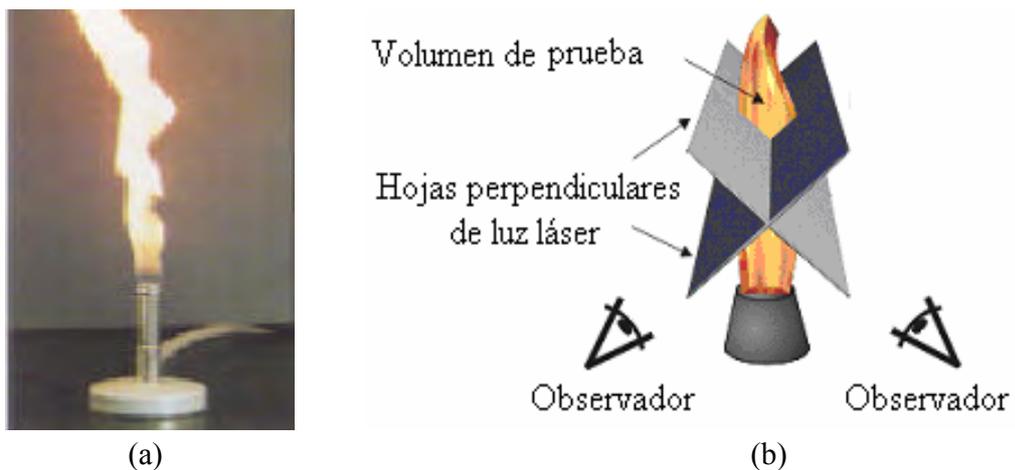


Figura 3.8. a) Llama formadora de hollín. b) Excitación para generar incandescencia inducida por láser en una llama.

Para obtener incandescencia inducida, debemos formar una línea u hoja de luz con un potente láser como en la figura 3.8.b. Después dirigimos la hoja de luz hacia la llama. Las partículas de hollín que atraviesan la hoja de luz emiten más intensamente que las que emiten de manera natural por su temperatura. Este fenómeno nos permite analizar la distribución, concentración y formación del hollín en una zona específica de la llama.

En las llamas, la principal variable que deseamos controlar es la temperatura. Lo anterior se debe a que muchos procesos industriales, comerciales y domésticos requieren de un estricto control de la temperatura. Las técnicas cuyo objetivo es la medición de la temperatura de un objeto son conocidas como técnicas termométricas.

3.4.2. Termometría de Llamas

En los procesos de combustión, la termometría es usada para determinar la temperatura de los gases, conductos y cámaras de combustión. Los gases a alta temperatura son difíciles de analizar. Un inconveniente que presentan los gases calientes es la baja transferencia térmica entre el gas y el instrumento de medición. En regiones pequeñas, a alta temperatura, fluctuantes y en reacción química, como el interior de las llamas, existen problemas con los tiempos de respuesta, las vibraciones y los puntos de fusión de los elementos termosensibles.

Las técnicas termométricas pueden dividirse en dos categorías: termometría por contacto y termometría sin-contacto o pirometría. En las secciones siguientes describiremos ambas categorías.

3.4.2.1. Termometría por Contacto

Este tipo de termómetro debe ponerse en contacto directo con la llama que vamos a analizar. Inicialmente, la diferencia de temperatura entre el instrumento de medición y la llama produce una transferencia de calor. Después de un breve periodo de tiempo la temperatura de la llama y la temperatura del sensor son iguales, es decir, se establece un equilibrio térmico. Finalmente, los termómetros de contacto miden su propia temperatura.

Algunos de los dispositivos de contacto con los que podemos medir la temperatura de las llamas son los resistores, los termistores, los termómetros de mercurio y los termopares.

Los *resistores* usados en aplicaciones de termometría son resistencias eléctricas de platino con un tamaño comparable con el tamaño de las llamas. Los resistores alteran considerablemente la estructura geométrica de la llama.

Los *termistores* son dispositivos cuyas propiedades eléctricas son modificadas por los cambios de temperatura. Los termistores son apropiados para las aplicaciones con poca variación térmica. Los termistores tienen bajos puntos de fusión. Por lo tanto, los termistores no son apropiados para la medición de la temperatura de las llamas.

Los *termómetros de mercurio* tienen poca precisión, tiempos de respuesta grandes y rangos de operación cortos. El uso de los termómetros es recomendable para monitorear los procesos con cambios térmicos lentos y que no requieren de un estricto control de la temperatura. En consecuencia, los termómetros de mercurio tampoco son recomendables para el diagnóstico de llamas.

Los *termopares* operan con base en el efecto termoeléctrico o efecto Seebeck descubierto en 1821 por T. J. Seebeck. Un termopar consiste en dos alambres de metales o aleaciones diferentes conectados en ambos extremos. Una diferencia de potencial aparece en las uniones cuando existe una diferencia de temperatura entre ellas. El voltaje generado por un termopar usualmente es de algunos milivolts. La figura 3.9 es un esquema de un termopar convencional.

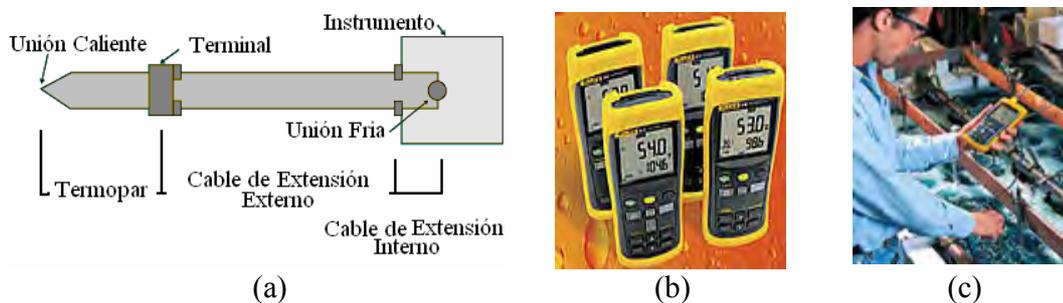


Figura 3.9. a) Esquema de un termopar. b) Termómetros Fluke con termopila. c) Medición de la temperatura de un fluido.

La medición de la temperatura no es afectada por los cables de extensión si estos tienen las mismas propiedades termoeléctricas que las uniones bi-metálicas. La potencia eléctrica generada por un termopar puede ser incrementada mediante una termopila que consiste en un conjunto de termopares conectados en serie.

Los termopares comerciales tienen un tiempo de respuesta aproximado de 20 ms, una alta resolución espacial y miden temperaturas de $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $2760\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una precisión del 2% de la escala total de medición.

Los termopares de contacto tienen la desventaja de perturbar a la llama bajo análisis. Además no proporcionan información acerca de la distribución de la temperatura de flujos con rápidas fluctuaciones. En los últimos años fueron diseñados termopares sin contacto que constan de un sistema óptico y un detector.

Las mediciones de los termómetros de contacto son correctas sólo si hay equilibrio térmico entre el objeto y el instrumento de medición. La baja conductividad térmica de los gases de las llamas y la pérdida de calor a través de los soportes del termómetro pueden impedir que el sistema alcance el equilibrio térmico. En algunos casos sólo alcanzamos un estado estacionario.

3.4.2.2. Pirometría

Los termómetros sin-contacto también son conocidos como termómetros de radiación infrarroja o pirómetros. Estos dispositivos capturan y miden la radiación infrarroja emitida por un objeto para determinar su temperatura superficial.

La radiación infrarroja es la energía radiante con longitud de onda entre $0.7\text{ }\mu\text{m}$ y $1000\text{ }\mu\text{m}$. En la termometría infrarroja sólo son analizadas las bandas espectrales que están entre $0.7\text{ }\mu\text{m}$ y $20\text{ }\mu\text{m}$. La figura 2.7 muestra la clasificación de las ondas electromagnéticas.

Los termómetros de radiación consisten en un sistema óptico y un detector. El sistema óptico recolecta una fracción de la radiación emitida por el objeto y la enfoca sobre el detector. El detector transforma la radiación incidente en una señal eléctrica que es proporcional a la energía detectada y a la responsividad espectral del detector. La figura 3.10 es un diagrama de bloques de un pirómetro que incluye un sistema óptico, un detector, un control de emisividad y un circuito compensador de temperatura.

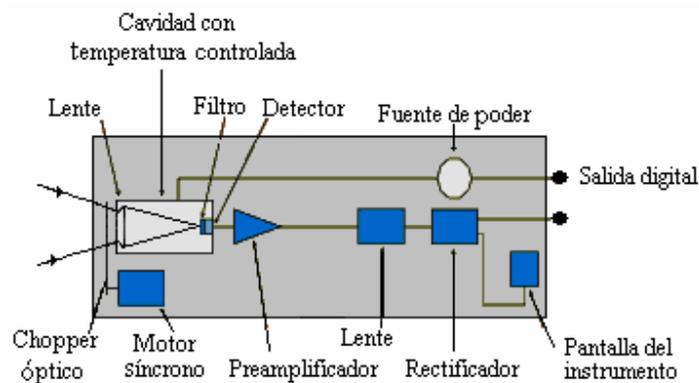


Figura 3.10. Diagrama de bloques de un pirómetro.

El tiempo de respuesta de los pirómetros es de 1 ms o menor. Además son durables y pueden analizar objetos que:

- Tienen movimientos de traslación, rotación o vibración.
- Están dentro de campos electromagnéticos intensos.
- Sufren cambios térmicos en periodos de algunos milisegundos.
- Están dentro de cámaras herméticas.
- Requieren de mediciones superficiales de la temperatura.
- Están a temperaturas mayores que 1400 °C.
- Son dañados o contaminados al contacto con otros objetos.
- Pueden cambiar de temperatura y forma al contacto con otros objetos.
- Tienen baja conductividad térmica.
- Son transparentes o gaseosos como las llamas.
- Requieren de un estricto control de la temperatura.

Los termómetros de contacto no miden correctamente la temperatura superficial de los objetos con una o varias de las características anteriores. Para facilitar la descripción del funcionamiento de los pirómetros hicimos la siguiente clasificación:

- Pirómetros de banda ancha.
- Pirómetros de banda estrecha.
- Pirómetros de doble longitud de onda.
- Pirómetros multiespectrales.
- Pirómetros ópticos.

3.4.2.2.1. Pirómetros de Banda Ancha

Los pirómetros de banda ancha son los termómetros sin contacto más simples y económicos. Estos instrumentos de medición tienen una respuesta espectral que va desde los 0.7 μm hasta los 20 μm . La longitud de onda de corte depende del sistema óptico del pirómetro.

Los pirómetros de banda ancha recolectan y analizan una porción de la radiación que emite un objeto en una banda espectral que usualmente abarca varios micrómetros. La medición de temperatura depende de la emisividad del objeto. Un control de emisividad nos permite compensar los errores de medición relacionados con este parámetro. Los dispositivos de banda ancha sólo son aplicables a cuerpos con emisividad constante. La trayectoria entre el pirómetro y el objeto debe estar libre de obstrucciones, de lo contrario la medición de temperatura será incorrecta. Las sustancias como el vapor de agua, el polvo, el humo y los gases atmosféricos atenúan la radiación emitida por el objeto y provocan una medición de temperatura menor que la temperatura real.

Los rangos dinámicos de los pirómetros de banda ancha comerciales son: 0 °C a 1000 °C y de 500 °C a 900 °C. La precisión varía del 0.5% al 1% de la escala total.

3.4.2.2.2. Pirómetros de Banda Estrecha

Los pirómetros de banda estrecha detectan la energía térmica emitida por un cuerpo en un pequeño rango de longitudes de onda. Los pirómetros de banda estrecha generalmente limitan su respuesta espectral a un intervalo de longitudes de onda menor que $1\ \mu\text{m}$. El tipo de detector y los filtros empleados determinan la respuesta espectral del dispositivo de medición. La selección del detector y de los filtros espectrales depende de las características físicas y químicas del objeto que vamos a analizar.

Los filtros espectrales restringen la sensibilidad del pirómetro a una línea o banda particular. El filtraje espectral de la radiación proveniente del objeto nos permite obtener mediciones más precisas. Por ejemplo, la selección de la banda espectral de $8\ \mu\text{m}$ a $14\ \mu\text{m}$ evita la absorción de la humedad atmosférica. La longitud de onda de $7.9\ \mu\text{m}$ es usada para medir la temperatura de algunas películas delgadas de plástico. La longitud de onda de $3.86\ \mu\text{m}$ evita la absorción óptica del CO_2 y del vapor de agua de las llamas.

La selección de la longitud de onda para el filtro también depende del rango de temperaturas que pretendemos medir. De acuerdo con la *ley de desplazamiento de Wien*, si la temperatura de un cuerpo aumenta, entonces la longitud de onda de emisión pico disminuye. Así pues, los pirómetros de banda estrecha que operan en el infrarrojo cercano son usados para medir temperaturas mayores que $500\ ^\circ\text{C}$. La radiación infrarroja lejano es usada para medir temperaturas inferiores a $500\ ^\circ\text{C}$. Los pirómetros de banda estrecha comerciales varían de dispositivos de mano a unidades portátiles con visión simultánea del objeto y de la distribución de temperatura. También están disponibles varios modelos con capacidad de impresión, memoria y control *PDI* (proporcional, derivativo e integral).

Los rangos de medición de los pirómetros de banda estrecha comerciales son los siguientes: $-38\ ^\circ\text{C}$ a $600\ ^\circ\text{C}$, $0\ ^\circ\text{C}$ a $1000\ ^\circ\text{C}$, $500\ ^\circ\text{C}$ a $2000\ ^\circ\text{C}$ y $600\ ^\circ\text{C}$ a $3000\ ^\circ\text{C}$. La precisión varía del 0.25% al 2% de la escala total de medición.

La pirometría de banda estrecha es una técnica usada en innumerables aplicaciones industriales en que el control de la temperatura es vital para la fabricación de productos de alta calidad. La pirometría de doble longitud de onda es una excelente alternativa para las aplicaciones en que el objeto sufre cambios físicos y químicos o para los procesos que requieren de un absoluto control de la temperatura.

3.4.2.2.3. Pirómetros de Doble Longitud de Onda

Los pirómetros de doble longitud de onda miden la energía emitida por un objeto en dos líneas espectrales o longitudes de onda. Posteriormente calculamos el cociente de las energías medidas, el cual es una función de la temperatura superficial del objeto. Si la emisividad es igual en las dos longitudes de onda seleccionadas, entonces la temperatura del objeto puede ser leída directamente del instrumento de medición. En este caso no es necesario conocer el valor de la emisividad del objeto. La temperatura depende solamente del cociente de las energías medidas y no de sus valores absolutos. El cociente de las radiancias de las dos longitudes de onda cambia con la temperatura. Este fenómeno está ilustrado en la figura 3.11. Las curvas de radiancia espectral están graficadas para 500 K, 600 K, 800 K, 1000 K y 1200 K.

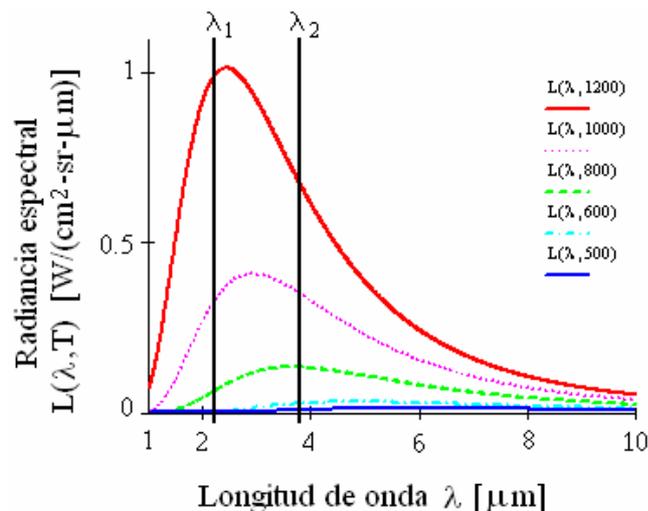


Figura 3.11. Dependencia del cociente de radiancias con la temperatura del objeto.

La figura 3.12 es un esquema de un pirómetro de doble longitud de onda.

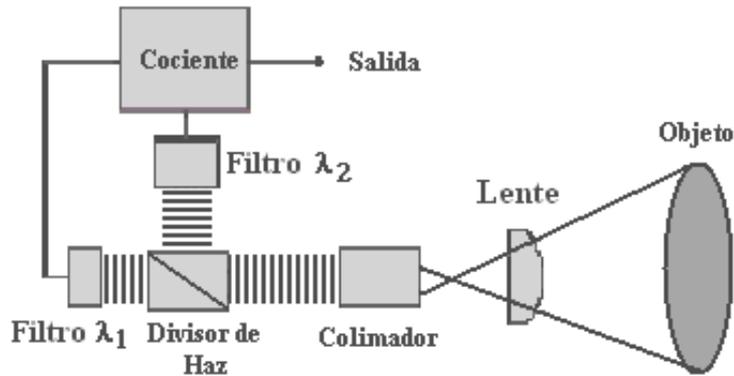


Figura 3.12. Esquema de un pirómetro de doble longitud de onda.

Los pirómetros de doble longitud de onda funcionan correctamente incluso cuando el campo de visión está parcialmente obstruido por materiales relativamente fríos como el polvo, la niebla y el smog. Estos instrumentos de medición también son insensibles a la variación del tamaño del objeto, aún cuando el objeto es más pequeño que el campo de visión. Los parámetros anteriores no afectan a la medición de la temperatura porque atenúan la energía radiante de todas las longitudes de onda en la misma proporción. Esto hace que los pirómetros de doble longitud de onda sean más precisos y menos susceptibles a errores de medición en comparación con los pirómetros de banda estrecha.

