

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:
Luis E. Arias Parada PhD.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:
Ingeniero Civil en Telecomunicaciones

**Estimación de Temperatura de Llamas a
Hidrocarburos Usando Mediciones Espectrales
en el SWIR y Ley de Desplazamiento de Wien.**

Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Luis E. Arias Parada PhD.

ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA DE LLAMAS A HIDROCARBUROS USANDO MEDICIONES ESPECTRALES EN EL SWIR Y LEY DE DESPLAZAMIENTO DE WIEN.

Víctor Ignacio Montalba Vásquez.

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil en Telecomunicaciones

Julio de 2022

Resumen

En la presente memoria de título se desarrolla un método para estimar temperatura de una llama a hidrocarburos a través de su espectro de emisión en el rango del SWIR, 1050-2500 nm , utilizando la ley de desplazamiento de Wien. Esto, como un método alternativo y más confiable al método de dos longitudes de onda.

El método se basó en que el peak de emisión de una llama a hidrocarburos sucede en el rango del SWIR por lo que, a través de la ley de desplazamiento de Wien que, relaciona la temperatura en la que se encuentra un cuerpo con la longitud de onda donde sucede su peak de emisión, es posible determinar la temperatura a la que se encuentra la llama.

Para la adquisición de espectros se utilizó el espectrofotómetro ATP 8000 de *Optosky* y como target, la llama generada a gasóleo por el quemador de un sobrecalentador perteneciente al laboratorio de Termofluidos, de ingeniería mecánica.

Los espectros adquiridos fueron calibrados y procesados para el posterior cálculo de temperatura con la aproximación de la curva adquirida con la curva de cuerpo negro con la métrica GFC a través de Matlab. Los resultados fueron comparados con espectros adquiridos en el visible con un espectrómetro flame de *Ocean optics* y posterior cálculo de temperatura con el método de dos longitudes de onda.

De los resultados, se pueden notar similitudes en la variación de temperatura para ambos métodos. En general, se observó una tendencia al ascenso al ir aumentando el caudal de combustible (aire) en el quemador, lo que da indicios de una combustión gradualmente más completa.

Los resultados del proyecto brindan la base para perfeccionar un método que permita estimar temperatura en base a una ley física y no bajo la suposición errónea de considerar la emisividad bajo ciertos parámetros constante, como lo hace el método de dos longitudes de onda que es el más utilizado en la actualidad.

Agradecimientos

A Dios, a mis padres, hermana, tía y abuela por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida y en especial en esta etapa universitaria. Estoy infinitamente agradecido y sin duda, no estaría aquí sin ustedes.

También agradecer a todos los amigos que hice en el trayecto que hicieron más llevadero y por qué no, cómico los diversos ramos que dimos juntos. Pedro, Mapache, Nico, Jonny, Sebaja, Claudio, Gonzalo (alias primo) y Cristobal éxito en su futuro, sé que serán grandes profesionales.

Finalmente, me gustaría agradecer al profesor Luis Arias por enseñarme a ser un mejor profesional y también una mejor persona, brindando calma en momentos donde el proyecto se volvía difícil. También agradecer a Don Luis y Don José, que amablemente me ayudaron cada vez que lo necesité.

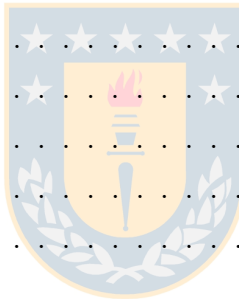
Gracias a todos.

Índice General

Resumen	I
Agradecimientos	II
Índice de Figuras	V
1. Introducción	1
1.1. Hipótesis de Trabajo	4
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo General	4
1.2.2. Objetivo específico	4
1.3. Alcances y Limitaciones	5
1.4. Metodología	5
2. Marco Teórico	7
2.1. Espectro electromagnético	7
2.2. Short-Wave Infrared (SWIR)	7
2.3. Radiometría	8
2.3.1. Ángulo sólido	8
2.3.2. Intensidad radiante	9
2.3.3. Irradiancia	9
2.3.4. Energía radiante	10
2.3.5. Radiancia	10
2.3.6. Flujo Radiante	10
2.4. Radiación de Cuerpo Negro	11
2.5. Postulados	11
2.5.1. Ley de Planck	11
2.5.2. Ley de Wien	12
2.6. Método de dos longitudes de ondas	12
2.7. Espectrómetro	13
2.8. Tópicos de Combustión	14
2.9. Espectroscopía de llama	16
2.10. Goodness-of-fit Coefficient (GFC)	17

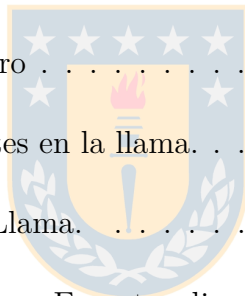


3. Desarrollo Experimental	18
3.1. Instrumentos a utilizar	18
3.1.1. Espectrofotómetro ATP 8000:	18
3.1.2. Lente colimador	19
3.1.3. Fuente de alimentación Radiométrica	20
3.1.4. Lámpara halógena de tungsteno de cuarzo	20
3.2. Montaje del Set-up Laboratorio SP&R	21
3.3. Estudio del Espectrofotómetro	22
3.3.1. Ruido ATP 8000	22
3.3.2. Comportamiento de la Temperatura	24
3.4. Vector de calibración	26
4. Adquisición y Procesamiento de Datos	29
4.1. Experiencia en Termofluidos	29
4.1.1. Set-up óptico en Sobrecalentador	30
4.1.2. Mediciones	32
4.2. Estimación de Temperatura	35
4.3. Validación de Temperatura	39
4.3.1. Medición en el VIS	39
4.3.2. Medición en el SWIR	43
5. Conclusiones	47



Índice de Figuras

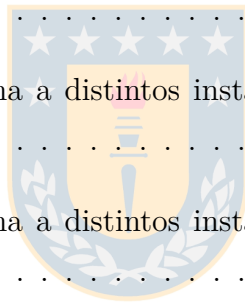
1.1. Diagrama de la metodología del proyecto.	6
2.1. Espectro electromagnético	7
2.2. Rango espectral del SWIR.	8
2.3. Concepto de ángulo sólido	9
2.4. Irradiancia	10
2.5. Radiación de cuerpo negro a distintas temperaturas	12
2.6. Función interna espectrómetro	13
2.7. Tipos de combustión presentes en la llama.	15
2.8. Zonas identificables de una Llama.	15
2.9. Espectro continuo <i>Oil Flame</i> vs Espectro discontinuo <i>Gas Flame</i>	17
3.1. Espectrofotómetro OptoSky ATP 8000.	18
3.2. Performance Parameters Spectrophotometer ATP 8000	19
3.3. Lente colimador.	19
3.4. 69931 Digital Radiometric Power Supply.	20
3.5. 63350 - 1000W QTH Source Lamp.	20
3.6. Irradiance Lamp QTH.	20
3.7. Set-up óptico vista frontal.	21
3.8. Set-up óptico vista lateral.	21



3.9. Interfaz <i>Optosky Spectra V3.1.26</i>	22
3.10. Espectro adquirido en cuentas de la luz ambiente del laboratorio.	22
3.11. Comparación de espectros adquiridos en cuentas al utilizar la función Dark Spectrum Deducted On vs Dark Spectrum Off.	23
3.12. Ruido presente en el espectrofotómetro en el tiempo.	23
3.13. Potencia del Ruido presente en el espectrofotómetro en el tiempo.	24
3.14. Estabilización de la temperatura establecida 10 minutos posteriores al encendido del espectrofotómetro.	25
3.15. Estabilización de la temperatura establecida 20 minutos posteriores al encendido del espectrofotómetro.	25
3.16. Estabilización de la temperatura establecida 30 minutos posteriores al encendido del espectrofotómetro.	25
3.17. Estabilización de la temperatura establecida 40 minutos posteriores al encendido del espectrofotómetro.	25
3.18. QTH Lamp Spectral Irradiance [No acotado].	27
3.19. QTH Lamp Spectral Irradiance [Acotado]	27
3.20. Espectro adquirido en cuentas por ATP 8000	27
3.21. Vector de Calibración obtenido.	28
4.1. Sobrecalentador vista posterior.	29
4.2. Sobrecalentador vista frontal.	29
4.3. Quemador G.-TN.S.CL.A.	30
4.4. Set-up óptico para la adquisición de espectros reales.	31
4.5. Configuración Set-up óptico para la adquisición del espectro real de una llama a hidrocarburos.	32

4.6. LLama del quemador.	32
4.7. Espectros adquiridos en cuentas en distintos instantes temporales con un 12 % de caudal de aire.	33
4.8. Espectros adquiridos en cuentas en distintos instantes temporales con un 25 % de caudal de aire.	33
4.9. Espectros adquiridos en cuentas en distintos instantes temporales con un 38 % de caudal de aire.	33
4.10. Espectros adquiridos en cuentas en distintos instantes temporales con un 50 % de caudal de aire.	33
4.11. Espectros adquiridos en cuentas en distintos instantes temporales con un 65 % de caudal de aire.	34
4.12. Irradiancia espectral de llama a distintos instantes temporales con un 12 % de caudal de aire.	34
4.13. Irradiancia espectral de llama a distintos instantes temporales con un 25 % de caudal de aire.	34
4.14. Irradiancia espectral de llama a distintos instantes temporales con un 38 % de caudal de aire.	35
4.15. Irradiancia espectral de llama a distintos instantes temporales con un 50 % de caudal de aire.	35
4.16. Comparación espectro adquirido y calibrado <i>vs</i> curva de cuerpo negro aproximada por GFC.	36
4.17. Variación de temperatura por muestras adquiridas según nivel de comburente. . .	38
4.18. Espectrómetro Flame.	40
4.19. Lamp HL 2000.	40
4.20. Fibra Óptica VIS/NIR.	40
4.21. Set-up óptico implementado para mediciones en el VIS.	41

4.22. Espectros adquiridos y calibrados en el rango visible considerando un 12 % de caudal de comburente.	41
4.23. Espectros adquiridos y calibrados en el rango visible considerando un 25 % de caudal de comburente.	41
4.24. Espectros adquiridos y calibrados en el rango visible considerando un 38 % de caudal de comburente.	42
4.25. Espectros adquiridos y calibrados en el rango visible considerando un 50 % de caudal de comburente.	42
4.26. Variación de temperatura por muestras adquiridas según nivel de comburente utilizando pirometría de dos colores.	42
4.27. Irradiancia espectral de llama a distintos instantes temporales con un 25 % de caudal de aire.	43
4.28. Irradiancia espectral de llama a distintos instantes temporales con un 38 % de caudal de aire.	43
4.29. Irradiancia espectral de llama a distintos instantes temporales con un 65 % de caudal de aire.	44
4.30. Variación de temperatura por muestras adquiridas según nivel de comburente. . .	46



1. Introducción

En la naturaleza todo cuerpo emite radiación debido a la condición de equilibrio térmico. Esto significa que, todo cuerpo cuya temperatura es mayor al cero absoluto (0 K; -273 °C) emite radiación la cual puede ser medida en el espectro electromagnético. El estudio de los cuerpos a altas temperaturas ha sido históricamente de gran interés, producto de su aporte energético. Por otro lado, los combustibles fósiles, compuestos por hidrocarburos, son usados como la principal fuente energética llegando a ser el 80 % del suministro total de la energía, donde, para realizar la transferencia de energía desde este tipo de combustible, es necesario el proceso de combustión. El uso de los combustibles fósiles tiene la ventaja de una mayor densidad energética cuantificada a través de la energía suministrada por unidad de volumen [1].

La llama producida en dichos procesos de combustión son un caso particular de cuerpos a altas temperaturas. Esta, al ser un proceso utilizado a nivel industrial ha llevado a que muchos autores dediquen sus trabajos a la caracterización espectral de la llama. En [2], se realizó una investigación a modo de optimizar el diagnóstico de la combustión en equipos industriales a partir de indicadores espectrales sobre la llama (emisiones discontinuas). Para dicho estudio se trabajó en el rango visible con un arreglo de fotodiodos de respuesta espectral comprendida en 380 – 1200 *nm* en donde la llama de interés estaba en ambientes confinados y no confinados, utilizando diferentes niveles de aire. Los resultados obtenidos se compararon con un espectrómetro USB2000 con una respuesta espectral entre 350-1100 *nm*. Se concluyó que para llamas de hidrocarburos se poseen emisiones específicas de radicales, C_2 y CH tanto en ambientes confinados como no confinados. Para llamas de gas la razón entre C_2/CH es un buen indicador para el estado de la combustión lo que permite predecir el punto óptimo de aire y para llamas a petróleo se recomienda el control de la combustión en base a las emisiones de hollín.

Otro estudio es el presentado en [3] en donde se explicó la necesidad de aplicar estrategias de control de combustión. En dicha investigación el autor presentó una técnica de espectroscopía para analizar los espectros de emisión adquiridos por un arreglo CCD con una respuesta espectral entre 200–1100 *nm* a modo de poseer un criterio para el diagnóstico de la combustión. En los espectros adquiridos se evidenciaron discontinuidades debido a la presencia de carbón, hollín y cenizas. Se concluyó que a través de las líneas espectrales se puede realizar un diagnóstico de la combustión y que el espectro de emisión de la llama depende principalmente del tipo de combustible y la temperatura que esté.

La tendencia a estudiar la emisión producida por una llama en el rango visible a través de cámaras CCD y espectrómetros tiene una razón de ser y es que, el costo monetario asociado a este rango espectral es bastante bajo. Sin embargo, hay autores que han llevado dicho estudio a otras bandas espectrales. Tal es el caso presentado en [4] donde se estudió la emisión espectral de una llama emitida por la quema de biomasa de diferentes especies de madera en el rango visible y en el NIR (Near-infrared), rango espectral comprendido de 750–1700 *nm*. Cada rango espectral posee un objetivo específico, en el visible para identificar las diferentes especies de biomasa y en el NIR, para la identificación de los de los diversos niveles de humedad para las diferentes especies de madera. Se concluyó que, a través de las diversas intensidades en las bandas de emisión producidas en el visible, 780*nm* (Potasio) y 590*nm* (sodio), es posible clasificar las muestras de biomasa. Por otro lado, al estudiar las características espectrales en el NIR para las diversas especies de madera, pudieron determinar un nuevo método para estimar el contenido de agua en estas utilizando el espectro de emisión de la madera.

Los diversos estudios sobre la caracterización espectral de la llama han permitido, a partir de la ecuación de Planck y la aproximación de la emisividad en llamas en hidrocarburos, determinar la temperatura de un cuerpo a través de su espectro de emisión tal es el caso visto en [5] donde los autores presentaron la problemática para la determinación de la temperatura de un cuerpo que emite con espectro continuo a alta velocidad. Esto debido a que en esos años las mediciones se realizaban bajo el concepto de un estado estacionario, el cual no es preciso y no debe ser utilizado en mediciones rápidas debido a su tiempo de retraso. Lo importante de este artículo es que está orientado a un desarrollo posterior de un método sin contacto para medir temperatura utilizando la ley de desplazamiento de Wien. Además, considera que las llamas luminosas emiten radiación en un espectro continuo similar a la radiación de un cuerpo sólido y que, bajo ciertos parámetros estas puede poseer una universalidad similar a la de un cuerpo negro.

El avance a través de los años demostró que el método más utilizado para estimar temperatura sin contacto corresponde al método de dos longitudes de onda [6, 7, 8, 9, 10] también conocido como la pirometría de dos colores y es que, dicho método puede ser trabajado en el rango visible y tal como se mencionó previamente los costos son menos elevados. Este método basa su funcionamiento en la suposición de que la emisividad para dos longitudes de onda muy cercanas entre si se puede considerar constante. Ejemplo de esto puede verse en [5] donde los autores investigaron la aplicabilidad de un método de medición de temperatura y emisividad mediante un análisis espectral en un incinerador. En esta investigación se utilizó el método de dos longitudes de onda y la condición de suponer que el cambio de emisividad para dos longitudes de onda satisface cierta regularidad, en este estudio se consideró una distancia de 3

nm.

Sin embargo, la suposición de emisividad constante en la que se basa el método de dos longitudes de onda no es precisa[11] puesto que, no es posible determinar si una de las longitudes de onda seleccionada está experimentando algún fenómeno de absorción o emisión producto de alguna descomposición molecular.

En este trabajo se presenta una manera alternativa al método de dos longitudes de onda, para calcular temperatura, estudiando la emisión espectral de una llama a hidrocarburos en el rango del SWIR (Short-Wave Infrared), 1050 - 2500 nm , a través del espectrofotómetro ATP 8000 de *Optosky* y estimando su temperatura a través del modelo de Planck y la ley desplazamiento de Wien.



1.1. Hipótesis de Trabajo

Es posible estimar la temperatura de una llama a hidrocarburo en base a su espectro de emisión producido en la banda del SWIR (1050 - 2500 nm) utilizando la ley de desplazamiento de Wien, como un método más confiable al método de dos longitudes de ondas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es la estimación de temperatura de llama de hidrocarburos, utilizando la ley de desplazamiento de Wien en el rango SWIR.