Los pirómetros de doble longitud de onda también reducen los errores de medición relacionados con la variación de la emisividad y las condiciones superficiales del objeto. Una desventaja de los pirómetros de doble longitud de onda es que tienden a medir la temperatura de la escena cuando ésta es más caliente que el objeto.

Los pirómetros de doble longitud de onda cubren un rango amplio de temperaturas que va desde los 50 °C hasta los 3700 °C. La precisión de estos instrumentos varía del 0.25% al 2% de la escala total de medición.

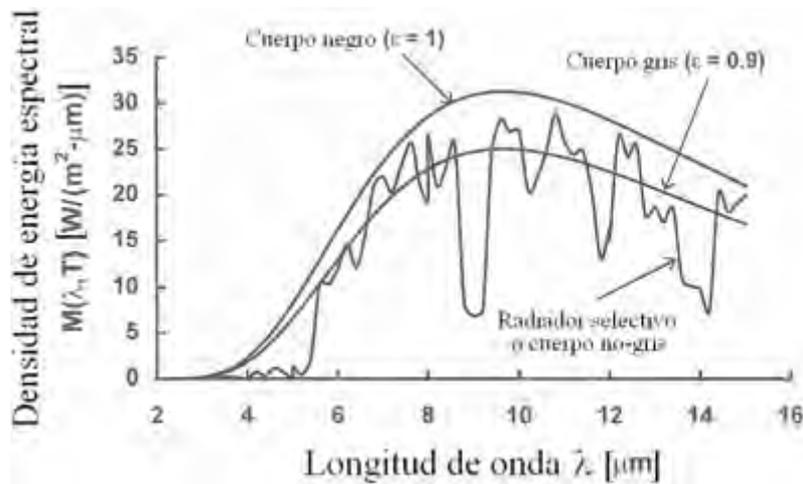


Figura 3.13. Distribución de la energía emitida por diferentes tipos de objetos.⁴⁰

La termometría de doble longitud de onda usualmente es aplicada a objetos con emisividad constante respecto a la longitud de onda, es decir, a cuerpos grises. La figura 3.13 muestra la distribución de energía emitida por los cuerpos negros, grises y no-grises. Para medir la temperatura de materiales con emisividad dependiente de la longitud de onda (radiador selectivo) podemos recurrir a los pirómetros multispectrales.

3.4.2.2.4. Pirómetros Multispectrales

Los pirómetros multispectrales miden la energía emitida por un radiador selectivo en tantas longitudes de onda como sea posible. Con estos dispositivos podemos analizar detalladamente las propiedades superficiales de un objeto a pesar de la variación de su emisividad. La temperatura y la composición química son algunas de las propiedades que podemos estudiar.

La figura 3.14 es un esquema de un pirómetro multispectral que mide simultáneamente la radiación incidente en cuatro longitudes de onda diferentes. El sistema de detección incluye un divisor de haz y filtros que restringen el ancho espectral de la radiación que incide sobre los sensores. Mediante algoritmos computacionales analizamos la señal de los sensores y compensamos la variación de la emisividad.

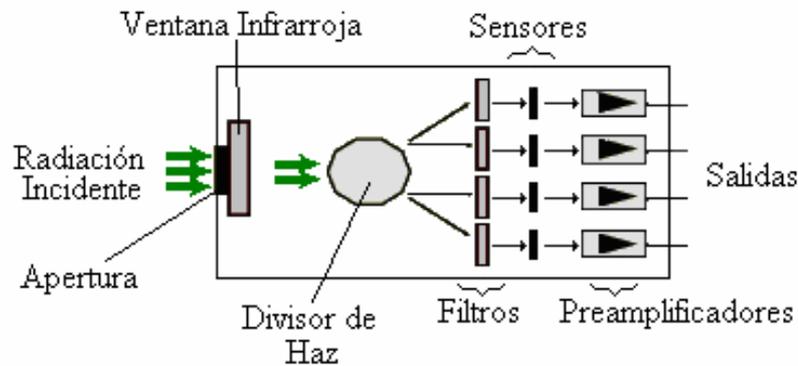


Figura 3.14. Esquema de un pirómetro multispectral.

Este pirómetro no requiere de un sistema de enfriamiento. El pirómetro fue diseñado para el análisis de gases.

Otro arreglo experimental que mide en siete longitudes de onda diferentes demostró tener una resolución de ± 1 °C en el rango de 600 °C a 900 °C. El mismo dispositivo tuvo una resolución de ± 4 °C durante la medición de la temperatura de un objeto con emisividad variable en el rango de 500 °C a 950 °C.

3.4.2.2.5. Pirómetros Ópticos

Los pirómetros ópticos capturan y cuantifican una fracción de la energía térmica emitida por un objeto en una banda espectral estrecha. Estos pirómetros determinan la temperatura superficial de un objeto mediante la ecuación (2.28) que es la ley de radiación de Planck.

Los primeros pirómetros ópticos operaban en el rango visible del espectro electromagnético alrededor de los 0.65 μm . Actualmente existen pirómetros ópticos que miden la energía contenida en las longitudes de onda infrarrojas. Comercialmente podemos encontrar pirómetros ópticos manuales y automáticos.

3.4.2.2.5.1. Pirómetros Ópticos Manuales

Los pirómetros ópticos manuales aprovechan el fenómeno de la desaparición del filamento de una lámpara al compararlo visualmente con la imagen de un objeto caliente. El filamento desaparece cuando su radiancia es igual a la radiancia del objeto. La igualación de las radiancias puede realizarse variando la corriente eléctrica que pasa por el filamento o modificando la radiancia de la imagen del objeto mediante filtros ópticos absorbentes.

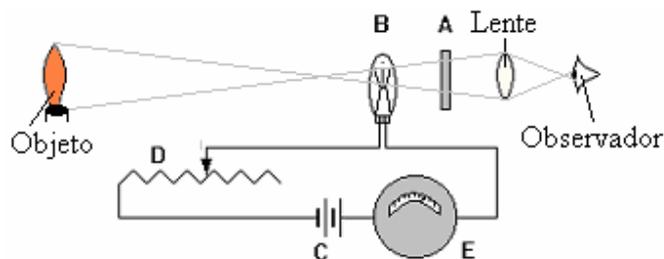


Figura 3.15. Esquema de un pirómetro óptico de operación manual.⁴⁰

El pirómetro óptico de la figura 3.15 está dirigido hacia el objeto caliente. Un observador que mira a través de la lente y del filtro espectral *A* ve oscuro al filamento de la lámpara *B* en un fondo brillante formado por la imagen del objeto. La lámpara está conectada a la fuente de poder *C*. Si disminuimos la resistencia eléctrica del reóstato *D*, entonces incrementamos la corriente que pasa a través del filamento y por consecuencia su radiancia. Con este procedimiento igualamos la radiancia del filamento con la radiancia del objeto. Para obtener directamente la temperatura del objeto debemos calibrar la escala del amperímetro *E* con objetos de temperatura conocida.

3.4.2.2.5.2. Pirómetros Ópticos Automáticos

Los pirómetros ópticos automáticos contienen un detector de radiación eléctrico en lugar del ojo humano. Este tipo de pirómetro compara la radiación proveniente del objeto con la radiación emitida por una fuente luminosa de referencia. La comparación es

realizada mediante un chopper óptico que modula tanto la radiación proveniente del objeto, como la radiación de la lámpara de referencia. Ambas señales están desfasadas e inciden sobre un tubo fotomultiplicador que las amplifica. La salida del fotomultiplicador es usada para ajustar la corriente de la lámpara de referencia hasta que ambas radiancias son iguales. La corriente que energiza a la lámpara es una función de la temperatura del objeto. La figura 3.16 es un esquema de un pirómetro óptico de funcionamiento automático.

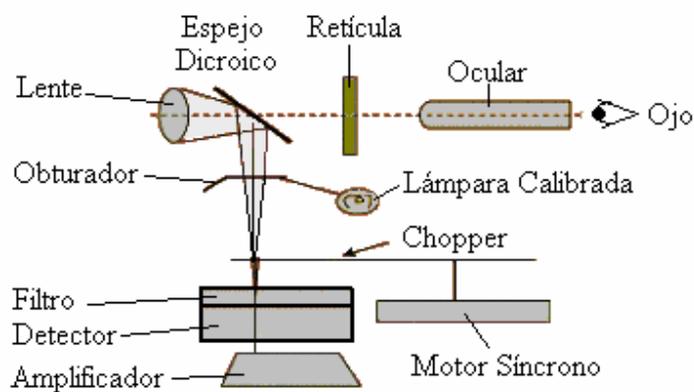


Figura 3.16. Esquema de un pirómetro óptico automático.⁴⁰

Los pirómetros ópticos son capaces de medir temperaturas en el rango de 600 °C a 5538 °C con una precisión que varía entre el 1% y el 2% de la escala total de medición.

3.4.2.2.6. Consideraciones Generales de la Pirometría

Para la correcta medición de la temperatura sin contacto debemos usar un instrumento óptico que opere en una banda espectral en la que el objeto aparezca opaco, es decir, la transmitancia del objeto debe ser igual a cero. Si el objeto es reflejante, la radiación medida será la suma de la radiación emitida por el objeto más la radiación reflejada. La radiación reflejada genera errores de medición y por lo tanto debemos eliminarla o minimizarla. El costo de los pirómetros generalmente es mayor que el costo de los termómetros de contacto, aunque en algunos casos el precio es comparable.

3.5. Conclusiones

En el presente capítulo describimos las técnicas experimentales y los dispositivos con los que podemos caracterizar un proceso de combustión. La información proporcionada por los dispositivos de medición nos permite evaluar el desempeño de la combustión. Con algunas de las técnicas presentadas podemos determinar las propiedades físicas de los gases que constituyen a las llamas. También hicimos una descripción general de las técnicas usadas para el análisis de la composición química y la concentración de los diferentes gases de las llamas. Técnicas ópticas como la tomografía, la espectroscopia Raman, la fluorescencia inducida por láser y la termometría infrarroja son herramientas valiosas para determinar la estructura geométrica y la temperatura de las llamas. La selección de la técnica de diagnóstico depende de la aplicación y de la información que necesitamos obtener.

Las técnicas ópticas ofrecen las mejores ventajas para el diagnóstico de llamas. Las ventajas más importantes son su rápido tiempo de respuesta (1 ms o menor), su precisión y su capacidad de analizar objetos distantes o de difícil acceso. La naturaleza no-invasiva de las técnicas ópticas evita la perturbación de la llama. Esta última ventaja es un requisito indispensable para la medición de la longitud de la llama y la determinación de su forma geométrica.

La mejor alternativa para medir la temperatura de las llamas es la pirometría o termometría óptica. La termometría óptica requiere de arreglos experimentales sencillos que están constituidos por componentes altamente disponibles. Otra característica destacable de la termometría óptica es su amplio rango de medición que van desde los $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta temperaturas mayores que $5500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Actualmente los pirómetros de doble longitud de onda y multiespectrales poseen la mayor precisión disponible. Su precisión varía del 0.25% al 2% de la escala total.

Los pirómetros de doble longitud de onda son menos susceptibles a los errores de medición relacionados con la variación de la emisividad, en comparación con los pirómetros de banda estrecha. Además indican la temperatura correcta del objeto aún cuando el campo de visión está parcialmente obstruido. También son insensibles a la variación del tamaño del objeto. Por lo tanto, la termometría de doble longitud de onda es la mejor alternativa para la medición de la temperatura de las llamas.

En los siguientes capítulos mediremos la temperatura y la estructura geométrica de varias llamas. La temperatura y la estructura geométrica son dos de los parámetros más importantes de las llamas debido a que nos proporcionan información acerca de la eficiencia global del proceso de combustión.

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DE LLAMAS MEDIANTE TERMOMETRÍA DE DOBLE LONGITUD DE ONDA

4.1. Introducción

En el capítulo III describimos las características de las técnicas ópticas y de los dispositivos que han sido aplicados en el diagnóstico de las llamas. También discutimos sus ventajas, desventajas y rangos de operación. Después de un cuidadoso proceso de selección decidimos usar la termometría de doble longitud de onda y la interferometría de desplazamiento lateral para desarrollar nuevas metodologías de medición. En el proceso de selección consideramos factores como la precisión, la insensibilidad a los cambios ambientales y al tamaño del objeto, así como la magnitud de los errores de medición relacionados con la incertidumbre en la emisividad. Con las nuevas metodologías de medición podemos determinar la distribución de temperatura y la longitud de las llamas axi-simétricas. En los capítulos IV y V presentamos los fundamentos de las técnicas ópticas que usamos en la caracterización de las llamas. También describimos la metodología de nuestras mediciones y los resultados que obtuvimos.

En la termometría de doble longitud de onda medimos la radiancia emitida por un cuerpo en dos longitudes de onda diferentes. El cociente de las radiancias es una función de la temperatura del objeto. Si la emisividad de la llama es igual en las dos longitudes de onda, entonces podemos calcular la temperatura del cuerpo sin conocer el valor absoluto de la emisividad. A continuación presentamos los fundamentos de la termometría de doble longitud de onda.

4.2. Fundamentos de la Termometría de Doble Longitud de Onda

La radiancia espectral L_λ está definida como la potencia radiada por un objeto a temperatura T por unidad de área proyectada, por unidad de ángulo sólido y por unidad espectral.¹⁵ La radiancia espectral es calculada a través de la *ley de Planck* (ec. 2.28). Si consideramos la emisividad espectral ε_λ del objeto, entonces podemos re-escribir la ecuación 2.28 de la siguiente manera:

$$L_\lambda = \varepsilon_\lambda \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \right). \quad [\text{W}/(\text{cm}^2 \text{ sr } \mu\text{m})] \quad (4.1)$$

Donde,

ε_λ : Emisividad del objeto en la longitud de onda λ [adimensional]

h : Constante de Planck [J s]

k : Constante de Boltzmann [J/K]

c : Velocidad de la luz en el vacío [m/s]

Si conocemos la radiancia espectral del objeto en dos longitudes de onda diferentes, entonces podemos calcular su cociente. El cociente de las radiancias $R(T)$ es una función de la temperatura (ver la figura 3.11) y se calcula de la siguiente manera:

$$R(T) = \frac{L_{\lambda_1}}{L_{\lambda_2}} = \frac{\varepsilon_{\lambda_1} \frac{2hc^2}{\lambda_1^5} \left(\frac{1}{e^{\frac{c_1}{\lambda_1 T}} - 1} \right)}{\varepsilon_{\lambda_2} \frac{2hc^2}{\lambda_2^5} \left(\frac{1}{e^{\frac{c_1}{\lambda_2 T}} - 1} \right)}. \quad [\text{adimensional}] \quad (4.2)$$

La constante c_1 está determinada por la ecuación (4.3).

$$c_1 = \frac{hc}{k} = 14.39 \times 10^{-3} \quad [\text{m K}] \quad (4.3)$$

Simplificando la ecuación (4.2) obtenemos la ecuación (4.4).

$$R(T) = \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \left(\frac{e^{\frac{c_1}{\lambda_2 T}} - 1}{e^{\frac{c_1}{\lambda_1 T}} - 1} \right) \quad [\text{adimensional}] \quad (4.4)$$

La temperatura adiabática de las llamas que analizamos es $T_{max} = 2268$ K. Las longitudes de onda en que medimos son $\lambda_1 = 470$ nm y $\lambda_2 = 515$ nm. Considerando estos valores críticos encontramos que la magnitud de la función exponencial de la ecuación (4.4) es al menos seis órdenes de magnitud mayor que 1. Por lo tanto podemos realizar la aproximación de la ecuación (4.5).

$$e^{\frac{c_1}{\lambda T}} - 1 \approx e^{\frac{c_1}{\lambda T}} \quad [\text{adimensional}] \quad (4.5)$$

Esta aproximación nos permite re-escribir la ecuación (4.4).

$$R(T) \approx \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 e^{-\frac{c_1}{T} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \quad [\text{adimensional}] \quad (4.6)$$

Ahora despejamos la variable de temperatura T de la ecuación anterior y obtenemos la ecuación (4.7).

$$T(R) \approx \frac{c_1 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \left[\frac{\varepsilon_{\lambda_2} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5}{\varepsilon_{\lambda_1} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5} R \right]} \quad [\text{K}] \quad (4.7)$$

Si $\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2}$, entonces podemos re-escribir la ecuación (4.7) de la siguiente forma:

$$T(R) \approx \frac{c_1 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \left[\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 R \right]} \quad [\text{K}] \quad (4.8)$$

La ecuación (4.8) nos permite determinar la temperatura de un cuerpo que tiene la misma emisividad en dos longitudes de onda diferentes. Para determinar la temperatura del objeto sólo necesitamos conocer el cociente de radiancias. La radiancia espectral es proporcional a la intensidad espectral. Así pues, podemos calcular a la variable R como el cociente de las intensidades en las longitudes de onda con igual emisividad. En la siguiente sección establecemos las condiciones que necesitamos satisfacer para aplicar la termometría de doble longitud de onda en la caracterización de las llamas.