1.2.2. Objetivo específico

- Estudiar la ley de desplazamiento de Wien a partir del modelo de radiación de Planck, para el cálculo de temperatura.
- Realizar la calibración del espectrofotómetro ATP 8000 de Optosky, para obtener mediciones radiométricas ($mW/cm^2 \cdot nm$).
- Montar el set-up experimental y realizar mediciones espectrales sobre llamas a gasóleo en el rango espectral SWIR a diversos caudales de comburente.
- Realizar el ajuste de curva de las mediciones adquiridas a través de la métrica GFC y el modelo de plack.
- Estimar temperatura a través de la ley de Wien.
- Validar las temperaturas estimadas con mediciones realizadas en el visible utilizando el método de dos longitudes de onda al mismo quemador.



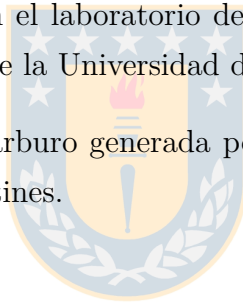
1.3. Alcances y Limitaciones

Los alcances del proyecto son:

- Generar de una base de datos espectrales con mediciones de espectros de llamas de hidrocarburos.
- Estimar temperatura a través de la ley de Wien.

Las limitaciones del proyecto son:

- La calibración del espectrofotómetro ATP 8000 se realizará en el laboratorio SP&R del departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad de Concepción.
- Las mediciones se realizarán en el laboratorio de termofluidos perteneciente al departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de Concepción.
- Se utilizará la llama de hidrocarburo generada por un quemador alimentado a diesel de un sobrecalentador de 8 serpentines.



1.4. Metodología

El desarrollo del proyecto consta en primer lugar de montar un set-up óptico en el laboratorio SP&R perteneciente al departamento de ingeniería eléctrica. En esta etapa, se estudiará el comportamiento del ruido y temperatura del espectrofotómetro ATP 8000 de *Optosky* esto pues, el instrumento es una nueva adquisición del laboratorio. Luego, se realizará su respectiva calibración utilizando una lámpara QTH (Quartz Tungsten Halogen) del proveedor *newport*. Con esto, los espectros adquiridos estarán en términos radiométricos y no en cuentas digitales, que carecen de un sentido físico.

La segunda etapa, consta de implementar el set-up en un sobrecalentador perteneciente al laboratorio de termofluidos del departamento de ingeniería mecánica. De esta manera, se podrá adquirir el espectro real de una llama a hidrocarburos emitido por el quemador a gasóleo del sobrecalentador.

Las mediciones a realizar consideran diferentes caudales de aire para poseer diversos espectros de emisión de la llama a hidrocarburos. Posterior a esto, se realizará la calibración de las mediciones adquiridas a través de matlab para luego, utilizar la métrica GFC para aproximar el espectro adquirido a una curva modelada por el modelo de plank. De esta manera, a través de la aproximación se le podrá asociar una temperatura a la muestra adquirida.

Finalmente, las mediciones en cuentas, calibradas y sus respectivas temperaturas serán almacenada en una base de datos espectrales.

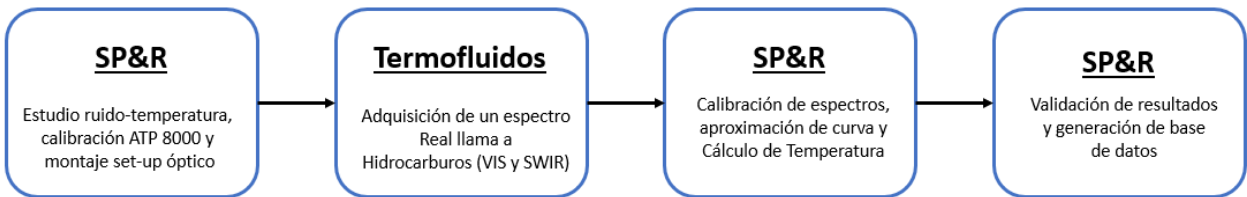


Fig. 1.1: Diagrama de la metodología del proyecto.



2. Marco Teórico

En este capítulo se presenta la base teórica implicada en el correcto desarrollo del proyecto. Este apartado contempla principalmente aspectos relacionados a la ciencia de la Radiometría y con ello, parámetros importantes a considerar. Por otro lado, se revisan conceptos relacionado al proceso de la combustión y a la llama en sí misma.

2.1. Espectro electromagnético

En palabras sencillas, el espectro electromagnético es el conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas del entorno que nos rodea. La figura [??] presenta cómo está compuesto.

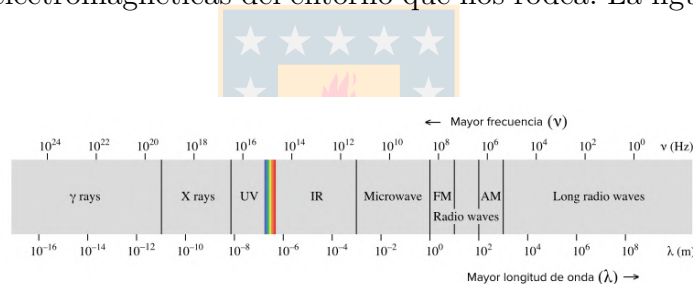


Fig. 2.1: Espectro electromagnético

Cabe destacar que, el espectro visible está comprendido de 380 [nm] a 750 [nm] aprox. Por lo que, mucho de los fenómenos son imperceptibles para el ojo humano. Esto, ha generado la motivación para el estudio de otras bandas espectrales que a su vez, ha permitido el desarrollo para medicina, procesos industriales, minería, etc.

2.2. Short-Wave Infrared (SWIR)

Corresponde a intensidad radiante contenida en el rango espectral de 0.9 a 1.7 μm , pero también puede ser clasificado desde los 0.7 a 2.5 μm . Para trabajar en dicho rango espectral es necesario trabajar con óptica especial y con componentes electrónicos capaces de funcionar en el SWIR (Dado que los sensores de silicio tienen un límite superior de 1.0 μm). En esto último destacan los detectores de *InGaAs* que pueden comprender un rango espectral desde los 550 nm

hasta los $2.5 \mu m$.

Algunas de las aplicaciones que se pueden realizar en este rango espectral corresponde a inspección de placas electrónicas, celdas solares, control de calidad de procesos, entre otras.

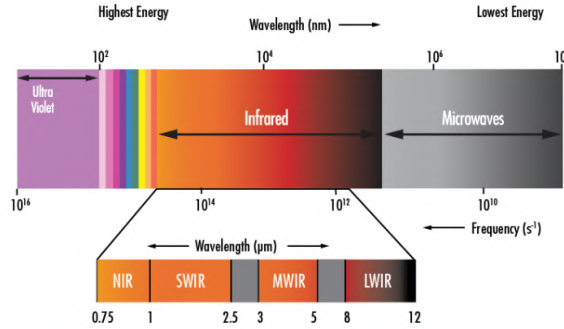


Fig. 2.2: Rango espectral del SWIR.

2.3. Radiometría

La radiometría es la ciencia encargada de la medición de la energía de radiación electromagnética no coherente de todo el espectro electromagnético. Es la ciencia que trata con las leyes que gobiernan la transferencia de radiación óptica desde un lugar a otro. Esta, implica un análisis de las características espectrales y espaciales de fuentes de radiación, camino óptico, detector y el target que interactúa con la radiación de una fuente (emisor de radiación). Los parámetros estudiados por la radiometría corresponden a:

2.3.1. Ángulo sólido

Denota el ángulo espacial que abarca un objeto visto desde un punto dado, que se corresponde con la zona del espacio limitado por una superficie cónica (Fig. [3.12]). Este, se mide en esterorradianes y está definido como:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (2.1)$$

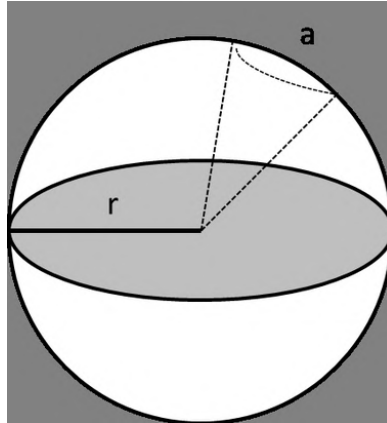


Fig. 2.3: Concepto de ángulo sólido
[12]

2.3.2. Intensidad radiante

Corresponde al flujo radiante por unidad de ángulo sólido en una dirección determinada.

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \left[\frac{W}{sr} \right] \quad (2.2)$$

Si I adquiere un valor constante se dice que la fuente óptica es isotrópica y con esto, que emite luz igualmente en todas direcciones. Sin embargo, para la mayoría de las fuentes luminosas reales es una función fuertemente dependiente de la dirección.

2.3.3. Irradiancia

La irradiancia [13] es la densidad de flujo radiante por unidad de superficie que incide sobre una superficie específica (Véase Fig.[2.4]). En esta, se deben incluir todas las direcciones comprendidas en el ángulo sólido. Además, su expresión está dada por:

$$E = \frac{d\Phi}{dS_0} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.3)$$

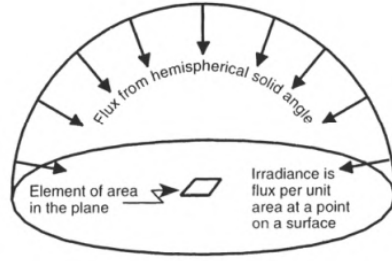


Fig. 2.4: Irradiancia
[13]

2.3.4. Energía radiante

Se define como la cantidad de energía que incide sobre una superficie de área en un periodo de tiempo dado [13]. Cabe destacar que, se incluyen todas las longitudes de ondas contenidas en la radiación y que caso distinto, se debe definir explícitamente el rango de $\Delta\lambda$. A su vez, este parámetro se mide en Joules.



2.3.5. Radiancia

Corresponde a la densidad de flujo radiante por unidad de área y de ángulo sólido incidente en un elemento de superficie centrado en un punto en el espacio que se propaga en una dirección específica [13].

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\omega ds} = \frac{d^2\Phi}{d\omega ds_0 \cos \theta} \left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right] \quad (2.4)$$

Donde el término d_s corresponde al área proyectada.

2.3.6. Flujo Radiante

Se define como el total de energía radiante emitida por una fuente óptica o recibida por un *Target* en un periodo de tiempo. O bien, como el cociente entre la energía en forma de radiación por unidad de tiempo.

$$\phi = \frac{dQ}{dt} [W] \quad (2.5)$$

2.4. Radiación de Cuerpo Negro

Un cuerpo negro, BB [14], es definido como un cuerpo capaz de absorber toda la radiación incidente del medio externo sobre él y que, en equilibrio térmico posee una nula radiación espectral. Ahora, para un cuerpo real la situación cambia. La energía proveniente del medio puede ser reflejada, absorbida y/o transmitida. Además, cuando un cuerpo real posee una temperatura mayor que su entorno, se enfriará a modo de llegar al equilibrio térmico, es decir, radiará energía. Este proceso es caracterizado por la emisividad del cuerpo y es definida como la razón entre la radiación térmica de un cuerpo real y la radiación térmica de cuerpo negro a una misma temperatura.

$$\varepsilon = \frac{E_{cuerpo}}{E_{BB}} \quad (2.6)$$

Con esto, se concluye que la emisividad comprende valores entre 0 y 1. A su vez, otro aspecto importante a destacar es que el BB poseerá mayor radiación que cualquier cuerpo real presente en la naturaleza.



2.5. Postulados

2.5.1. Ley de Planck

Entrega una relación para determinar la radiación de BB para un cuerpo que se encuentra a una temperatura T :

$$R_{BB}(\lambda, T) = \frac{1}{\lambda^5} \cdot \left(\frac{C_1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \right) \quad (2.7)$$

Donde:

- C_1 y C_2 corresponden a las constantes de plank.
- λ corresponde a la longitud de onda.
- T corresponde a la temperatura absoluta.

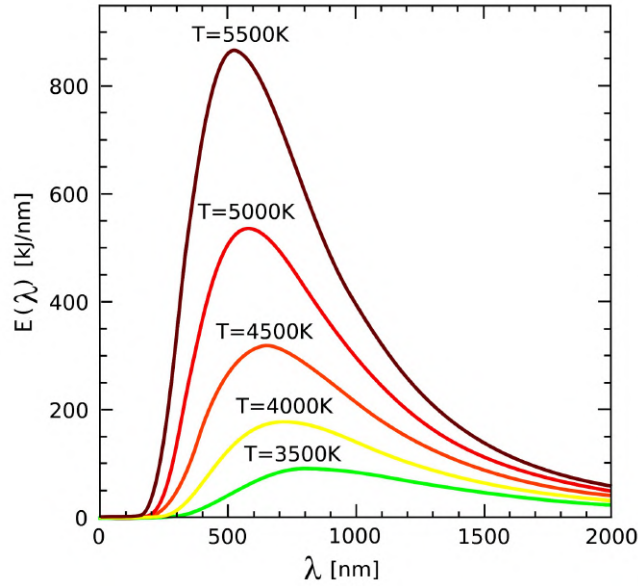


Fig. 2.5: Radiación de cuerpo negro a distintas temperaturas

Ahora, si se utiliza la relación de emisividad vista en (2.6) en (2.7), se puede calcular la radiación para cualquier cuerpo real.



2.5.2. Ley de Wien

La ley de Wien es una ley física que especifica una relación inversa entre la longitud de onda en la que un cuerpo produce su peak de emisión y su respectiva temperatura. En otras palabras, al ir aumentando la temperatura del cuerpo, su λ_{Peak} se desplaza a longitudes de ondas más cortas. Esta ley se obtiene a partir de la derivada de la ecuación de Planck [6]. Así, al igualar a cero, se obtiene el máximo global. La ley de desplazamiento de Wien relaciona la longitud de onda donde se produce este máximo global, con la temperatura del cuerpo, encontrando la siguiente relación:

$$\lambda_{peak} \cdot T = 2,898 \times 10^{-3} [mK] \quad (2.8)$$

2.6. Método de dos longitudes de ondas

También conocido como pirometría de dos colores, basa su funcionamiento en la suposición de que, si se consideran dos longitudes de ondas muy próximas entre sí, la emisividad, ε , entre

ellas se puede considerar constante. Sin embargo, la literatura [11] nos indica que en la práctica esta suposición no es válida, por lo que el cálculo de temperatura estimada es imprecisa.

La relación que determina la T a través de este metodo fue desarrollada en el curso de sensores ópticos y está dada por:

$$T = \frac{\frac{hc}{k} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}{\ln \left(\frac{I_T(\lambda_1)}{I_T(\lambda_2)} \right) + 5 \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)} \quad (2.9)$$

2.7. Espectrómetro

El espectrómetro es un instrumento utilizado para medir las propiedades de la luz sobre una porción específica del espectro electromagnético (definida por las limitaciones de ensamble instrumento), en donde la variable que se mide con mayor frecuencia es la intensidad de la luz. En otras palabras, mide la cantidad de energía emitida por fotones de un cuerpo emisor de luz en función de la longitud de onda. Por otro lado, el espectrómetro puede ser diseñado para medir en una escala relativa o absoluta, si este último es el caso entonces generalmente recibe el nombre de espectrofotómetro.

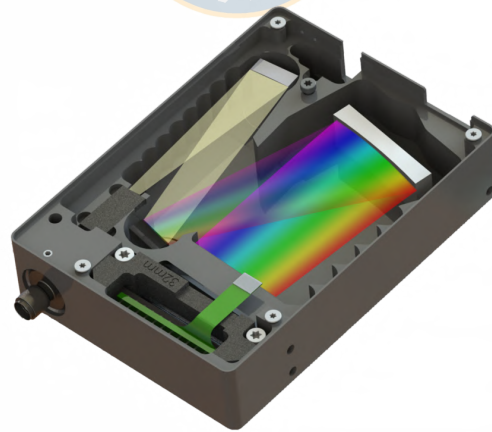


Fig. 2.6: Función interna espectrómetro

[15]

El funcionamiento interno de este instrumento se puede apreciar en la Fig[2.6]. En su puerto, se acopla una fibra óptica que en su terminal posee un lente colimador. Esto, permite la incidencia de la luz proveniente de la fuente en el espectrómetro. Luego, estos rayos son dirigidos

a un vidrio colimador que homogeniza las trayectorias a modo que estas viajen paralelas entre si. El siguiente paso, es la dispersión reflectiva, que permite que la luz incidente se separe en sus componentes constituyentes. Finalmente, son reflejadas para llegar al detector que medirá la energía emitida de fotones por longitud de onda.

2.8. Tópicos de Combustión

La combustión es una reacción química rápida del oxígeno definido como comburente, con los diversos elementos que constituyen el combustible principalmente carbono e hidrógeno, hidrocarburos. Para que ocurra la combustión, el combustible debe alcanzar la temperatura de ignición. Cuando dicho evento ocurre, el combustible comienza a arder dando origen a la llama, zona donde ocurre una rápida oxidación del combustible. En otras palabras, la combustión es un proceso exotérmico en donde se libera una gran cantidad de energía y que se produce a altas temperaturas.



Por otro lado, se pueden destacar los siguientes tipos de combustión:

- **Combustión Completa:**

Se produce cuando el total de combustible reacciona con el comburente, oxígeno. Es decir, no quedan residuos de combustible sin quemar. Los productos de esta combustión están dados por CO_2 , H_2O , O_2 y N_2 .