4.3. Condiciones para el Uso de la Termometría de Doble Longitud de Onda

Para determinar la distribución de temperatura de una llama aplicamos la termometría de doble longitud de onda. Las ecuaciones usadas en esta técnica fueron derivadas de la *ley radiación de Planck*, la cual es un modelo de radiación para cuerpos con emisividad constante. En términos generales, el modelo de radiación de Planck no describe de manera precisa a la radiación electromagnética emitida por las llamas debido a que su emisividad varía con la longitud de onda.

Las llamas producidas por los quemadores Bunsen están constituidas por gases calientes a presión atmosférica. Estos gases se comportan como radiadores selectivos (ver figura 3.13) debido a su escasa interacción molecular. Sin embargo, bajo ciertas condiciones podemos emplear la *ley de Planck* para describir a la radiación emitida por las llamas. Las condiciones necesarias son las siguientes:

- a) Las dos líneas espectrales analizadas deben tener la misma emisividad. Sin importar su valor absoluto.
- b) Las longitudes de onda analizadas deben ser menores que $1 \mu\text{m}$.
- c) Exploración cuasi-puntual.

Podemos satisfacer la condición del inciso (a) analizando la radiación máxima de dos bandas espectrales cercanas entre sí. La proximidad espectral de las bandas nos hace suponer que hay poca variación en su emisividad. Posteriormente verificaremos esta suposición. La condición (b) proviene de la deducción analítica de la ecuación (4.8). Si por alguna razón analizamos picos de emisión con longitud de onda mayor que $1 \mu\text{m}$, entonces la ecuación (4.8) pierde validez. Sin embargo, con la ayuda de un algoritmo computacional podemos resolver la ecuación (4.4) y determinar la temperatura del objeto. El objetivo de condición (c) es facilitar la determinación de la distribución de temperatura y la longitud de una llama. Recordemos que las llamas son objetos con grandes gradientes de temperatura. Mediante la exploración cuasi-puntual podemos medir la temperatura promedio de pequeños volúmenes (0.01 mm^3) dentro de la llama. Midiendo la temperatura de muchos volúmenes pequeños podemos reconstruir la distribución de temperatura de la llama con gran precisión. La resolución de la distribución de temperatura es inversamente proporcional al tamaño de los volúmenes analizados.

En la siguiente sección calculamos las longitudes teóricas de las llamas que analizamos en nuestros experimentos.

4.4. Longitudes de Llama Teóricas

Los resultados de los experimentos dependen las condiciones con las que se llevó a cabo la combustión en nuestras las llamas. Los parámetros que determinan la longitud de nuestras llamas son la forma de la boquilla del quemador, el flujo de combustible, la cantidad de aire primario, la temperatura inicial del combustible y la temperatura del ambiente.

La boquilla del quemador es circular y tiene un diámetro de 12.7 mm. El flujo de gas *LP* fue determinado mediante una medición indirecta. La medición del flujo de gas *LP* consistió en pesar el tanque de combustible antes y después del experimento. La diferencia entre el peso inicial y el peso final es igual a la cantidad de combustible quemado (W_{LP}). El peso del combustible quemado fue $W_{LP} = 0.075$ Kg. También medimos el tiempo que duró la combustión. El tiempo requerido para quemar 75 gramos de combustible fue $t_{combustión} = 3$ horas. La densidad del gas *LP* en condiciones ambientales es $\rho_{LP} = 1.787$ Kg/m³. Las condiciones ambientales fueron las siguientes: Presión $P = 1$ atm y temperatura ambiente $T_0 = 27$ °C. Antes de la combustión el gas *LP* se encontraba a temperatura ambiente, por lo tanto podemos decir que $T_0 = T_{LP} = 27$ °C y que $T_0/T_{LP} = 1$. El flujo de combustible fue calculado mediante la ecuación (4.9).

$$Q_{LP} = \left(\frac{W_{LP}}{t_{combustión}} \right) \left(\frac{1}{\rho_{LP}} \right) \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (4.9)$$

Sustituyendo los valores correspondientes calculamos el flujo de gas *LP*.

$$Q_{LP} = \left(\frac{0.075 \text{ Kg}}{3 \times 3600 \text{ s}} \right) \left(\frac{1}{1.787 \text{ Kg/m}^3} \right) = 3.89 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

La relación estequiométrica molar del gas *LP* se calcula con la ecuación (4.10).

$$S_{LP} = 0.6S_{C_3H_8} + 0.4S_{C_4H_{10}} \quad [\text{adimensional}] \quad (4.10)$$

La relación estequiométrica molar de los hidrocarburos saturados puros como el propano y el butano es calculada de la siguiente manera:

$$S_{C_3H_8} = 4.76 \left(x + \frac{y}{4} \right) = 4.76 \left(3 + \frac{8}{4} \right) = 23.80$$

$$S_{C_4H_{10}} = 4.76 \left(4 + \frac{10}{4} \right) = 30.94$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación (4.10) obtenemos el siguiente resultado.

$$S_{LP} = 0.6(23.80) + 0.4(30.94) = 26.66$$

Ahora calculamos la longitud de la llama de difusión con la ecuación (2.14).

$$L_{f-T_{difusión}} = \frac{1330 Q_{LP} \left(\frac{T_0}{T_{LP}} \right)}{\ln \left(1 + \frac{1}{S_{LP}} \right)} = \frac{1330 \frac{s}{m^2} \left(3.89 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s} \right) (1) \left(\frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} \right)}{\ln \left(1 + \frac{1}{26.66} \right)} = 140 \text{ mm}$$

Para determinar la longitud de la llama con premezcla de aire que mostramos en la figura 4.3.a necesitamos recalculamos la relación estequiométrica molar mediante la ecuación (2.26). La llama de la figura 4.3.a tiene un 6% de aire primario.

$$S_{LP_ψ@6\%} = \frac{1 - ψ_{primario}}{ψ_{primario} + \frac{1}{S_{LP}}} = \frac{1 - 0.06}{0.06 + \frac{1}{26.66}} = 9.64$$

Sustituimos el valor del flujo de gas LP y el valor de la relación estequiométrica molar para un 6% de aire primario en la ecuación (2.14). La longitud de la llama con premezcla de aire que mostramos en la figura 4.3.a es la siguiente:

$$L_{f-T_{premez@6\%}} = \frac{1330 Q_{LP} \left(\frac{T_0}{T_{LP}} \right)}{\ln \left(1 + \frac{1}{S_{LP_ \psi @6\%}} \right)} = \frac{1330 \frac{s}{m^2} \left(3.89 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s} \right) (1) \left(\frac{1000_mm}{1_m} \right)}{\ln \left(1 + \frac{1}{9.64} \right)} = 52_mm$$

La llama mostrada en la figura 4.3.b tiene un 5% de aire primario. Para calcular la longitud de esta llama debemos calcular la relación estequiométrica molar considerando un 5% de aire primario. Nuevamente aplicamos la ecuación (2.26).

$$S_{LP_ \psi @5\%} = \frac{1 - \psi_{primario}}{\psi_{primario} + \frac{1}{S_{LP}}} = \frac{1 - 0.05}{0.05 + \frac{1}{26.66}} = 10.85$$

Sustituimos el valor del flujo de gas LP y el valor de la relación estequiométrica molar para un 5% de aire primario en la ecuación (2.14). La longitud de la llama mostrada en la figura 4.3.b es la siguiente:

$$L_{f-T_{premez@5\%}} = \frac{1330 Q_{LP} \left(\frac{T_0}{T_{LP}} \right)}{\ln \left(1 + \frac{1}{S_{LP_ \psi @5\%}} \right)} = \frac{1330 \frac{s}{m^2} \left(3.89 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s} \right) (1) \left(\frac{1000_mm}{1_m} \right)}{\ln \left(1 + \frac{1}{10.85} \right)} = 59_mm$$

En la siguiente sección describimos detalladamente el arreglo experimental que diseñamos y armamos para determinar la distribución de temperatura y la longitud de las llamas axi-simétricas.

4.5. Arreglo Experimental

El arreglo experimental que diseñamos es capaz de determinar la distribución de temperatura y la longitud de las llamas axi-simétricas. Los elementos y dispositivos que constituyen nuestro arreglo experimental pueden agruparse en tres sistemas: sistema de combustión, sistema óptico y sistema de procesamiento de datos. La figura 4.1 nos muestra un esquema del arreglo experimental que armamos.

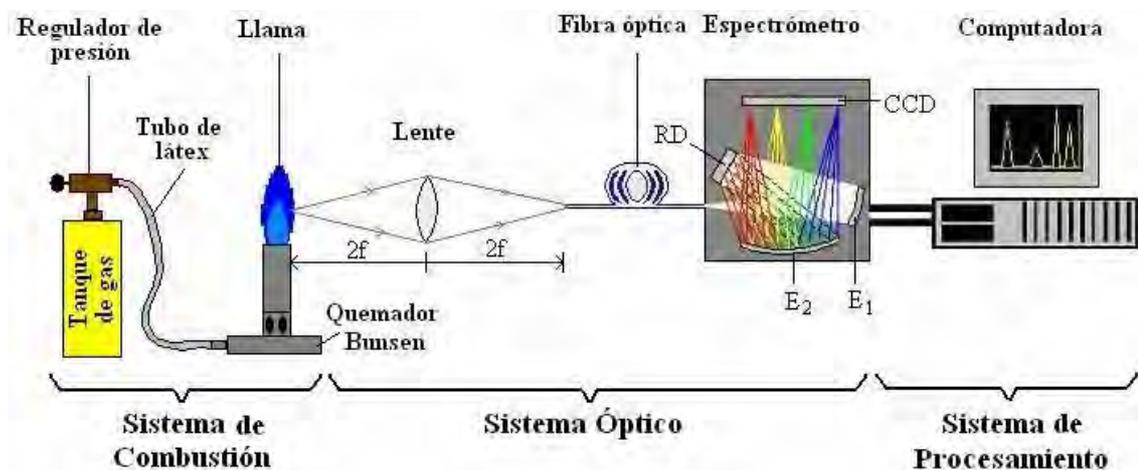


Figura 4.1. Esquema del arreglo experimental diseñado y armado para la medición de la distribución de temperatura y la longitud de las llamas axi-simétricas.

4.5.1. Sistema de Combustión

El sistema de combustión está formado por un tanque de gas, un regulador de presión, un conducto flexible de látex y un quemador tipo Bunsen. El tanque de gas contiene 275 gramos de gas *LP* a una presión de 3.5 kg/cm² y es fabricado por la empresa Gas Tournch de México, S.A de C.V. El regulador de presión nos proporciona un flujo constante de combustible y es fabricado por la misma empresa que fabrica el tanque de gas. El conducto de látex conduce al gas que sale del regulador de presión hasta el quemador. El quemador tiene un dispositivo que regula la cantidad de aire primario y nos permite modificar las condiciones termodinámicas de la combustión. Ver la figura 4.1.

4.5.2. Sistema Óptico

El sistema óptico está formado por una mesa elevadora (M), un riel (R), un carro sencillo (CS), un porta-lente (PL), una lente bi-convexa (L), un carro con ajuste vertical y horizontal (CD), un porta-placa con resorte (PP), una fibra óptica (F) y un espectrómetro. En la figura 4.2 observamos que la mesa elevadora sostiene al quemador y nos permite mover con precisión a la llama para explorar distintas regiones de la misma. La lente tiene 50 mm de diámetro, 55.2 mm de distancia focal y está instalada en el porta-lente. El porta-lente se ubica sobre el carro sencillo. El carro sencillo se sitúa sobre el riel y puede deslizarse en la dirección z .

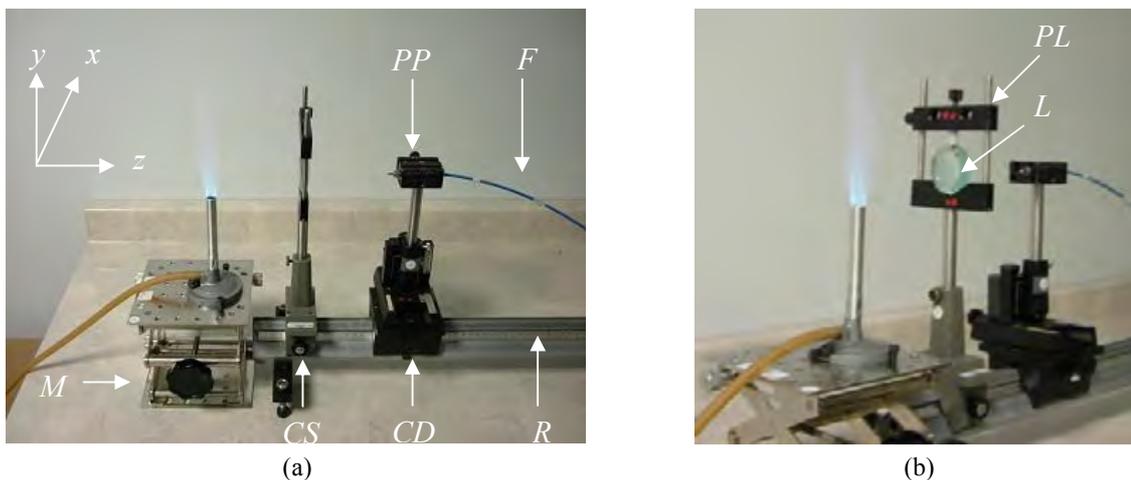


Figura 4.2. a) Vista lateral del sistema óptico. b) Vista en perspectiva del sistema óptico.

La distancia entre la región de interés de la llama y la lente fue seleccionada considerando que el calor generado no debe dañar a la lente. Mediante pruebas prácticas determinamos que 100 mm o más es una distancia segura entre la llama y la lente. Debido a que queremos diseñar un dispositivo de medición compacto decidimos usar una configuración óptica conocida como “1-1 conjugados”. Esta configuración nos permite tener al objeto y a la imagen tan cerca como es posible; además nos proporciona la mejor transferencia de energía. Por esta razón la distancia focal de la lente $f = 55.2$ mm es aproximadamente la mitad distancia de seguridad de 100 mm. El diámetro (D) de la lente

fue calculado en función del campo de visión de la fibra óptica y de la distancia entre la lente y la entrada de la fibra óptica. El diámetro de la lente que requerimos fue calculado mediante la siguiente ecuación:

$$D = 4f \left[\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]. \quad [\text{mm}] \quad (4.11)$$

Donde f es la distancia focal de la lente en milímetros y θ es el ángulo de visión de la fibra óptica en grados. El ángulo de visión medido fue $\theta = 23^\circ$. Sustituimos el valor del ángulo de visión y el valor de la distancia focal en la ecuación (4.11) y determinamos que la apertura mínima de la lente debía ser de 44.9 mm. La lente usada tiene una apertura de 50 mm, por lo tanto satisface nuestros requerimientos.

La fibra óptica está sujeta mediante el porta-placa con resorte. El porta-placa se coloca en el carro con ajuste vertical y horizontal. Ambos dispositivos nos ayudan a alinear la fibra óptica. La fibra óptica conduce eficientemente a la radiación detectada hasta un espectrómetro modelo S2000 fabricado por Ocean Optics, Inc. Una vez en el espectrómetro, el haz divergente que sale de la fibra óptica es colimado por el espejo esférico E_1 (ver la figura 4.1). El haz colimado es dirigido hacia una rejilla de difracción plana (RD). La luz difractada es enfocada por el espejo esférico E_2 sobre un detector lineal tipo CCD . La sensibilidad espectral del detector se extiende desde los 350 nm hasta los 1000 nm. El detector convierte la radiación electromagnética en una señal eléctrica que posteriormente es analizada mediante el sistema de procesamiento de datos.

4.5.3. Sistema de Procesamiento de Datos

El sistema de procesamiento de datos está formado por un convertidor A/D (analógico-digital) y una computadora personal. El convertidor A/D transforma la señal analógica del detector en una señal digital. Posteriormente el espectro digital es presentado en la pantalla de una computadora con la ayuda del programa *OOIbase* que es propiedad de Ocean Optics Inc. Ver la figura 4.1.

4.6. Mediciones

Estudiamos tres llamas con diferentes cantidades de aire-primario. La figura 4.3 contiene fotografías de las llamas analizadas. La primera llama (figura 4.3.a) contiene la mayor cantidad de aire primario posible, sin que se presenten los fenómenos de flotación y de retroceso, y está caracterizada por una apariencia azul semitransparente. La segunda llama (figura 4.3.b) contiene un 5% de aire primario, su parte baja es azul y su punta amarilla. La tercera llama (figura 4.3.c) no contiene aire primario, tiene una apariencia amarilla y presenta una ligera turbulencia.

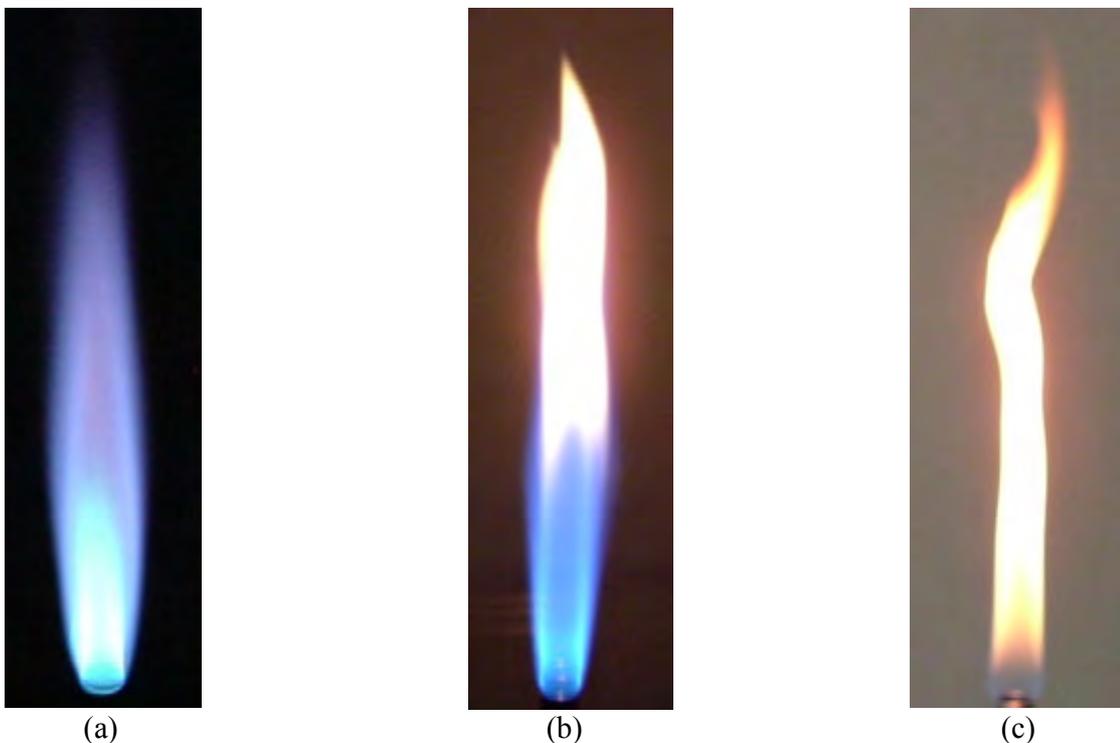


Figura 4.3. a) Llama con máximo contenido de aire primario. b) Llama con 5% de aire primario. c) Llama de difusión o sin premezcla de aire. La escala de las imágenes no es la misma, la llama se alarga cuando reducimos la cantidad de aire primario.

Durante las mediciones analizamos pequeños volúmenes dentro de la llama. Cambiando la posición del quemador exploramos diferentes regiones de la llama. La

exploración consistió en obtener el espectro de emisión de varios volúmenes localizados a lo largo de tres líneas rectas: a-a', b-b' y c-c'. Estas líneas son paralelas al eje de coordenadas "y". El sistema de coordenadas coincide con el centro de la boquilla del quemador, sin embargo en la figura 4.4 aparece fuera de las figuras para facilitar la visualización del esquema.

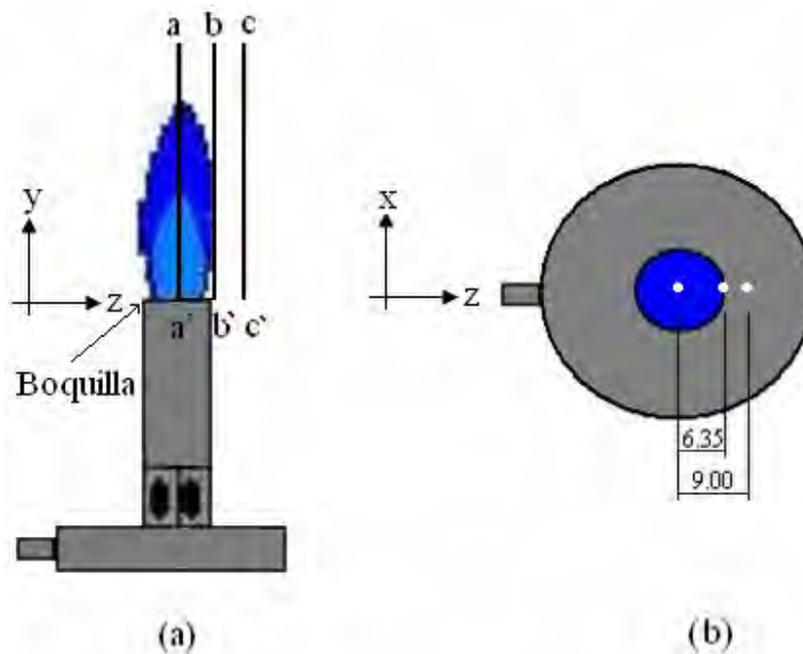


Figura 4.4. a) Esquema de una vista lateral del quemador y de las trayectorias de exploración. b) Esquema de la vista superior del quemador. Las dimensiones están en milímetros.

La línea a-a' coincide con el eje de simetría de la llama. La línea b-b' se localiza a 6.35 mm del eje de simetría de la llama. La línea c-c' está a 9.00 mm del eje de la llama. La exploración a lo largo de cada trayectoria inició en la base de la llama ($y = 0$ mm) y terminó en $y = 110$ mm. En cada trayectoria explorada registramos los espectros de emisión de 11 puntos que tienen un espaciamiento de 10 mm entre ellos. Los espectros medidos fueron normalizados y están graficados en las figuras 4.5, 4.6 y 4.7.

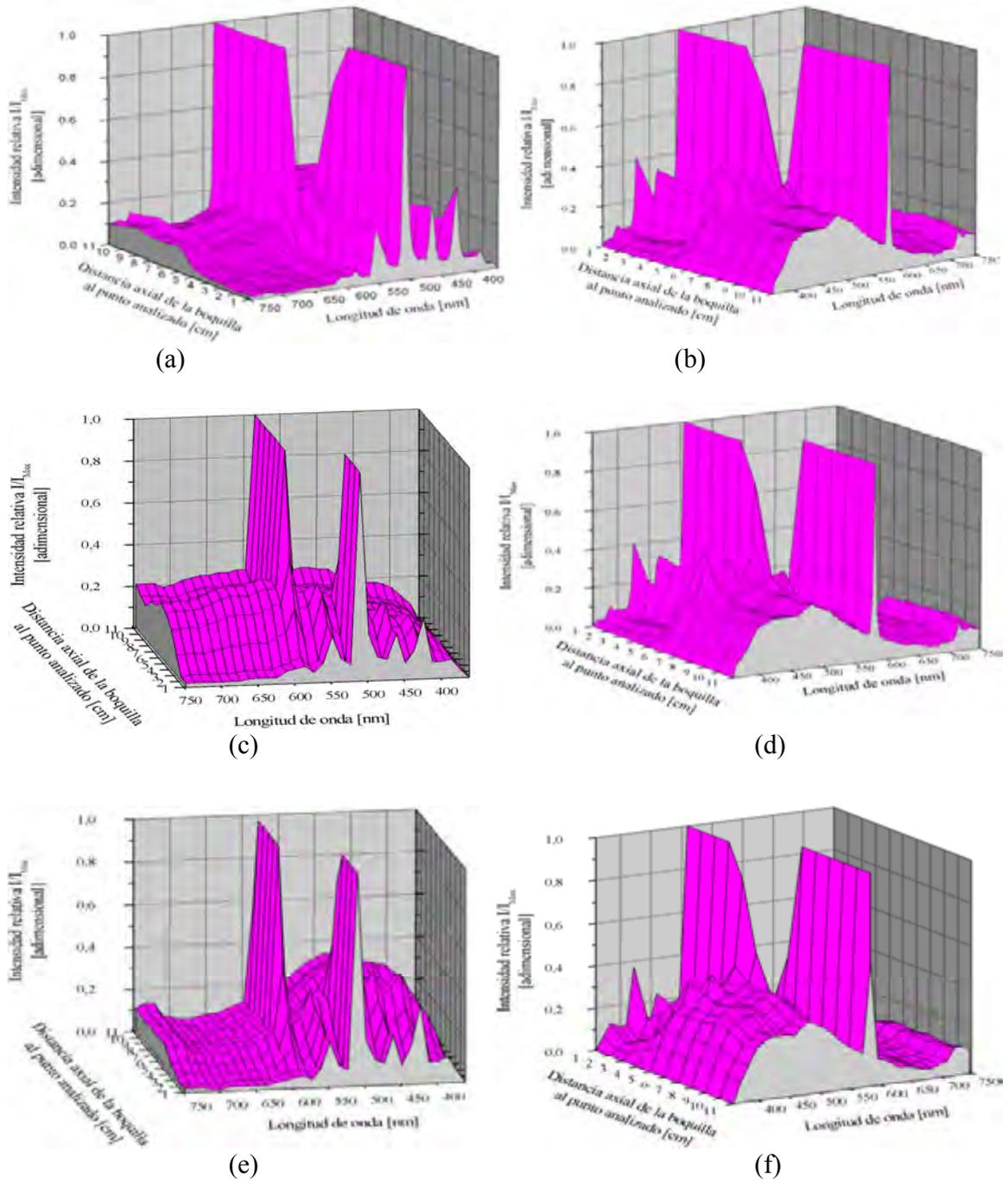
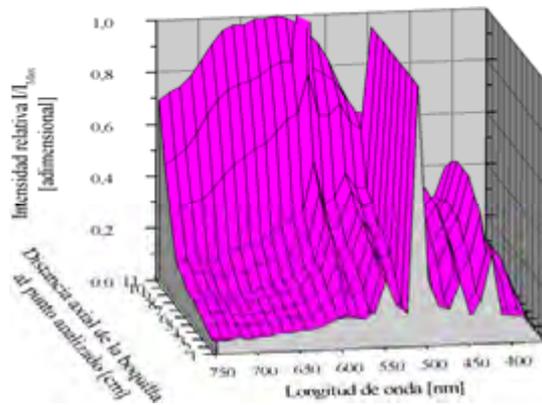
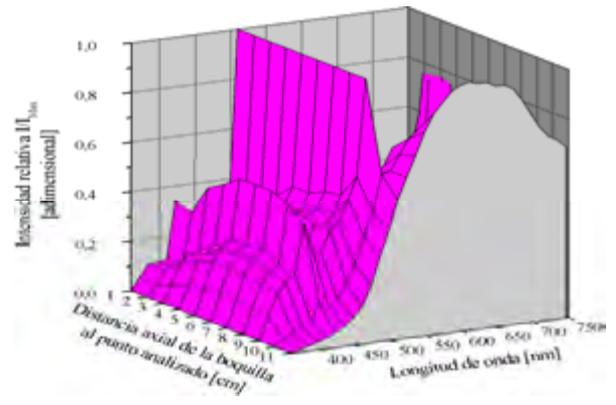


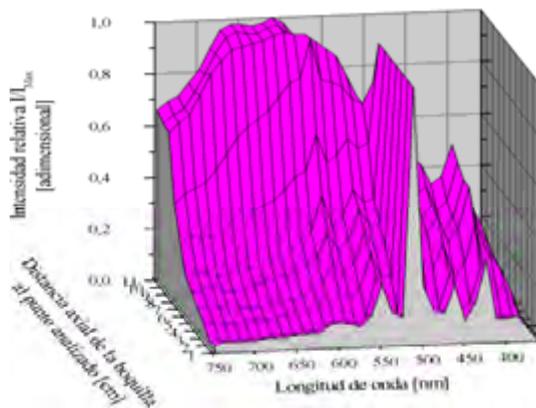
Figura 4.5. Espectros de emisión de la llama con mayor contenido de aire primario (figura 4.3.a). Las figuras a) y b) muestran dos perspectivas de la gráfica de espectros medidos a lo largo de la línea a-a'. c) y d) muestran dos perspectivas de la gráfica de espectros medidos en la trayectoria b-b'. e) y f) son dos perspectivas de la gráfica de espectros medidos a lo largo de la línea c-c'.



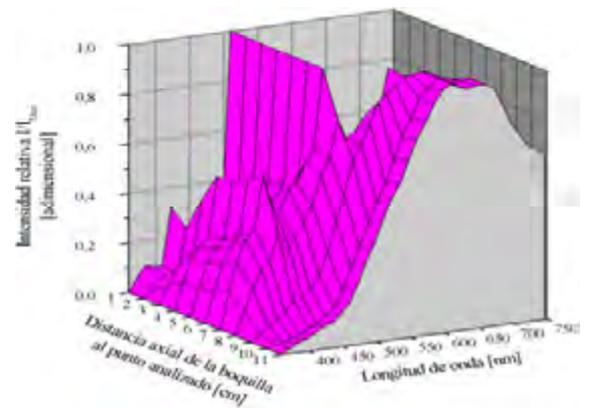
(a)



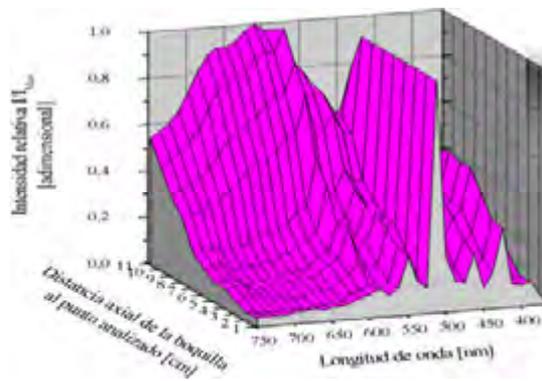
(b)



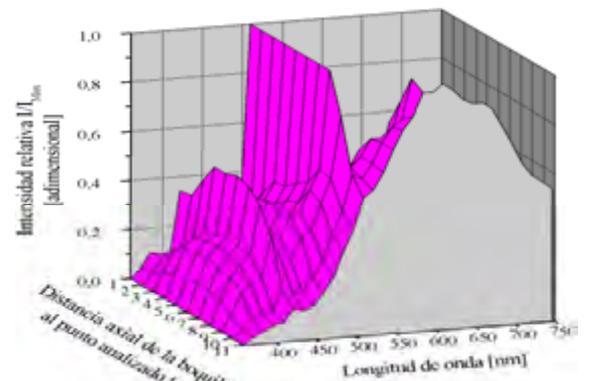
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.6. Espectros de emisión de la llama con 5% de aire primario. Las figuras a) y b) muestran dos perspectivas de la gráfica de espectros medidos en la línea a-a'. c) y d) son dos vistas de la gráfica de espectros medidos en la trayectoria b-b'. e) y f) muestran dos vistas de la gráfica de espectros medidos a lo largo de la línea c-c'.

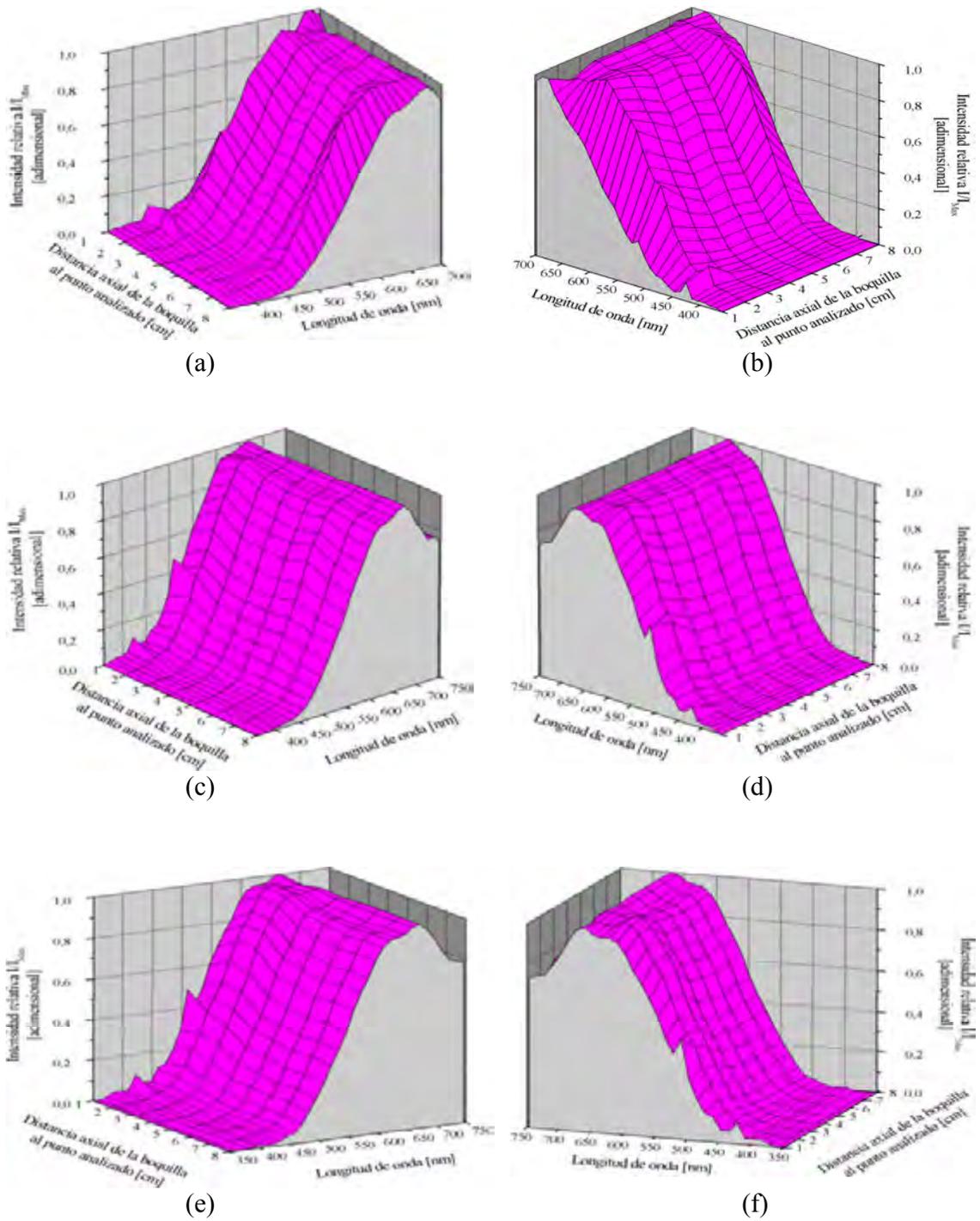


Figura 4.7. Espectros de emisión de la llama de difusión. Las figuras a) y b) muestran dos perspectivas de la gráfica de espectros medidos en la línea a-a'. c) y d) son dos presentaciones de la gráfica de espectros medidos en la trayectoria b-b'. e) y f) son dos vistas de la gráfica de espectros medidos en c-c'.