- **Combustión Incompleta:**

Se produce cuando el combustible no reacciona en su totalidad con el comburente. En este tipo de combustión aparecen hidrocarburos no quemados como C , H y CO . Una de las causas que da origen a esta combustión es un volumen de aire insuficiente.

Visualmente se puede diferenciar un tipo de combustión con otra y es que, cuando se posee una combustión completa la llama se torna de un color azulado mientras que, al ir cerrando el flujo de aire esta se va volviendo incompleta y con esto, da origen a una llama de color anaranjado.

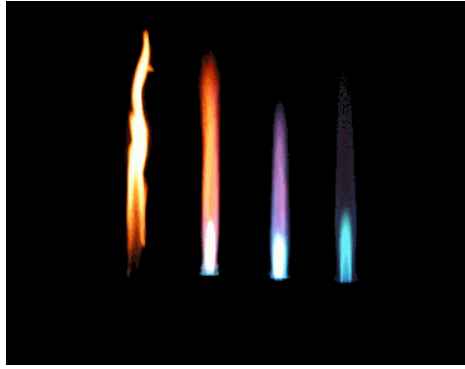


Fig. 2.7: Tipos de combustión presentes en la llama.

Por otro lado, la llama es un proceso luminoso producto la incandescencia de gases durante la combustión. Esta, posee una estructura bien definida (Véase Fig [3.11]) dada por:

- **Zona Fría:**

Esta parte de la llama se caracteriza por la presencia de gases que no entran en combustión por lo que la temperatura presente en la zona es baja.

- **Zona Reductora:**

En esta zona se posee una cierta cantidad de oxígeno por lo tanto moléculas de fácil oxidación entrarán en combustión y aquellas moléculas con mayor resistencia se volverán incandescentes debido al calor.

- **Zona Oxidante:**

Corresponde a la zona más externa de la llama. En esta, esta presente la mayor cantidad de oxígeno por lo que, la oxidación de las moléculas presentes será mayor y con ello, se poseerá una temperatura más elevada a comparación de las otras zonas.

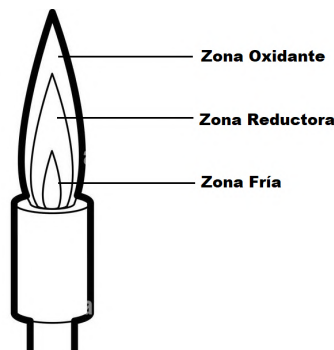


Fig. 2.8: Zonas identificables de una Llama.

2.9. Espectroscopía de llama

Como se dijo previamente la combustión es un proceso que emite luz y calor. Esto, producto de la reacción del oxígeno con el combustible que lleva a una liberación de la energía química presente en los enlaces moleculares. En general, el espectro de una llama se puede clasificar según su distribución energética (véase Fig.[2.9]), estos están dados por:

- **Espectro continuo:**

En este espectro, la energía se distribuye de manera continua en un espectro no discreto sobre un rango de longitudes de onda debido al hollín incandescente. En este, se evidencia una intensidad máxima sobre el rango espectral.

- **Espectro discontinuo:**

En este espectro, la energía está confinada en torno a ciertas longitudes de onda de banda estrecha atribuibles a átomos o moléculas aisladas. Estas bandas han sido identificadas principalmente en el rango visible.

Tabla 2.1: Radicales de emisión comunes presente en combustión de llama

Radicales	Longitud de onda (nm)
OH	306-315
NH^*	336
CN^*	359-386
CH^*	390, 431
C_2^*	469-473, 510-516
CH_2O^*	395,423
CO_2	<i>broadband</i>

En palabras más sencillas, la llama es un proceso de alta temperatura que emite una radiación continua debido al hollín incandescente más una radiación discontinua debido a la descomposición molecular y atómica. Información más detallada puede ser encontrada en [16].

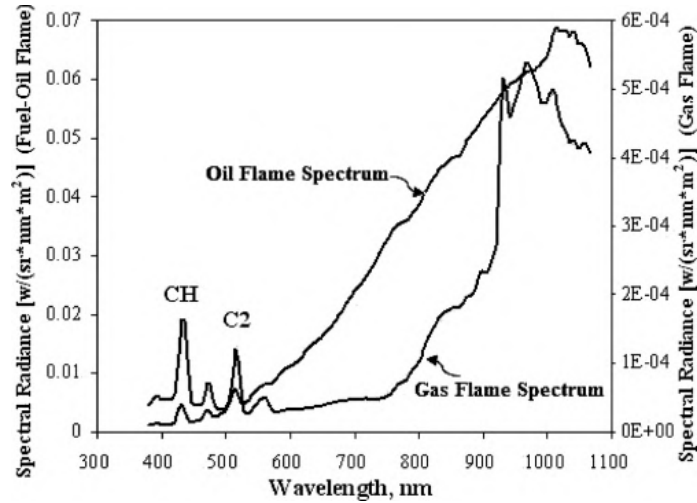


Fig. 2.9: Espectro continuo *Oil Flame* vs Espectro discontinuo *Gas Flame*.

[17]

2.10. Goodness-of-fit Coefficient (GFC)

Es un coeficiente basado en la desigualdad de Schwartz, sus valores están en el rango de 0 a 1, donde 1 denota una reconstrucción perfecta [14].

Se define por la ecuación:

$$GFC^{(P)} = \frac{|\sum_j E_{Real}(\lambda_j)E_{Rec}(\lambda_j)|}{[\sum_j [E_{Real}(\lambda_j)]^2 \sum_j [E_{Rec}(\lambda_j)]^2]^{1/2}} \quad (2.10)$$

De [18] se tiene que :

- **GFC >0.995:** Es necesario para un ajuste preciso.
- **GFC >0.999:** Es requerido para un buen ajuste espectral
- **GFC >0.9999:** Entrega un ajuste espectral perfecto.

3. Desarrollo Experimental

En este capítulo se presenta todo lo realizado para el correcto montaje del set-up óptico experimental y calibración de este en el laboratorio SP&R. Esto contempla el estudio previo de los dispositivos a utilizar junto a sus especificaciones técnicas y principalmente al análisis de comportamiento (ruido y temperatura) del espectrofotómetro ATP 8000 de *Optosky*.

3.1. Instrumentos a utilizar

En primer lugar, es necesario presentar los instrumentos a utilizar para el set-up que permitirá la adquisición de espectro de la llama a hidrocarburo en el rango espectral del SWIR. Los más importantes corresponden a:

3.1.1. Espectrofotómetro ATP 8000:



Fig. 3.1: Espectrofotómetro OptoSky ATP 8000.

Este instrumento es fundamental para la adquisición del espectro de emisión de la llama a hidrocarburos. Como se mencionó previamente, es el encargado de realizar la medición de la cantidad de energía emitida por fotones de un cuerpo en función de la longitud de onda y a su vez, realizar la conversión análogo-digital. Por dicha razón, el instrumento entrega los resultados en cuentas digitales por lo que, es necesario realizar una calibración a modo de obtener los resultados en unidades radiométricas [W/m^2nm].

A continuación, se presentan los parámetros de rendimiento del dispositivo:

Sensor	
Type	Cooled InGaAs Array CCD. Cooled down to -20°C
Spectral range	900-1700nm, 900-2100nm, 900-2500 nm (Three sensors)
Effective pixels	256/512/1024 pixels (suggest 512 pixels)
Pixel size	50/25µm×500µm
Full range	~187.5 Me-
Dynamic range	16666
Sensitivity	16 nV/ e-
Peak value	2300 nm
Dark noise	180 µV rms
Optical parameters	
Wavelength range	900-2600nm. available in custom wavelength
Optical resolution	5-50 nm (decide on slit, spectral range)
SNR	>10000:1
Dynamic range	16666
Operating temperature	0-40 °C
Operating humidity	< 90%RH
Optical path	
Optical path	f/4 crossed C-T
Confocal distance	82.3 mm for incidence / 121.5 mm for output
Entrance slit width	5, 10, 25, 50, 100, 150, 200 µm (optional), available in custom width
Incident connector	SMA905connector, free space
Electrical parameters	
Integration time	7.8ms-256s
Output data port	USB 2.0
ADC bit depth	18 bit (output 16bit)
Power supply	5VDC±5%
Operating current	<3A
Storage temperature	-20°C to +70°C
Operating temperature	-10°C to +50°C
Physical parameters	
Dimension	215x130x53 mm3
Weight	1.8kg

Fig. 3.2: Performance Parameters Spectrophotometer ATP 8000

[19]

Entre estos, podemos destacar un detector *InGaAs* con un rango espectral configurable de 3 modos 900-1700 *nm*, 900-2100 *nm* y 900-12500 *nm*. Una resolución óptica de 5-50 *nm*, valor peak a 2300 *nm* y el rango de longitudes de onda que va de 900 a 2600 *nm* lo cual es idóneo pues.