4.7. Resultados

Los espectros de las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 presentan varias bandas espectrales propias de las llamas premezcladas que queman hidrocarburos saturados. Las bandas emitidas en la región visible son generadas por radicales en estado excitado que se relajan a estados menos energéticos emitiendo fotones durante la transición energética. La figura 4.8 nos muestra la clasificación de las bandas observadas en los espectros de emisión de las llamas que analizamos.

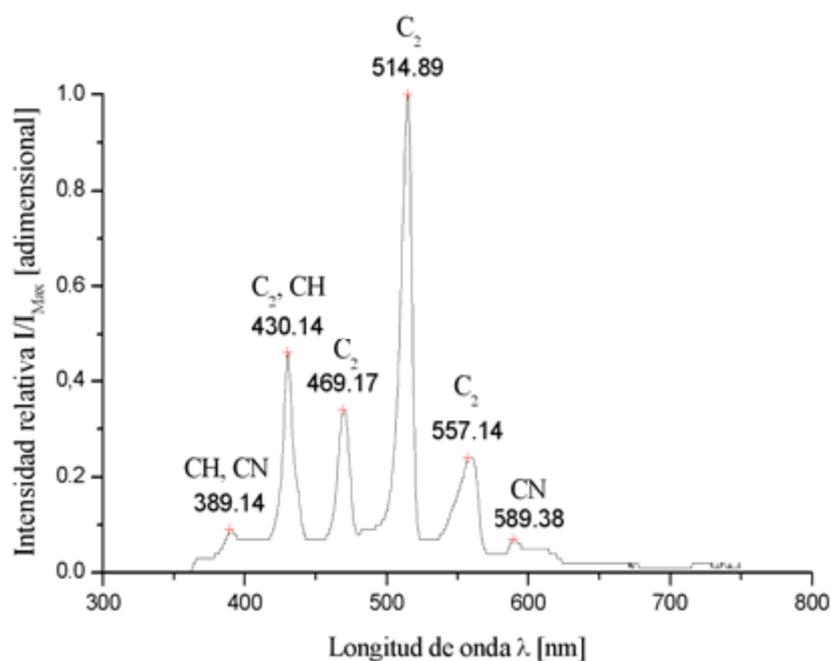


Figura 4.8. Clasificación de las bandas espectrales que emiten las llamas que queman hidrocarburos saturados.

Las bandas espectrales más características de las llamas que queman hidrocarburos saturados son las bandas de Swan, las cuales son emitidas por los radicales C_2 . Las bandas del espectro 4.8 están superpuestas sobre un espectro continuo que va desde los 400 nm hasta los 600 nm. El espectro continuo es emitido por las moléculas excitadas de dióxido de carbono CO_2^* .

El análisis de los espectros de emisión consistió en medir la intensidad relativa de dos picos mutuamente cercanos. Los picos analizados forman parte de las bandas de Swan y están localizados en 469.14 nm y 514.89 nm. El análisis de los espectros de emisión fue realizado considerando que nuestro experimento cumple razonablemente con las condiciones descritas en la sección 4.3. Utilizamos la ecuación (4.8) para el cálculo de la distribución de temperatura. Los resultados del análisis de los espectros de emisión se muestran en las figuras 4.9, 4.10 y 4.11.

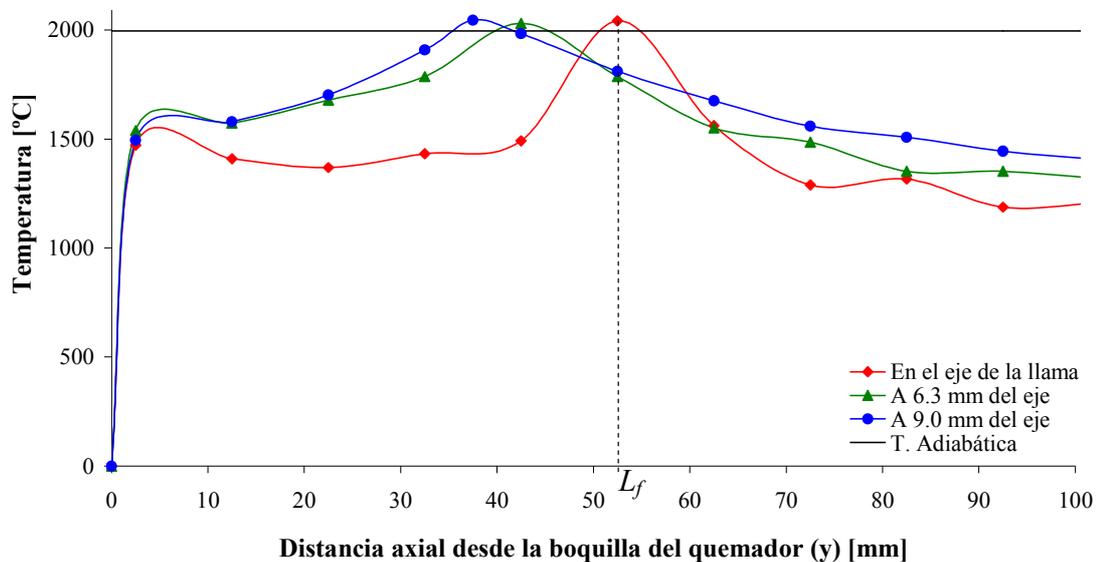


Figura 4.9. Distribución de temperatura de la llama con mayor contenido de aire primario (figura 4.3.a). La temperatura adiabática de la llama a una atmósfera de presión es $T_{ad} = 1995$ °C. La longitud de la llama es $L_f = 53$ mm.

La figura 4.9 fue obtenida a partir de las gráficas de la figura 4.5. Determinamos que la máxima temperatura de la llama es $T_{max} = 2038 \pm 8$ °C y que la longitud de la llama es $L_f = 53 \pm 5$ mm. El desplazamiento de los picos de temperatura es una consecuencia directa de la forma de las superficies isotérmicas de la llama. En las curvas de temperatura también observamos un pico entre 0 mm y 10 mm que posiblemente se debe a la reflexión de la radiación que incide sobre la superficie del quemador.

La figura 4.10 muestra la distribución de temperatura de la llama con 5% de aire primario.

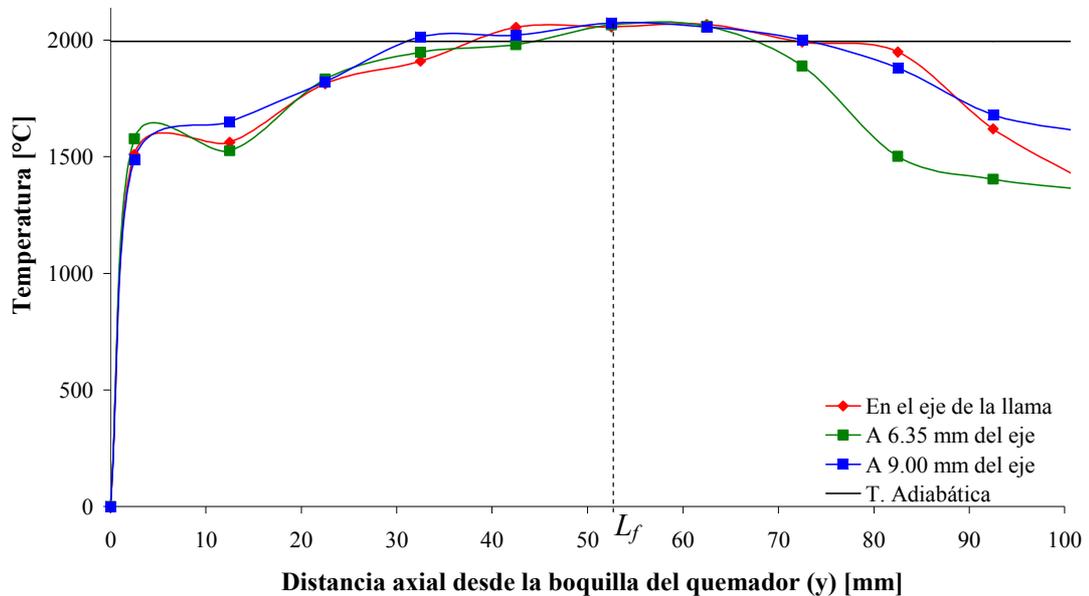


Figura 4.10. Distribución de temperatura de la llama con 5% de aire primario mostrada en la figura 4.3.b. La longitud de la llama es $L_f = 53$ mm.

La figura 4.10 fue obtenida a partir de las gráficas de espectros de la figura 4.6. En la figura 4.10 observamos que la máxima temperatura es $T_{max} = 2068 \pm 4$ °C y que la longitud de la llama es $L_f = 53 \pm 5$ mm. Nuevamente, el desplazamiento de los picos de temperatura nos indica que las superficies isotérmicas de la llama tienen una forma similar a un cono. En las curvas de figura 4.10 también observamos un pico entre 0 mm y 15 mm similar al pico de la figura 4.9. La figura 4.11 muestra la distribución de temperatura de la llama de difusión mostrada en la figura 4.3.c.

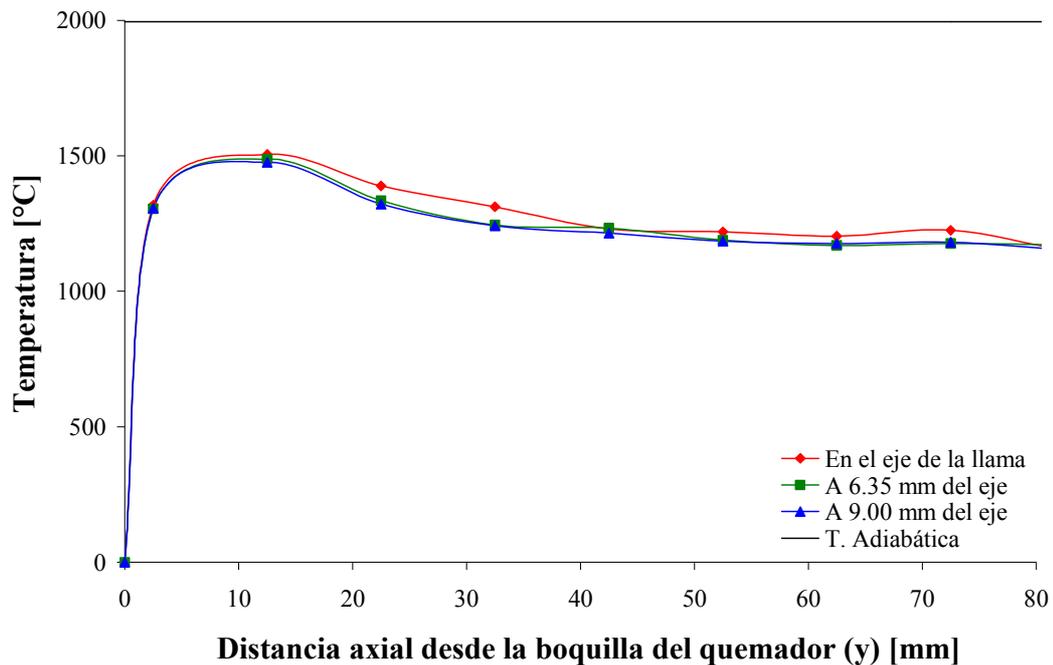


Figura 4.11. Distribución de temperatura de la llama de difusión mostrada en la figura 4.3.c, la cual quema una mezcla aire-gas *LP*.

La distribución de temperatura de la figura 4.11 fue determinada a partir de los espectros de emisión de la figura 4.7 y de la ecuación (4.8). La temperatura máxima de la llama de difusión, en nuestro rango de medición, es $T_{max} = 1490 \pm 14$ °C y se presenta a 9 mm de la boquilla del quemador. En este caso, nuestro rango exploración no fue suficientemente grande para determinar la longitud de la llama. El rango de exploración fue limitado por la turbulencia de la llama. En las curvas de la figura 4.11 observamos que la distribución de temperatura a lo largo de las líneas a-a', b-b' y c-c' son similares. La similitud entre las curvas puede deberse a que el proceso de difusión incrementa el tamaño de la llama y disminuye el cambio espacial de sus propiedades físicas, químicas y termodinámicas.

La llama de difusión es más larga que las llamas premezcladas manteniendo las mismas condiciones en el flujo de combustible y en la configuración del quemador.

4.8. Verificación de las Condiciones para el Uso de la Termometría de Doble Longitud de Onda

La condición más importante que debemos satisfacer para poder aplicar la termometría de doble longitud de onda en la caracterización de las llamas es que ϵ_{λ_1} y ϵ_{λ_2} sean iguales. Para verificar esta condición graficamos un espectro de emisión y calculamos la temperatura correspondiente. Luego graficamos una curva de Planck para la temperatura calculada. Las curvas de Planck son líneas de emisividad constante.

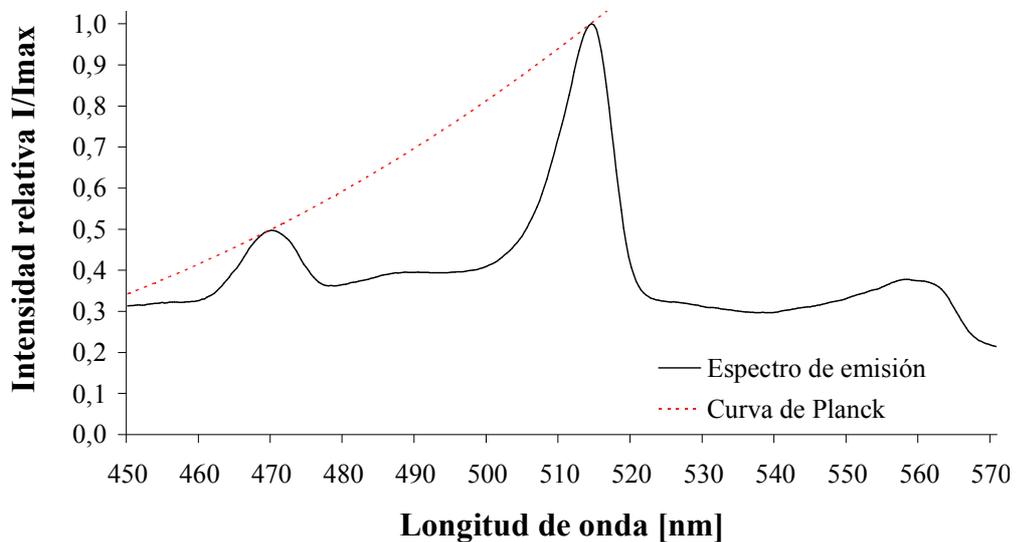


Figura 4.12. Espectro de una zona de la llama con temperatura $T = 2038 \text{ }^\circ\text{C}$ y curva de Planck para la misma temperatura.

En la gráfica 4.12 observamos que los picos de emisión ubicados en 469 nm y 515 nm tocan a la curva de Planck. Por lo tanto, estos picos de emisión tienen la misma emisividad. Nuestro método de medición también cumple con las condiciones (b) y (c) de la sección 4.3, ya que las longitudes de onda de las líneas espectrales estudiadas son menores que $1 \text{ } \mu\text{m}$ y además los volúmenes analizados son de 0.01 mm^3 .

Debido a que cumplimos satisfactoriamente con las tres condiciones planteadas en la sección 4.3., concluimos que nuestra metodología de medición es válida.

4.9. Conclusiones

Caracterizamos tres llamas axi-simétricas mediante una metodología de medición basada en la termometría de doble longitud de onda. La metodología consiste en el análisis espectral de la radiación visible que emiten las llamas. Los instrumentos de medición diseñados para operar en el visible tienen la ventaja de ser más económicos y accesibles que los instrumentos infrarrojos o ultravioletas.

Analizamos tres llamas que queman una mezcla de aire y gas *LP*. Las llamas que analizamos tienen diferentes cantidades de aire primario. Con nuestro método de medición determinamos la distribución de temperatura a lo largo de tres líneas paralelas al eje de simetría de la llama. En las llamas que caracterizamos, la temperatura máxima promedio que calculamos fue $T_{max} = 2053 \pm 21$ °C. En el capítulo II determinamos que la temperatura adiabática de las llamas que queman una mezcla estequiométrica aire-gas *LP* es $T_{ad} = 1995$ °C. Comparando la temperatura adiabática de la llama con la temperatura máxima promedio determinamos que el error en la medición de temperatura es del 2.9%. En nuestro rango de medición, la llama de difusión tiene una temperatura máxima de 1490 ± 14 °C.

La longitud teórica de las llamas premezcladas que mostramos en las figuras 4.3.a y 4.3.b son $L_{f1} = 52$ mm y $L_{f2} = 59$ mm, respectivamente. A través de nuestras mediciones determinamos que las longitudes de las llamas son las siguientes: $L_{f-T1} = 53 \pm 5$ mm y $L_{f-T2} = 53 \pm 5$ mm. El error en la medición de la longitud de la llama con mayor contenido de aire primario es del 1.9%. El error en la medición de la longitud de la llama con 5% de aire primario es del 10.1%. Podemos reducir este error de medición mediante la disminución del espacio entre los puntos analizados en el proceso de exploración, es decir, incrementando la resolución del proceso de exploración.

En el caso de la llama de difusión no fue posible determinar experimentalmente su longitud debido a la turbulencia que presentó. La turbulencia de la llama produce

mediciones erráticas. En futuras mediciones eliminaremos o minimizaremos la turbulencia de la llama de difusión colocándola dentro de un tubo de vidrio transparente o disminuyendo la velocidad del flujo de combustible. Teóricamente la longitud de la llama de difusión es $L_{f,T3} = 140$ mm.

La principal fuente de error en nuestras mediciones se debe a la inestabilidad de las llamas y al método de exploración.

Por otra parte, la metodología de medición descrita en este capítulo también nos proporciona un indicio acerca de la forma geométrica de las regiones isotérmicas de la llama. El desplazamiento de los picos de las curvas de temperatura nos indica que la superficie de máxima temperatura de la llama tiene una geometría similar a un cono.

Una desventaja de nuestra metodología de medición es la exploración puntual de la llama. La exploración puntual de un objeto tridimensional es lenta e imprecisa cuando el proceso es manual. Otra desventaja de la metodología consiste en que no podemos detectar el manto de la llama debido a que está compuesto principalmente por aire caliente. El aire caliente no emite radiación visible de manera significativa. En el próximo capítulo determinamos la distribución de temperatura y la longitud de las llamas axi-simétricas mediante una metodología de medición basada en la interferometría de desplazamiento lateral.

CAPÍTULO V

CARACTERIZACIÓN DE LLAMAS MEDIANTE INTERFEROMETRÍA DE DESPLAZAMIENTO LATERAL

5.1. Introducción

Las técnicas interferométricas son herramientas matemáticas confiables que nos permiten determinar la distribución del índice de refracción de un objeto de fase. Los objetos de fase que analizamos son llamas axi-simétricas parcialmente premezcladas y generadas por un quemador de gas tipo Bunsen. Las propiedades de las llamas axi-simétricas como el índice de refracción, la temperatura y la composición química tienen una distribución espacial con simetría de revolución. Las características de las llamas pueden ser derivadas a través de técnicas tomográficas o, como en nuestro caso, mediante una deconvolución numérica basada en un análisis de Fourier y en la transformada inversa de Abel.^{34,39}

Una de las características más importantes de las llamas es su distribución de temperatura. Para determinar la distribución de temperatura de las llamas se han usado tanto técnicas de contacto, como técnicas sin contacto u ópticas. En la caracterización de las llamas generalmente preferimos el uso de técnicas ópticas debido a su carácter no-invasivo y gran precisión.

Algunas de las técnicas ópticas usadas en el diagnóstico de las llamas son la fluorescencia inducida por láser,²⁷⁻³¹ la interferometría de desplazamiento lateral,^{41,42} la interferometría holográfica,⁴³⁻⁴⁵ la deflectometría de Moiré,¹⁹ la fotografía de moteado,^{46,47} la interferometría de moteado,^{48,49} la interferometría de Talbot,^{50,51} y la

interferometría de fase Lau,⁵². Sin embargo, pocas de las técnicas anteriores tienen el potencial de ser implementadas como herramientas estándar para el desarrollo de nuevos sistemas de combustión. Una de las técnicas ópticas con mayor viabilidad es la interferometría de desplazamiento lateral.

La interferometría de desplazamiento lateral nos proporciona interferogramas que muestran la diferencia de fase entre dos frentes de onda que interfieren en algún lugar del espacio. Un corrimiento de fase es inducido en el interferograma cuando el haz coherente pasa a través de la llama. Un corrimiento de fase local puede ser transformado en un índice de refracción local. En el caso de las llamas podemos transformar un índice de refracción local en una temperatura local.

Así pues, con la interferometría de desplazamiento lateral podemos calcular la distribución espacial del índice de refracción de una llama. La variación espacial del índice de refracción dentro de una llama es causada por un cambio en la temperatura y/o en la composición química de la mezcla gaseosa. Para determinar las características de las llamas mediante interferometría de desplazamiento debemos conocer sus fundamentos.

5.2. Fundamentos de la Interferometría de Desplazamiento Lateral

El interferómetro de desplazamiento lateral es un dispositivo óptico que genera un patrón de interferencia a partir de la división de un frente de onda primario en dos frentes de onda secundarios. Las amplitudes de las ondas secundarias son menores que la amplitud de la onda primaria. Los frentes de onda secundarios se propagan por diferentes trayectorias y posteriormente son proyectados y superpuestos en un mismo plano. Los frentes de onda superpuestos están desplazados lateralmente. Si la coherencia de las ondas que interfieren no ha sido destruida, entonces se forma un patrón de interferencia en la región de superposición. Este patrón de franjas nos sirve como referencia para realizar nuestras mediciones. La gráfica 5.1 muestra un esquema de la interferencia generada por dos frentes de onda desplazados lateralmente.

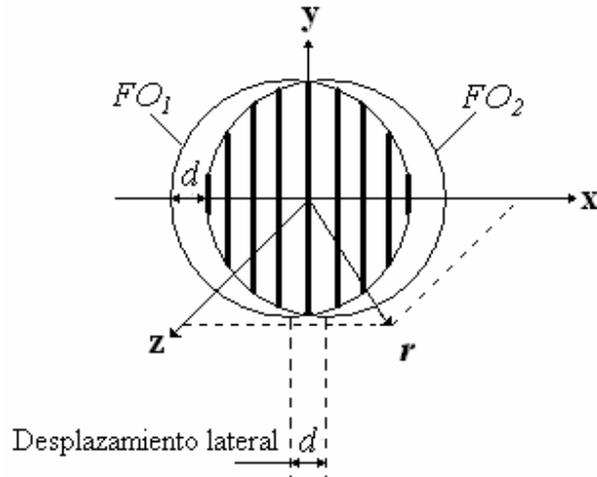


Figura 5.1. Patrón de interferencia generado por dos frentes de onda secundarios que están desplazados lateralmente. $FO_{1,2}$: frente de onda plano 1, 2.

Las franjas de interferencia son deformadas cuando la llama es colocada en la trayectoria del haz primario. Podemos usar al patrón de interferencia distorsionado para calcular la distribución de temperatura de la llama. Para determinar la distribución de temperatura debemos comparar al interferograma de referencia (sin llama) con el interferograma deformado por la llama. A continuación presentamos la metodología que usamos para deconvolucionar numéricamente a los interferogramas. Posteriormente calculamos la distribución de temperatura de las llamas.

El desplazamiento relativo de las franjas ($\Delta S/S$) está dado por la ecuación (5.1).

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{d}{\lambda} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial x} dz \quad [\text{adimensional}] \quad (5.1)$$

Donde d [m] es el desplazamiento de los frentes de onda, n es el índice de refracción de la llama, λ [m] es la longitud de onda de la fuente de iluminación. El desplazamiento relativo de las franjas está relacionado con la diferencia de fase entre los frentes de onda no-distorsionado y distorsionado.

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{(z_2 - z_1)}{\lambda} (n_2 - n_1) = \frac{\Delta \psi}{2\pi} \quad [\text{adimensional}] \quad (5.2)$$

$\Delta \psi$ es la diferencia de fase entre el interferograma con llama y el interferograma de referencia. $z_2 - z_1$ es el ancho de llama que atraviesa el frente de onda. En el caso de las llamas axi-simétricas la variable radial r está determinada por la ecuación (5.3).

$$r = \sqrt{x^2 + z^2} \quad [\text{m}] \quad (5.3)$$

Usando las ecuaciones (5.2) y (5.3) re-escribimos la ecuación (5.1).

$$\frac{(\Delta \psi)\lambda}{2\pi dn_0} = \frac{2x}{n_0} \int_0^\infty \left[\frac{\partial n(r, y)}{\partial r} \right] \frac{dr}{\sqrt{r^2 - x^2}} \quad [\text{adimensional}] \quad (5.4)$$

Donde n_0 es el índice de refracción del medio en que generamos el interferograma de referencia. La ecuación (5.4) relaciona a la diferencia de fase con la distribución radial del índice de refracción de la llama. Aplicamos la transformada inversa de Abel²¹ para obtener el índice de refracción de la llama n como función del radio. La ecuación (5.5) es la transformada inversa de Abel de la ecuación (5.4).

$$n(r) - n_0 = -\frac{(\Delta \psi)\lambda}{2\pi^2 d} \int_r^{r_{\max}} \frac{dx}{\sqrt{x^2 - r^2}} \quad [\text{adimensional}] \quad (5.5)$$

Donde r_{\max} [mm] es el radio máximo de la llama en plano de medición. El resultado del proceso de integración de la ecuación (5.5) es el siguiente:

$$n(r) - n_0 = -\frac{(\Delta \psi)\lambda}{2\pi^2 d} \left\{ \log \left[\frac{r_{\max} + (r_{\max}^2 - r^2)^{1/2}}{|r|} \right] \right\}. \quad [\text{adimensional}] \quad (5.6)$$

El signo negativo del miembro derecho de la ecuación (5.6) nos indica que el índice de refracción de la llama disminuye a medida que se incrementa la temperatura de la mezcla gaseosa. Una vez que conocemos la distribución del índice de refracción usamos la ecuación Lorentz-Lorentz ⁴¹ para calcular la distribución de temperatura dentro de la llama. Consideramos que la mezcla gaseosa se comporta como un gas ideal y que $n_0 \approx 1$. La ecuación resultante es la siguiente:

$$T(r) = \frac{T_0}{\left[\frac{n(r) - n_0}{n_0} \right] \left(\frac{3PA + 2RT_0}{3PA} \right) + 1} - 273.15. \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.7)$$

T_0 [K] es la temperatura del medio en que generamos el interferograma de referencia, P [Pa] es la presión atmosférica, R [J/(gmol K)] es la constante universal de los gases y A [m³/gmol] es la refractividad molar del medio que rodea a la llama. Con la ecuación (5.7) determinamos la temperatura de la llama como función del radio en un plano trans-axial (y) específico. En resumen, para calcular la temperatura debemos conocer la diferencia de fase entre los interferogramas. Para determinar la distribución de temperatura de las llamas armamos el interferómetro que describimos enseguida.

5.3. Arreglo Experimental

El interferómetro que armamos consta de un láser He-Ne con 5 mW de potencia, un filtro espacial, una lente colimadora, un divisor de haz y una pantalla de difusión. La figura 5.2 es un esquema del interferómetro de desplazamiento lateral que armamos.

El láser emite un delgado haz con longitud de onda de 632.8 nm. El haz láser se hace pasar a través del filtro espacial que consta de un objetivo con amplificación de 40X y un pinhole de 25 μm . El filtro espacial expande al haz y elimina las imágenes del polvo adherido al objetivo. El haz es expandido hasta tener un diámetro de 70 mm y después es colimado mediante una lente biconvexa de distancia focal $f = 250$ mm.

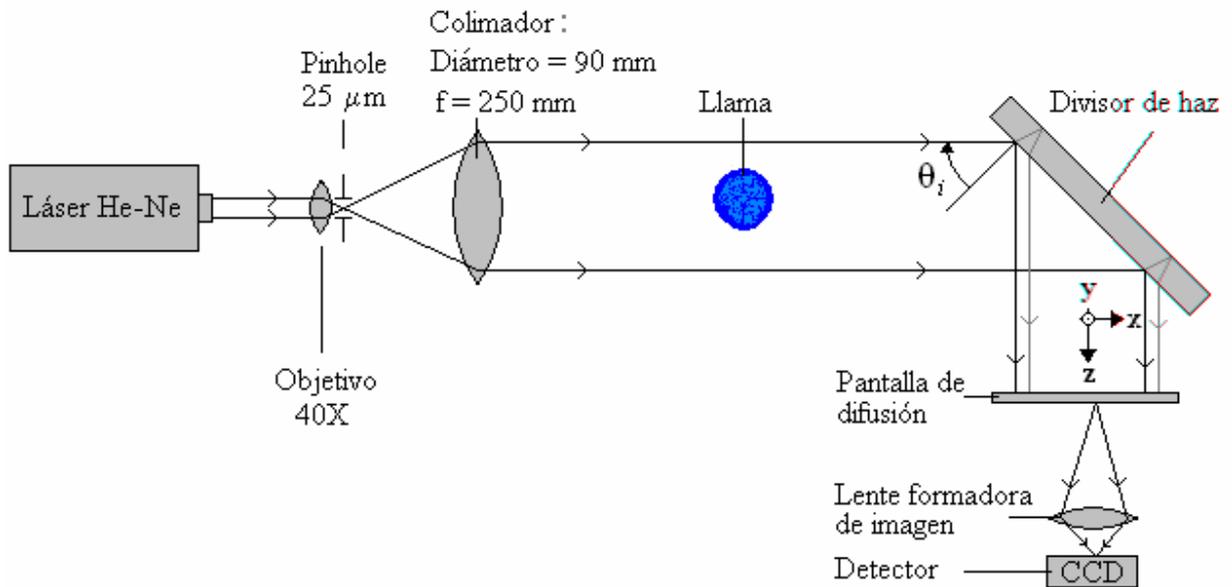


Figura 5.2. Diagrama del interferómetro de desplazamiento lateral que usamos en la caracterización de las llamas.

La figura 5.3 es una fotografía del arreglo experimental que usamos.

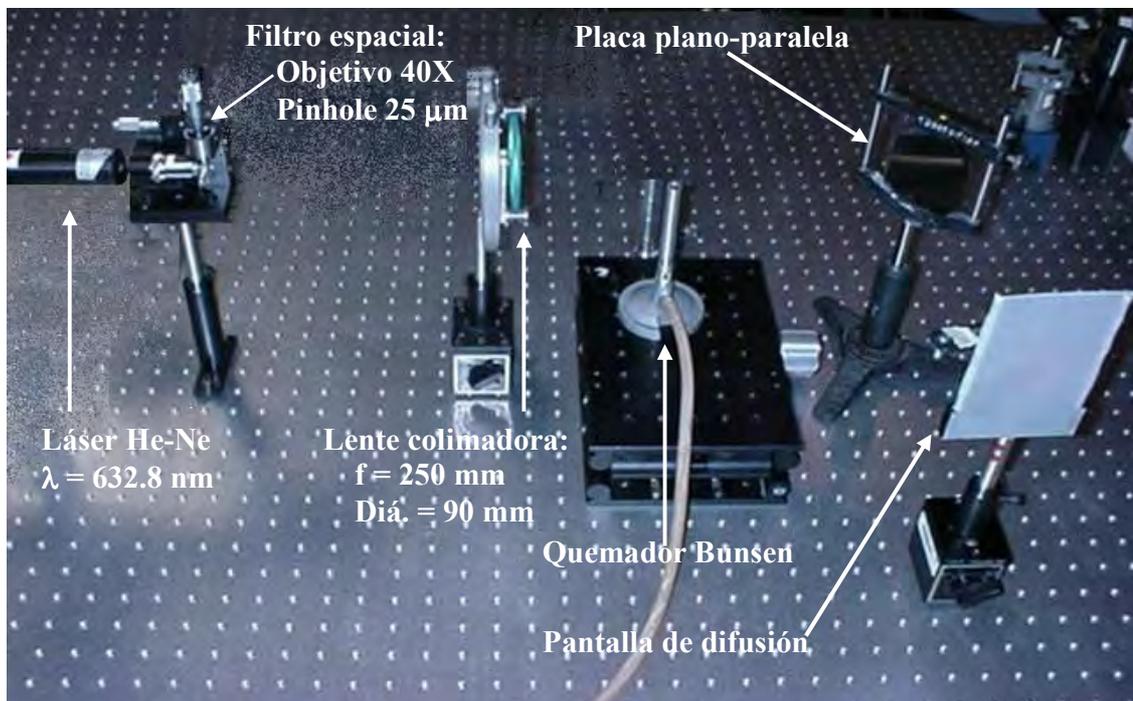


Figura 5.3. Fotografía del interferómetro de desplazamiento lateral que implementamos.

El frente de onda plano que proviene del filtro espacial es proyectado sobre una placa plano-paralela que tiene una película semi-reflejante sobre una de sus superficies. La placa plano-paralela tiene un espesor $t = 5$ mm y actúa como un divisor de haz. El frente de onda proveniente del filtro espacial incide a $\theta_i = 45^\circ$ sobre el divisor de haz. El divisor de haz genera dos frentes de onda secundarios que están desplazados lateralmente. El desplazamiento (d) de los frentes de onda es una función del espesor t de la placa y del ángulo de incidencia θ_i .

$$d = \frac{t \left(\frac{n_a}{n_p} \right) \text{Sen}(2\theta_i)}{\text{Cos} \left[\text{arcSen} \left(\frac{n_a}{n_p} \right) \text{Sen}(2\theta_i) \right]} \quad [\text{m}] \quad (5.8)$$

Donde t [m], n_a y n_p son el índice de refracción del aire y de la placa, respectivamente. Con $n_a = 1$, $n_p = 1.5$, $t = 5 \times 10^{-3}$ m y $\theta_i = 45^\circ$ encontramos que el desplazamiento de los frentes de onda es $d = 3.8 \times 10^{-3}$ m. La superposición de los frentes de onda produce un patrón de franjas con una distribución cosenoidal de irradiancia.