3.1.2. Lente colimador

Este dispositivo nos permite homogeneizar las trayectorias de la luz provenientes de la llama a hidrocarburos, es decir, que viajen paralelas entre si. Soporta temperaturas de hasta 50 °C.



Fig. 3.3: Lente colimador.

3.1.3. Fuente de alimentación Radiométrica

Este dispositivo del proveedor *Newport* es una fuente altamente regulada de corriente o potencia constante para lámparas *QTH* (Quartz Tungsten Halogen). Entre sus características destaca su potencia de trabajo la cual posee una máxima de 1100 [W].



Fig. 3.4: 69931 Digital Radiometric Power Supply.
[20]

3.1.4. Lámpara halógena de tungsteno de cuarzo

Corresponde a una fuente de iluminación estable y caracterizada del proveedor *Newport* (Véase Fig.(3.5)). Las lámparas *QTH* destacan por su excelente estabilidad en la emisión a alta intensidad.

Por otro lado, incluye un *CD* con el rango de emisión (irradiancia Fig.(3.6)) comprendido desde los 250 a 2500 [nm]. Este dispositivo será utilizado para la calibración del espectrofotómetro.



Fig. 3.5: 63350 - 1000W QTH Source Lamp.

[21]

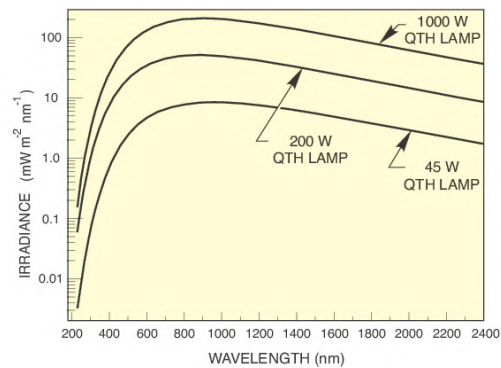


Fig. 3.6: Irradiance Lamp QTH.

[21]

3.2. Montaje del Set-up Laboratorio SP&R

Posterior al estudio de los diversos instrumentos presentados, se configuró el primer Set-up óptico (Fig. (3.7) y Fig.(3.8)). Este no posee la finalidad de medir el espectro de emisión de una llama a hidrocarburos, sino que, realizar un estudio del ruido y comportamiento de la temperatura del espectrofotómetro *ATP 8000*. Para finalmente, obtener el vector de calibración que permitirá poseer los posteriores espectros adquiridos de llama en términos de su irradiancia espectral.



Fig. 3.7: Set-up óptico vista frontal.

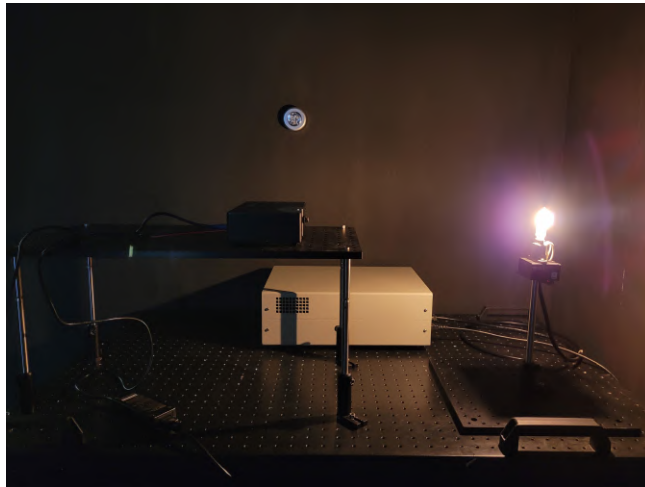


Fig. 3.8: Set-up óptico vista lateral.

3.3. Estudio del Espectrofotómetro

Es importante mencionar que el espectrómetro ATP 8000 de *Optosky* es una adquisición nueva en el laboratorio y por ende, fue necesario realizar un estudio previo a la calibración a modo de obtener mediciones correctas.

3.3.1. Ruido ATP 8000

En primer lugar, el dispositivo posee un software *Optosky Spectra V3.1.26* el cual posee la siguiente interfaz:

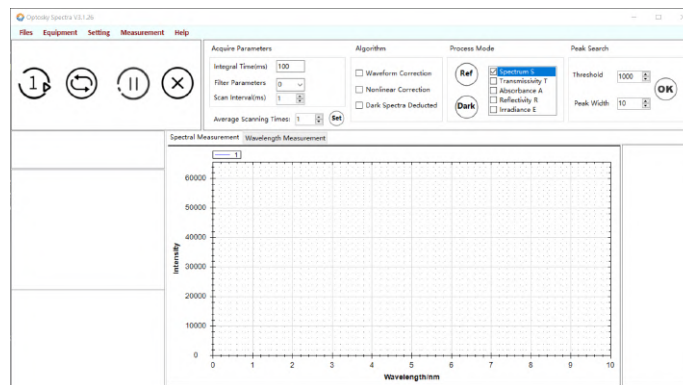


Fig. 3.9: Interfaz *Optosky Spectra V3.1.26*

Al conectar el espectrofotómetro a través de su cable usb al computador, el software nos presenta los siguientes datos en bruto:

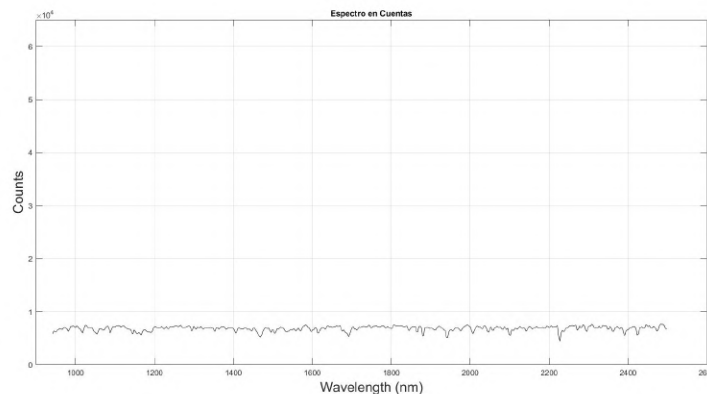


Fig. 3.10: Espectro adquirido en cuentas de la luz ambiente del laboratorio.

En este punto es importante destacar que el dispositivo sólo está midiendo la luz ambiente presente en el laboratorio sin una configuración arbitraria predefinida.

Por otro lado, de esta primera *medición* se puede evidenciar un ruido con un gran offset presente en todo el rango espectral del dispositivo el cual puede ser reducido con la función Dark Spectrum Deducted presente en la interfaz. Al habilitarla, podemos reducir este offset tal como se aprecia en la Fig.(3.11).

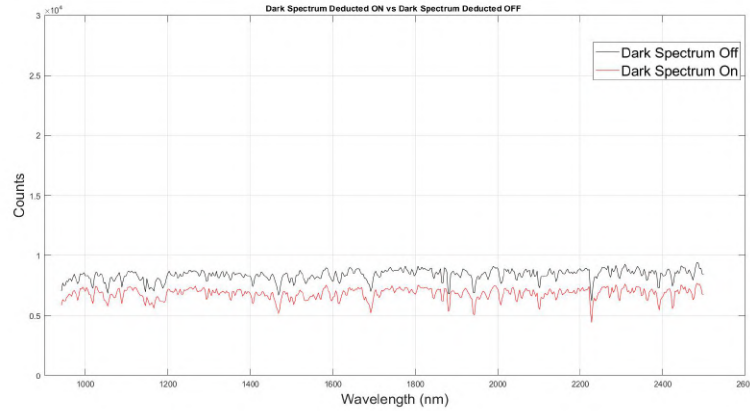


Fig. 3.11: Comparación de espectros adquiridos en cuentas al utilizar la función Dark Spectrum Deducted On vs Dark Spectrum Off.

Continuando el estudio del dispositivo, lo siguiente fue caracterizar el comportamiento del ruido en función del tiempo. Para esto, se realizaron mediciones con intervalos temporales de 10 *min* (Véase Fig.(3.12)) y además, se consideró un tiempo de integración de 100 *ms* (a modo de amplificar el ruido)

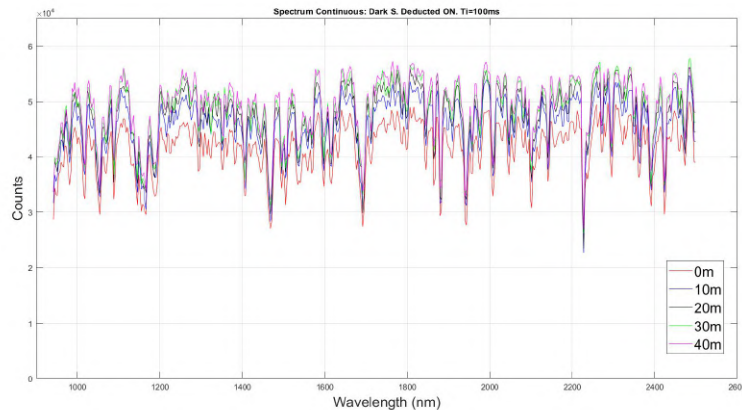


Fig. 3.12: Ruido presente en el espectrofotómetro en el tiempo.