El sistema de combustión que usamos está descrito en la sección 4.5.1. La llama que analizamos quema una mezcla gaseosa aire-gas *LP*. El aire primario es el 60% del aire estequiométrico.

Cuando ponemos la llama en la trayectoria del haz colimado inducimos un retraso de fase. El retraso en la fase del frente de onda que pasa a través de la llama produce la deformación de las franjas de interferencia. Los interferogramas deformados contienen información acerca de la distribución del índice de refracción de la llama. El índice de refracción está relacionado con la temperatura y con la composición química de la mezcla gaseosa.

5.4. Análisis de Fourier de los Interferogramas de Desplazamiento Lateral

Con el interferómetro de desplazamiento lateral descrito en la sección anterior obtuvimos varios interferogramas como los mostrados en la figura 5.4. Las imágenes tienen una resolución de 640x480 píxeles.

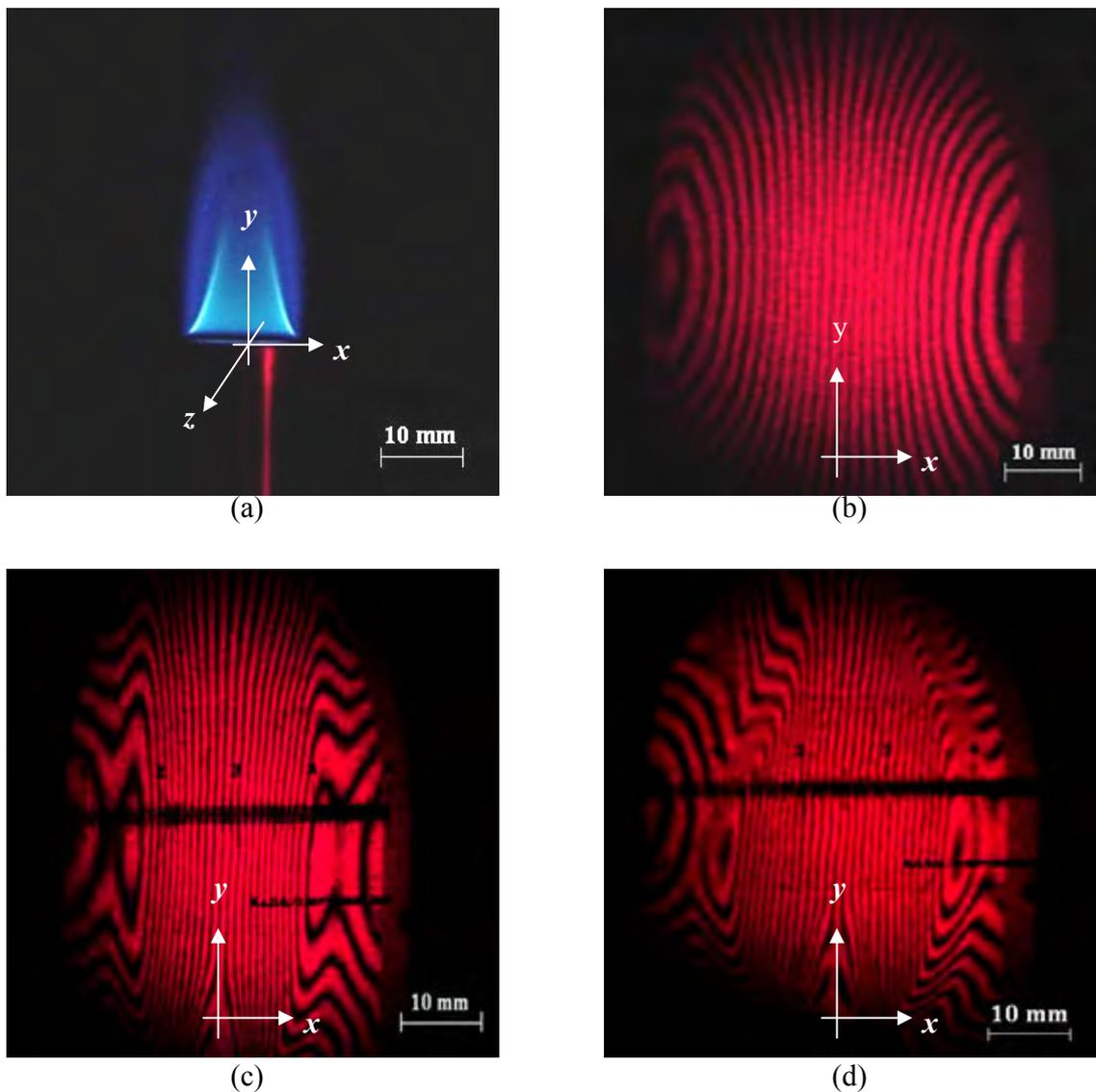


Figura 5.4. Interferogramas de desplazamiento lateral. a) Fotografía de la llama, b) Interferograma de referencia (sin llama), c) Interferograma de la llama y d) Interferograma de la llama perturbada por una corriente de aire.

En los interferogramas 5.4.c y 5.4.d observamos que la llama distorsiona a las franjas de referencia. Con los interferogramas desplazamiento lateral podemos visualizar el manto de la llama. En la figura 5.5 señalamos el manto de la llama.

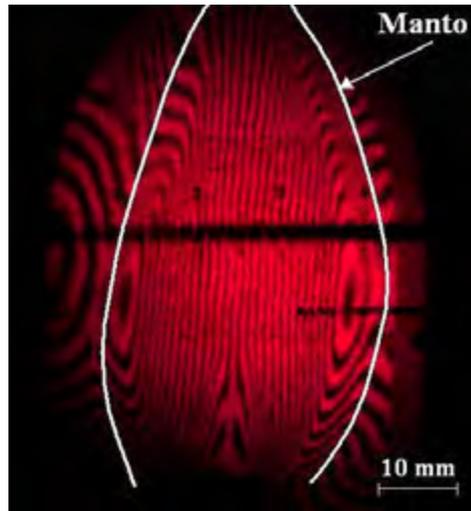


Figura 5.5. Manto de la llama perturbada por una corriente de aire.

Para conocer la temperatura en cualquier punto de la llama debemos determinar la función $\Delta\psi(x,y)$. La función $\Delta\psi(x,y)$ es la diferencia entre la fase del interferograma con llama y la fase del interferograma sin llama. A continuación determinamos la función $\Delta\psi(x,y)$ mediante un análisis, en el dominio de la frecuencia espacial, de los interferogramas obtenidos.

Un patrón de interferencia $I(x,y)$ formado por dos frentes de onda desplazados lateralmente puede describirse matemáticamente mediante la ecuación (5.9).

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\psi_1(x, y)] \quad [\text{W/cm}^2] \quad (5.9)$$

El plano (x,y) se refiere a las coordenadas de cada píxel en el interferograma. $a(x,y)$ es la irradiancia de fondo. $b(x,y)$ describe la modulación de las franjas debida a la distribución de intensidad del haz láser y a la transmitancia no-uniforme de la llama.

$\psi_1(x,y)$ es la fase del punto (x,y) en el interferograma de referencia. La distribución de irradiancia $I(x,y)$ puede ser re-escrita de la siguiente manera:

$$I(x, y) = a(x, y) + c(x, y) + c^*(x, y). \quad [\text{W/cm}^2] \quad (5.10)$$

Donde,

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[i\psi_1(x, y)] \quad [\text{W/cm}^2] \quad (5.11)$$

El símbolo (*) indica el complejo conjugado. La transformada de Fourier con respecto de x del patrón de interferencia $I(x,y)$ es:

$$I(u, y) = A(u, y) + C(u, y) + C^*(u, y). \quad (5.12)$$

La variable u es la frecuencia espacial en la dirección x . El espectro de amplitud descrito por la ecuación (5.12) es una distribución trimodal como la distribución mostrada en la figura 5.6.

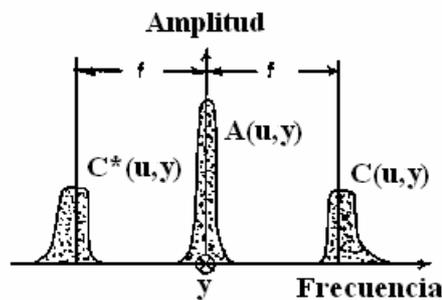


Figura 5.6. Espectro de amplitud con respecto de x del interferograma de interferencia.

$A(u,y)$ está centrado en la frecuencia espacial cero. $C(u,y)$ y $C^*(u,y)$ son simétricos. Mediante la aplicación de un filtro pasabanda adecuado eliminamos $A(u,y)$ y $C^*(u,y)$ y obtenemos un espectro de amplitud como el mostrado en la figura 5.7.

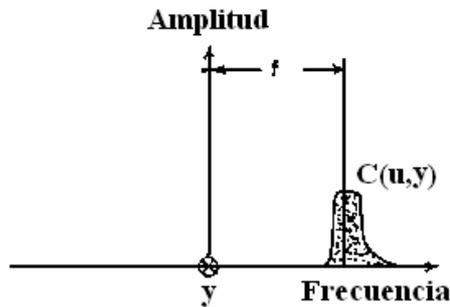


Figura 5.7. Espectro de amplitud después de la aplicación del filtro pasabanda.

Después calculamos $c(x,y)$ que es la transformada inversa de Fourier de la función $C(u,y)$. $c(x,y)$ es una función compleja cuya fase es calculada con la ec. (5.13).

$$\psi_1(x, y) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[c(x, y)]}{\text{Re}[c(x, y)]} \right\} \quad [\text{radianes}] \quad (5.13)$$

Los algoritmos computacionales generalmente proporcionan sólo el valor principal de la función arco-tangente. En consecuencia, la función está indeterminada en los factores de 2π . En este caso desarrollamos un algoritmo para eliminar la indeterminación y obtener una función continua como en la figura 5.8.b.

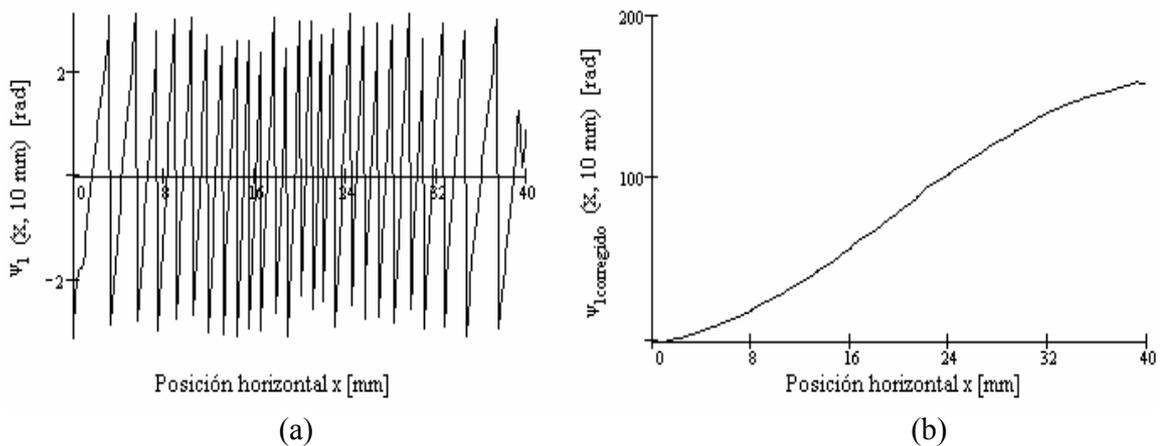


Figura 5.8. Fase del interferograma de referencia (fig. 5.4.b) en $y = 10$ mm. a) Fase calculada con el valor principal de la función arco-tangente. b) Fase corregida.

Aplicando la misma metodología determinamos la distribución de fase $\psi_2(x,y)$ del interferograma con llama. $\Delta\psi(x,y)$ es la diferencia entre la fase $\psi_2(x,y)$ del interferograma con llama y la fase $\psi_1(x,y)$ del interferograma de referencia, es decir,

$$\Delta\psi(x,y) = \psi_2(x,y) - \psi_1(x,y). \quad [\text{radianes}] \quad (5.14)$$

La diferencia de fase $\Delta\psi(x,y)$ se sustituye en la ecuación (5.6) para determinar la distribución del índice de refracción de la llama. La distribución del índice de refracción de llama es sustituida en la ecuación (5.7) para determinar la distribución de temperatura.

5.5. Resultados

A través del análisis de Fourier deconvolucionamos los interferogramas de desplazamiento lateral. La figura 5.9.a nos muestra una fotografía convencional de la llama bajo estudio. La figura 5.9.b. es el interferograma de la llama. Ambas imágenes tienen la misma amplificación y nos indican los planos trans-axiales en que determinamos la distribución de temperatura de la llama. Los planos trans-axiales están definidos por las coordenadas cartesianas ($x, y=\text{constante}, z$) o por las coordenadas ($r, y=\text{constante}$).

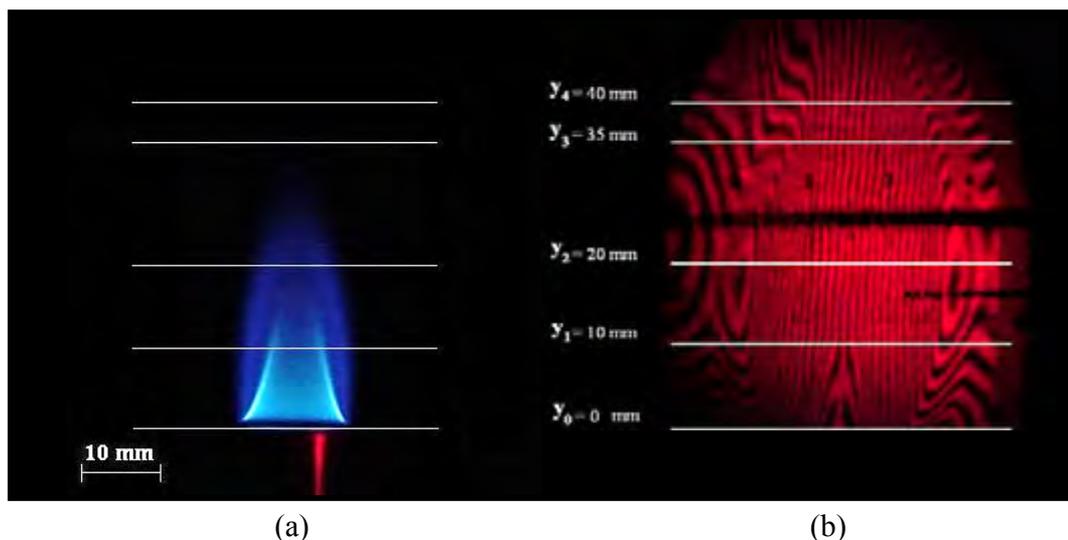


Figura 5.9. a) Fotografía de la llama que analizamos y b) Interferograma de la llama.

En el plano $y_4 = 40$ mm de la figura 5.9.a observamos que la llama no emite significativamente en la región visible del espectro. Sin embargo, en el mismo plano de la figura 5.9.b encontramos que los gases generados por la combustión producen una considerable deformación de las franjas de interferencia. La deformación de las franjas nos indica que la mezcla gaseosa tiene una temperatura mayor que la temperatura del aire que rodea a la llama. Consecuentemente verificamos que los gases calientes de la llama son transparentes en el visible; sin embargo su alta temperatura puede dañar a las personas y a los dispositivos cercanos.

En el análisis de temperatura usamos los parámetros mostrados en la tabla 5.1.

Parámetro	Símbolo	Valor
Temperatura ambiente	T_0	300 K
Presión atmosférica	P	1×10^5 Pa
Índice de refracción del aire	n_0	1.0
Refractividad molar del aire	A	5.9×10^{-6} m ³ /gmol
Constante universal de los gases	R	8.3 J/(gmol K)
Longitud de onda del láser	λ	632.8×10^{-9} m
Ángulo de incidencia sobre la placa plano-paralela	θ_i	45°
Espesor de la placa plano-paralela	t	5.0×10^{-3} m
Desplazamiento lateral	d	3.8×10^{-3} m

Tabla 5.1. Parámetros que usamos para calcular la distribución de temperatura de las llamas.

La composición química dentro de la llama es variable. Los principales compuestos químicos que encontramos dentro de la llama son el propano, el butano, el vapor de agua y el dióxido de carbono. En nuestro análisis consideramos que el índice de refracción promedio de la llama es aproximadamente unitario. Recordemos que también consideramos que la llama se comporta como un gas ideal.

Desarrollamos un programa en Mathcad que determina la diferencia de fase $\Delta\psi(x,y)$ y calcula la distribución de temperatura en los planos trans-axiales de la llama. Los interferogramas que analizamos son imágenes con una resolución de 640x480 píxeles y 256 niveles de gris. Analizamos los interferogramas mostrados en las figuras 5.4.b. y 5.9.b. El análisis de temperatura en los planos (r,y_1) , (r,y_2) , (r,y_3) y (r,y_4) de la llama produjo los resultados mostrados en la figura 5.10.

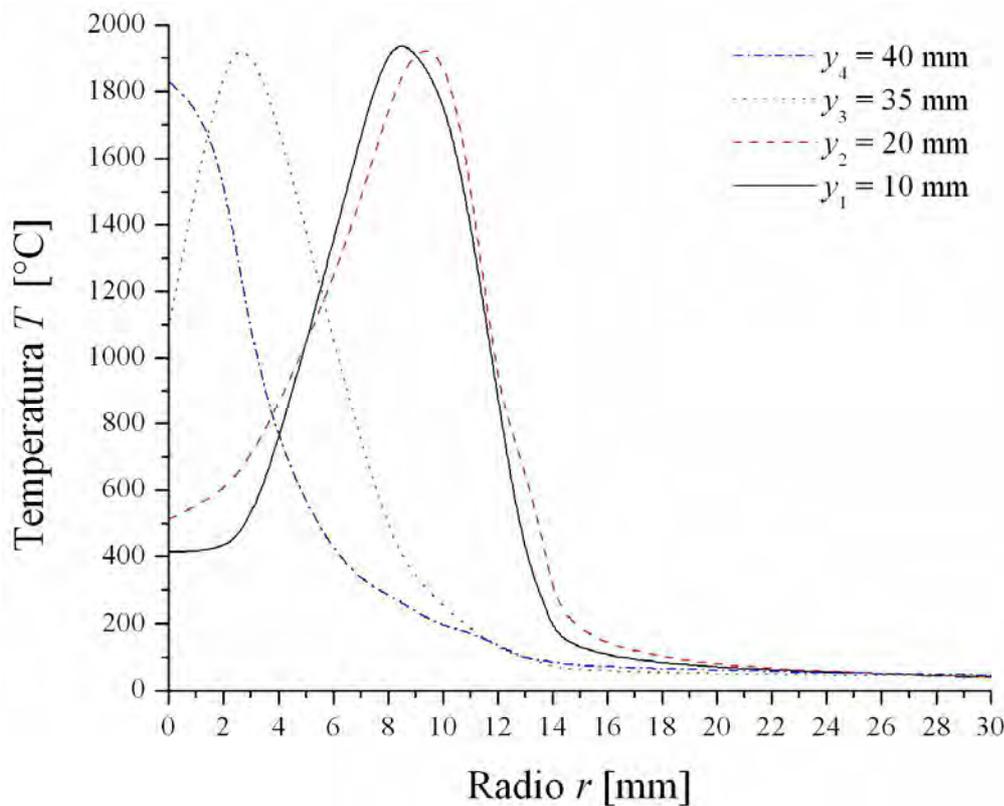


Figura 5.10. Distribución de temperatura de la llama en los planos $y_1 = 10$ mm, $y_2 = 20$ mm, $y_3 = 35$ mm y $y_4 = 40$ mm.

En la figura 5.10 observamos cuatro curvas que describen la distribución de temperatura en cuatro planos trans-axiales de la llama. Las distribuciones de temperatura en los planos y_1 , y_2 y y_3 tienen temperaturas máximas de 1957 °C, 1929 °C y 1963 °C, respectivamente. La temperatura máxima promedio de la llama es $T_{max} = 1950 \pm 18$ °C. La temperatura máxima en el plano y_4 es de 1833 °C. Esta última temperatura es inferior a la

temperatura máxima de la llama porque la superficie de la llama se encuentra por debajo, es decir, el plano y_4 no cruza la superficie de la llama.

En la figura 5.10 también observamos que para $r = 20$ mm, la temperatura de la llama es aproximadamente igual a la temperatura ambiental. En las distribuciones de temperatura también podemos observar que la zona de máxima temperatura se acerca al eje de la llama en planos trans-axiales más alejados de la boquilla del quemador.

Analizamos la tendencia de los radios en que se presenta la máxima temperatura de la llama en los planos y_1 , y_2 y y_3 . Determinamos el plano trans-axial en que la máxima temperatura se encuentra en $r = 0$ mm y además coincide con la temperatura máxima de la llama. Este plano determina la longitud de la llama. La longitud de llama que calculamos es $L_f = 37$ mm.

En planos trans-axiales más lejanos que la longitud de la llama, la temperatura máxima se localiza en $r = 0$ mm, pero es menor que la temperatura máxima de la llama. El plano y_4 es un ejemplo de este tipo de planos.

5.6. Conclusiones

Aplicamos la interferometría de desplazamiento lateral para determinar la distribución de temperatura y la longitud de las llamas axi-simétricas. Armamos un interferómetro de desplazamiento lateral que usa una placa plano-paralela como elemento divisor de haz. El arreglo experimental que usamos posee una configuración sencilla y sus elementos ópticos son económicos. La sensibilidad de nuestro interferómetro puede ser ajustada usando placas plano-paralelas con diferentes espesores, modificando el ángulo de incidencia del haz láser sobre la placa o usando una fuente de iluminación con longitud de onda apropiada.

Caracterizamos una llama que quema una mezcla aire-gas *LP*. Analizamos los interferogramas de desplazamiento lateral mediante una deconvolución numérica basada en la transformada de Fourier. El análisis de Fourier es capaz de determinar la distribución del índice de refracción en cualquier plano trans-axial de la llama. Transformamos la distribución del índice de refracción de la llama en una distribución de temperatura. La temperatura máxima que calculamos fue $T_{max} = 1950 \pm 18$ °C.

La temperatura adiabática de una llama que quema una mezcla aire-gas *LP* es $T_{ad} = 1995$ °C. Comparando la temperatura máxima de llama con la temperatura adiabática, concluimos que el porcentaje de error en la medición de la temperatura es del 2.2%. La temperatura máxima de llama que calculamos mediante la interferometría de desplazamiento lateral coincide razonablemente con la temperatura máxima de llama calculada mediante la termometría de doble longitud de onda.

Estimamos la longitud de la llama mediante el análisis de los picos de temperatura, el resultado fue $L_f = 37 \pm 2.5$ mm. La longitud teórica de la llama es $L_{f,T} = 35$ mm. Comparando el valor experimental con el valor teórico encontramos que el error en la medición de la longitud de la llama fue del 5.7%.

La principal fuente de error de nuestras mediciones radica en la resolución de las imágenes de los interferogramas. Si en nuestro interferograma digitalizado no es posible resolver todas las franjas de interferencia, entonces la diferencia de fase $\Delta\psi(x,y)$ será menor que la diferencia de fase real. Consecuentemente la temperatura calculada también será menor que la temperatura real de la llama.

Una de las limitaciones de la interferometría de desplazamiento lateral en la caracterización de las llamas es el tamaño relativo entre el haz colimado y la llama. Para analizar una llama completa, el haz debe iluminarla totalmente. Por consiguiente, el diámetro de la lente colimadora debe ser igual o mayor que el tamaño de la llama. Las llamas largas requieren de lentes colimadoras grandes y poco prácticas. Por otra parte, la metodología que usamos para extraer la fase de los interferogramas no es aplicable a franjas de contorno debido a que el algoritmo desarrollado no hace diferencia entre cambios de fase positivos y negativos.

Para facilitar la deconvolución numérica de los interferogramas recomendamos que las imágenes digitales de los patrones de interferencia tengan una resolución de 640x480 píxeles o superior.

CONCLUSIONES GENERALES

Desarrollamos una metodología de medición basada en la termometría de doble longitud de onda (*TDLO*) para caracterizar llamas axi-simétricas.

Con la metodología de medición basada en la *TDLO* determinamos la distribución de temperatura y la longitud de tres llamas. Las llamas queman mezclas de aire y gas *LP* con diferentes contenidos de aire primario. El error promedio en las mediciones de temperatura fue del 2.9%. A través de la *TDLO* también medimos la longitud de las llamas premezcladas. El error promedio en la medición de la longitud de estas llamas fue del 6.0%.

Considerando los espectros de emisión de las llamas que queman hidrocarburos, concluimos que los picos localizados en 469.14 nm y 514.89 nm tienen la misma emisividad.

Las desventajas de nuestra metodología de medición basada en la *TDLO* son la exploración puntual de la llama y la incapacidad para visualizar el manto de las llamas.

La segunda metodología de medición que desarrollamos esta basada en la interferometría de desplazamiento lateral (*IDL*). Esta metodología de medición es capaz de determinar la distribución de temperatura y la longitud de las llamas axi-simétricas. Además nos permite visualizar el manto de la llama.

Aplicando la *IDL* caracterizamos una llama premezclada que tiene una longitud teórica $L_{fT} = 35$ mm y quema una mezcla aire-gas *LP*. Determinamos su distribución de temperatura en cuatro planos trans-axiales y medimos su longitud. El error en la medición de la temperatura fue del 2.2%, mientras que el error en la medición de la longitud fue del 5.7%.

Usando la interferometría de desplazamiento lateral evitamos la exploración puntual de la llama y además podemos visualizar su manto.

Con base en el desempeño de las metodologías que desarrollamos, concluimos que la metodología de medición basada en la *IDL* es la alternativa más viable para diseñar y construir un instrumento de medición óptico.

TRABAJO A FUTURO

- Optimizaremos el desempeño de la metodología de medición basada en la *TDLO* incrementando la resolución del sistema de exploración.
- Mejoraremos el desempeño de la metodología de medición basada en la *IDL*.
 - Minimizaremos los errores de medición usando imágenes de interferogramas con una resolución mayor que 640x480 píxeles.
 - Realizaremos un análisis bidimensional de los interferogramas.
- Diseñaremos y construiremos un instrumento de medición capaz de operar en condiciones industriales.

REFERENCIAS

1. Energy information administration, <http://www.eia.doe.gov/> (2006).
2. S. Turns, *An introduction to combustion: concepts and applications*, 2nd Ed., Mc Graw Hill, New York (2000).
3. G. Borman, and K. Ragland, *Combustion Engineering*, Mc Graw Hill, New York (1998).
4. R. Perry, and H. Green, *Handbook of chemical engineering*, Mc Graw Hill, New York, (1984).
5. *Oil & Gas Journal*, Vol. 97, No. 51 (2006).
6. F. Roper, "The prediction of laminar yet diffusion flame sizes: part I. Theoretical model," *Combust. Flame* **29**, 219-226 (1977).
7. F. Roper, C. Smith, and A. Cunninham, "The prediction of laminar yet diffusion flame sizes: part II. Experimental verification," *Combust. Flame* **29**, 227-234 (1977).
8. F. Roper, "Laminar diffusion flame sizes for curved slot burners giving fan shaped flames," *Combust. Flame* **31**, 251-259 (1978).
9. P. Kruse, L. McGlauchlin, and R. McQuistan, *Elements of infrared technology: generation, transmission, and detection*, John Wiley & Sons, New York (1963).
10. G. Herzberg, *Spectra of diatomic molecules*, 2nd Ed., Van Nostrand Reinhold Company, New York (1950).
11. G. Zizak, *Flame emission spectroscopy: Fundamentals and applications*, Lecture given at the ICS training course on laser diagnostics of combustion processes, NILES, University of Cairo, Egypt, 18-22 Nov. (2000).
12. C.F. Kaminski, X.S. Bai, J. Hult, A. Dreizler, S. Lindenmaier, and L. Fuchs, "Flame growth and wrinkling in a turbulent flow," *Appl. Phys. B* **71**, 711-716 (2000).
13. B. H. Timmerman, P. J. Bryanston-Cross, and P. Dunkley, *Optical measurement techniques in engines: PIV and OET*, 16th Symposium on measuring techniques in transonic and supersonic flow in cascades and turbo-machines, Cambridge, UK (2002).

14. G. Denardo, *An overview of some methods for laser diagnostics of flames*, UK (2002).
15. E. Hecht, *Óptica*, third edition, Addison Wesley, Madrid (2000).
16. H. Uchiyama, M. Nakajima, and S. Yuta, "Measurement of flame temperature distribution by IR emission computed tomography," *Appl. Opt.* **24**, 4111-4116 (1985).
17. O. Kafri, and I. Glatt, *The physics of Moiré metrology*, Wiley series in pure and applied optics, New York, (1990).
18. K. Paturski, *Handbook of the Moiré fringe technique*, Elsevier, The Netherlands, (1993).
19. E. Keren, E. Bar-Ziv, I. Glatt, and O. Kafri, "Measurements of temperature distribution of flames by moiré deflectometry," *Appl. Opt.* **20**, 4263-4266 (1981).
20. E. Bar-Ziv, S. Sgulim, O. Kafri and E. Keren, "Temperature mapping in flames by moiré deflectometry," *Appl. Opt.* **22**, 698-705 (1983).
21. A. Agrawal, B. Albers, and D. Griffin, "Abel inversion of deflectometric measurements in dynamic flows," *Appl. Opt.* **38**, 3394-3398 (1999).
22. K. C. Lapworth, "Spectroscopic temperature measurements in high temperature gases and plasmas," *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **7**, 413-420 (1974).
23. D. B. Vaidya, J. J. Horvath, and A. E. S. Green, "Remote temperature measurements in gas and gas-coal flames using the OH (0,0) middle-UV band," *Appl. Opt.* **21**, 3357-3362 (1982).
24. L. Radziemski, R. Solarz, and J. Paisner, *Laser spectroscopy and its applications*, Marcel Dekker, Inc., New York, (1987).
25. R. A. Cheville, and D. Grischkosky, "Far infrared terahertz time domain spectroscopy of flames," *Opt. Lett.* **20**, 1646-1648 (1995).
26. J. Wolfrum, *Advanced Laser Spectroscopy in combustion diagnostics*, *IFRF Combustion Journal*, Article number 200307 (2003).
27. J. Lakowicz, *Principles of fluorescence spectroscopy*, 2nd Ed., Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, (1999).

28. J. H. Bechtel, "Temperature measurements of the hydroxyl radical and molecular nitrogen in premixed laminar flames by laser techniques," *Appl. Opt.* **18**, 2100-2106 (1979).
29. J. Bradshaw, N. Omenetto, G. Zizak, J. Bower, and J. Winefordner, "Five laser-excited fluorescence methods for measuring spatial flame temperatures. 1: Theoretical basis," *Appl. Opt.* **19**, 2709-2716 (1980).
30. G. Zizak, N. Omenetto, and J. Winefordner, "Laser-excited atomic fluorescence techniques for temperature measurements in flames: a summary," *Opt. Eng.* **23**, 749-755 (1984).
31. G. Zizak, F. Cignoli, and S. Benecchi, "Spatially resolved saturated absorption measurements of OH in methane-air flames," *Appl. Opt.* **19**, 4293-4297 (1987).
32. K. Hohse-Höinghaus, "Quantitative laser induced fluorescence: some recent developments in combustion diagnostics," *Appl. Phys. B* **50**, 455-461 (1990).
33. J. Goodman, *Introduction to Fourier optics*, Mc Graw Hill, New York (1968).
34. R. Bracewell, *The Fourier transform and its applications*, Mc Graw Hill, New York (2000).
35. H. Philipp, H. Fuchs, E. Winklhofer, and G. Pretzler, "Flame diagnostics by light sheet imaging and by shearing interferometry," *Opt. Eng.* **32**, 1025-1032 (1993).
36. M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," *J. Opt. Soc. Am.* **72**, 156-160 (1982).
37. D. Bone, H. Bachor, and R. Sandeman, "Fringe-pattern analysis using a 2-D Fourier transform," *Appl. Opt.* **25**, 1653-1660 (1986).
38. D. Robinson, and G. Reid, *Interferogram analysis: digital fringe pattern measurement techniques*, IOP Publishing, Great Britain, (1993).
39. M. Kalal, and K. Nugent, "Abel inversion using Fast Fourier transforms," *Appl. Opt.* **27**, 1956-1959 (1988).
40. G. Holst, *Common sense approach to thermal imaging*, SPIE Press, Florida (2000).
41. P. Singh, M. Faridi, and C. Shakher, "Measurement of temperature of an axisymmetric flame using shearing interferometry and Fourier fringe analysis technique," *Opt. Eng.* **43**, 387-392 (2004).
42. F. Weinberg, *Optics of flame*, Butterworth, London (1963).

43. C. Vest, *Holographic interferometry*, Wiley, New York (1979).
44. D. Resuses, "Temperature measurement in a radially symmetric flame using holographic interferometry," *Combust. Flame* **49**, 207-209 (1983).
45. P. Farrel, G. Springer, and C. Vest, "Heterodyne holographic interferometry, concentration and temperature measurement in gas mixtures," *Appl. Opt.* **21**, 1624-1627 (1982).
46. N. Formin, E. Lavinskaya, and D. Vitkin, "Speckle tomography of turbulent flow with density fluctuations," *Exp. Fluids* **33**, 160-169 (2002).
47. P. Farrel, and D. Hofeldt, "Temperature measurement in gases using speckle photography," *Appl. Opt.* **23**, 1055-1059 (1984).
48. C. Shakher, A. Nirala, J. Pramila and S. Verma, "Use of speckle technique for temperature measurement in gaseous flame," *J. Opt. (Paris)* **23**, 35-39 (1992).
49. C. Shakher, and A. Nirala, "Measurement of temperature using speckle shearing interferometry," *Appl. Opt.* **33**, 2125-2127 (1994).
50. Y. Nakano, and K. Murata, "Measurement on phase objects using the Talbot effect and a moiré technique," *Appl. Opt.* **23**, 2296-2299 (1984).
51. C. Shakher, A. Nirala, and A. Daniel, "Talbot interferometry with circular grating for the measurement of temperature in axisymmetric gaseous flames," *Appl. Opt.* **33**, 6068-6072 (1994).
52. M. Thakur, A. Vyas, and C. Shakher, "Measurement of temperature profile of an axisymmetric gaseous flame using Lau phase interferometer with linear gratings," *Opt. Laser Eng.* **36**, 373-380 (2001).