De los resultados, se puede apreciar un ruido que en ningún momento cambia su comportamiento (la naturaleza de su forma). Sin embargo, este aumenta en amplitud al transcurrir el tiempo por lo que, es fundamental determinar si este se estabiliza después de un uso prolongado.

Para esto, se considerará la variación en potencia del ruido por cada intervalo de medición (10 *min*). En otras palabras, calcular el área bajo la curva de cada señal medida, definida en el rango espectral del espectrofotómetro.

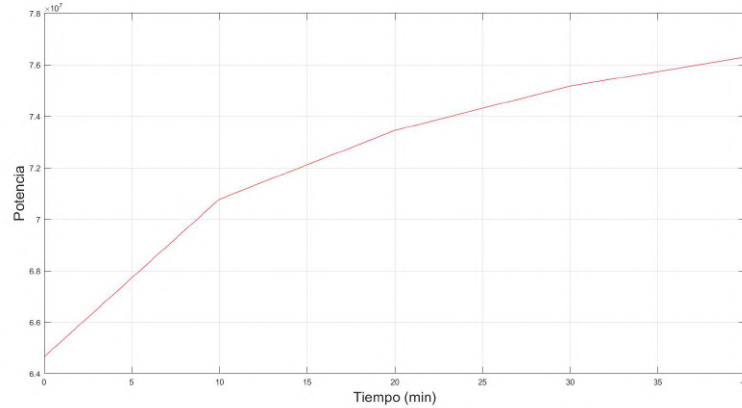


Fig. 3.13: Potencia del Ruido presente en el espectrofotómetro en el tiempo.

De los resultados (Véase Fig. (3.13)), se puede apreciar que en los primeros 20 minutos la potencia del ruido presenta un incremento considerable, pero posterior a ese tiempo comienza a estabilizarse (posee un incremento en amplitud menos significativo).

3.3.2. Comportamiento de la Temperatura

Otro parámetro importante a considerar es el comportamiento de la temperatura. El software permite establecer la temperatura con un valor, en este caso se configuró a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, es importante estudiar el tiempo de estabilización que posee esta en el espectrofotómetro. Para esto, se utilizó otro software que no funciona en paralelo a *Optosky Spectra*, pero que de igual forma es dado por el proveedor. Este, nos entrega el valor de la relación *Temperatura/Intensidad luz incidente* en función del tiempo.

Para estudiar el comportamiento, se realizaron mediciones con el software *Optosky Spectra* e inmediatamente después se visualizaba el estabilizamiento gradual en base a la relación *Temperatura establecida/Intensidad luz incidente* en el otro programa con un factor $\times 10$ (lamentablemente por limitaciones de los softwares que no funcionan en paralelo fue necesario realizarlo de esta manera), que sólo entrega la relación durante 10 *min*. Los resultados de estas mediciones pueden ser apreciadas en las siguientes imágenes:

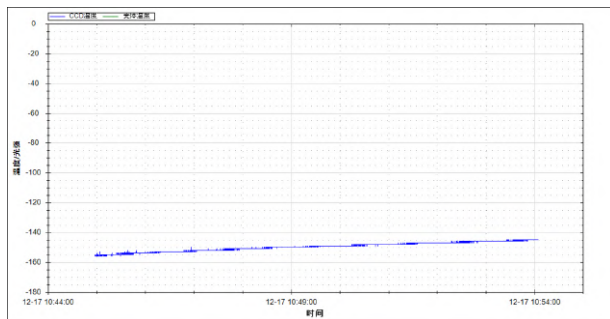


Fig. 3.14: Estabilización de la temperatura establecida 10 minutos posteriores al encendido del espectrofotómetro.

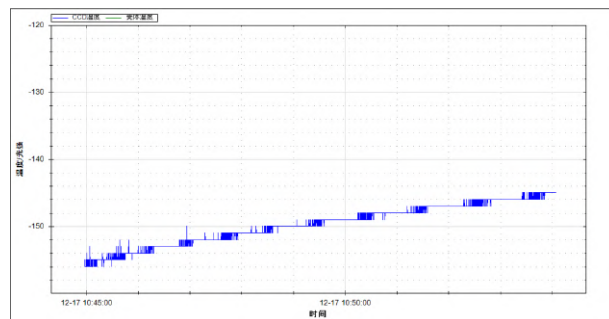


Fig. 3.15: Estabilización de la temperatura establecida 20 minutos posteriores al encendido del espectrofotómetro.

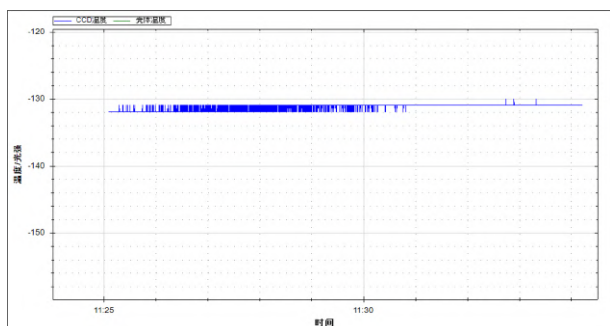


Fig. 3.16: Estabilización de la temperatura establecida 30 minutos posteriores al encendido del espectrofotómetro.

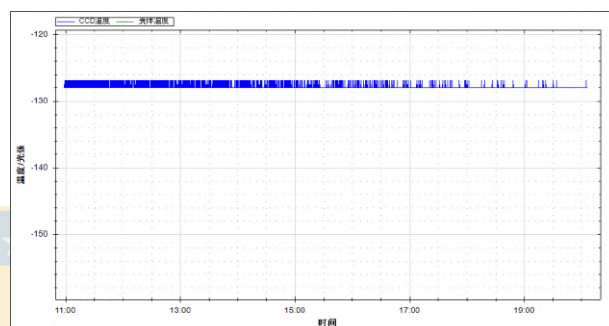


Fig. 3.17: Estabilización de la temperatura establecida 40 minutos posteriores al encendido del espectrofotómetro.

Se puede apreciar que en los primeros 20 *min* la relación *Temperatura/Intensidad luz incidente* posee un incremento, pero que posterior a ese tiempo esta comienza a estabilizarse. En concreto, a los 40 *min* posteriores al encendido del espectrofotómetro la temperatura se estabiliza.

Por lo tanto, del estudio realizado se pueden concluir dos aspectos importantes a considerar en el uso del espectrofotómetro para la posterior adquisición de espectro de la llama a hidrocarburo:

1. Se habilitará la función **Dark Spectrum Deducted** a modo de disminuir la intensidad del ruido presente en el dispositivo.
2. El espectrofotómetro se utilizará 40 *min* posterior a su encendido debido a que tanto el ruido como la temperatura se estabilizan posterior a ese tiempo.

3.4. Vector de calibración

Como se indicó previamente, el espectrofotómetro además de ser el encargado de medir la cantidad de energía emitida por fotones de un cuerpo emisor de luz en función de la longitud de onda, también es el encargado de realizar la conversión análogo-digital. Debido a esto, el espectro adquirido carece de un sentido físico y sólo muestra datos en bruto, es decir, en cuentas digitales.

Este proyecto contempla el espectro de emisión de una llama a hidrocarburos en términos de su irradiancia espectral. Por lo tanto, es necesario realizar una calibración del dispositivo y con esto, darle un sentido físico a las mediciones.

Por otro lado, la calibración no sólo es el proceso para evidenciar el espectro adquirido de un cuerpo emisor en términos de su irradiancia. Sino que, compensa eventos no ideales aportados por el set-up óptico implementado.

Del curso de sensores ópticos se tiene que un sistema óptico capaz de obtener información de una fuente emisora está dado por:

$$E(\lambda)_{counts} = H(\lambda) \cdot E(\lambda)_{real} + \rho \quad (3.1)$$

Donde:

- $C(\lambda)_{counts}$: Espectro en cuentas adquirido por el sistema óptico a una fuente emisora. En este caso, corresponde al espectro adquirido por el espectrofotómetro.
- $H(\lambda)$: Función de transferencia del espectrofotómetro.
- $C(\lambda)_{real}$: Espectro real al que está emitiendo la fuente óptica.
- ρ : Ruido inherente al camino óptico que siguen las trayectorias de la fuente emisora.

De la ecuación (3.1) se tiene que la función de transferencia del espectrofotómetro es la que genera la transformación del espectro real al que está emitiendo la fuente óptica en un espectro en cuentas. Por ende, el vector de calibración se obtendrá de manera inversa, es decir:

$$H(\lambda) = \frac{E(\lambda)_{counts} - \rho}{E(\lambda)_{real}} \quad (3.2)$$

El ruido presente en el dispositivo es aleatorio por lo que, no se considerará un modelo de este. De esta manera, el vector de calibración queda definido por la siguiente expresión:

$$V_{ecal} = \frac{E(\lambda)_{counts}}{E(\lambda)_{real}} \quad (3.3)$$

Ahora, para E_{real} se utilizó el archivo de emisión que incluía la lámpara QTH de *Newport* (Fig.(3.18)) que está en términos de su radiancia espectral. Este, debió ser acotado (Fig(3.19)) a través de *Matlab* para así tener concordancia con el rango espectral en el que opera el espectrofotómetro.

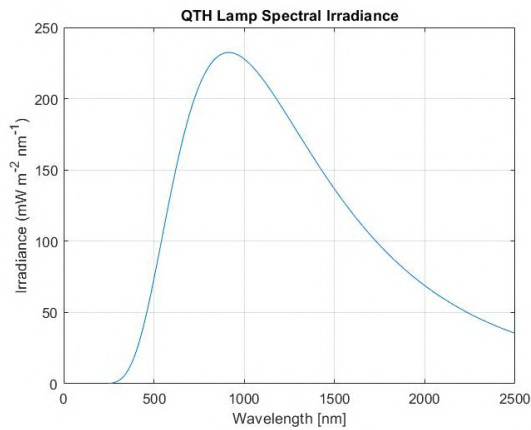


Fig. 3.18: QTH Lamp Spectral Irradiance [No acotado].

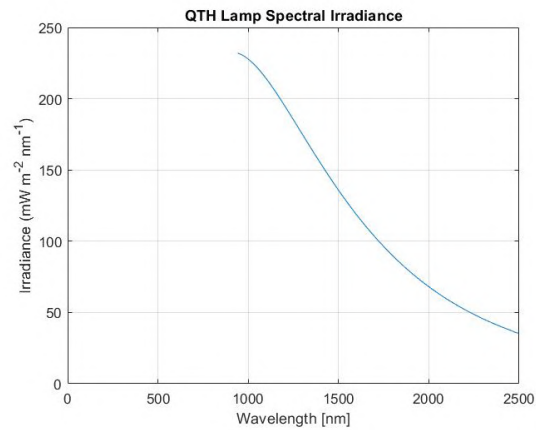


Fig. 3.19: QTH Lamp Spectral Irradiance [Acotado]

Por otro lado, para el término E_{counts} se midió el espectro en cuentas de la lámpara QTH alimentado por la fuente radiométrica a 1000 [W] con el espectrofotómetro ATP 8000 (Fig.(3.20)). Este último acoplado con un lente colimador, a 50 cm de la fuente óptica y a su vez, configurado con un tiempo de integración de 15 ms, Dark Spectrum Deducted activo y con un Average Scanning Times de 10.

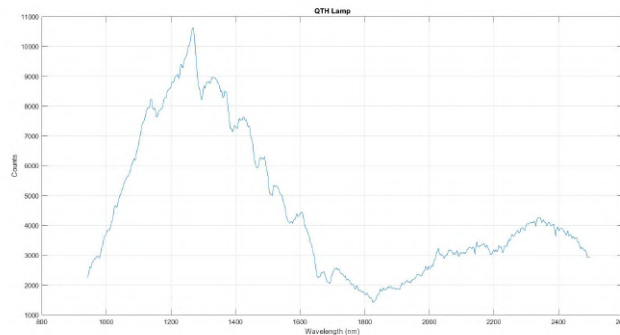


Fig. 3.20: Espectro adquirido en cuentas por ATP 8000

De esta manera, al poseer E_{real} y E_{counts} se aplica la ecuación (3.3) a través de *Matlab* y se obtiene el vector de calibración (Fig.(3.21)).

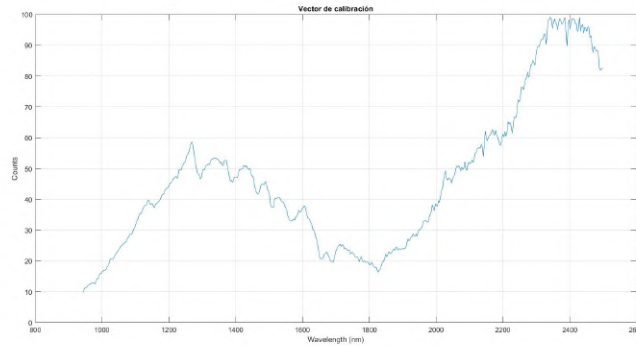


Fig. 3.21: Vector de Calibración obtenido.

Finalmente, para la calibración de los espectros adquiridos de llamas a hidrocarburos se utilizará la siguiente expresión:

$$Irr_{Calibrada} = \frac{E_{counts}}{Vec_{cal}} \left[\frac{mW}{m^2 \cdot nm} \right] \quad (3.4)$$

Donde:

- E_{counts} : Corresponde al espectro adquirido en cuentas por el espectrofotómetro de una llama a hidrocarburos real.
- Vec_{cal} : Corresponde al vector de calibración previamente calculado.

4. Adquisición y Procesamiento de Datos

Este capítulo contempla el proceso realizado para la adquisición del espectro de emisión de una llama a hidrocarburos real en el laboratorio de termofluidos del departamento de ingeniería mecánica. A su vez, se realiza el procesamiento de las mediciones obtenidas a través de PCA para estimar la temperatura y finalmente, validar los resultados.

4.1. Experiencia en Termofluidos

Tal como se mencionó, para la adquisición del espectro de llama a hidrocarburos real se trabajó en el laboratorio de termofluidos. En estas dependencias hay un sobrecalentador (Véase Fig.(4.1) y Fig.(4.2)) de ocho serpentines el cual posee unas paredes internas cubiertas de ladrillos refractarios de dimensiones $1.78m$ de alto y $0.55m$ de ancho y una abertura en la cara frontal que permite tener en línea de vista a la llama generada.



Fig. 4.1: Sobrecalentador vista posterior.



Fig. 4.2: Sobrecalentador vista frontal.

La importancia del sobrecalentador recae en el quemador (Fig.(4.5)) que este posee y es que, es el que genera la llama a hidrocarburos a la cual se le realizó la adquisición de espectro.

El quemador modelo *G.-TN.S.CL.A* de la marca *C.I.B. Unigas* [22] se alimenta de gasóleo, el cual es un hidrocarburo que se consigue mediante un proceso de destilación del petróleo, precisamente cuando este es destilado 3 veces. Entre sus características técnicas se destacan las siguientes:

- Potencia comprendida entre 21 a 41 *kW*.
- Caudal de combustible líquido comprendido entre 1.8 a 3.5 *Kg/h*.
- Potencia eléctrica total 0,375 *kW*.
- Caudal de aire regulable de múltiples niveles.

Esta última característica fue de gran aporte para el desarrollo del trabajo puesto que, al regular manualmente el caudal de comburente es posible tener una combustión incompleta y con esto, una llama de una tonalidad anaranjada en donde se evidencia una mayor emisión de llama.



Fig. 4.3: Quemador G.-TN.S.CL.A.

4.1.1. Set-up óptico en Sobrecalentador

El siguiente paso fue armar el Set-up experimental para la adquisición del espectro de una llama real en el sobrecalentador. Para esto, se montó el espectrofotómetro (con el lente colimador acoplado a este) en un tripode a modo de regular la altura y el ángulo de inclinación. Luego, el conjunto se instaló en frente a la abertura que posee el sobrecalentador a una distancia en donde la temperatura de la llama no dañara el lente colimador la cual, fue comprobada por

una termocupla. Todo esto a modo de obtener mediciones de la mejor manera posible, pero sin arriesgar los dispositivos. El computador se instaló en un mesa con el software *Optosky Spectra* ejecutándose en adquisición de espectro continuo.



Fig. 4.4: Set-up óptico para la adquisición de espectros reales.

Para las mediciones se consideraron los siguientes aspectos y parámetros:

- Utilización del espectrofotómetro 40 *min* posteriores a su encendido.
- Tiempo de integración de 15 *ms*.
- *Dark Spectrum Deducted* habilitado.
- *Average Scanning Times* con un valor de 10. Es decir, el espectrofotómetro adquiere 10 muestras y entrega el promedio de estas como resultado en pantalla.
- Cada 5 mediciones se adquiere nuevamente el *Dark Spectrum* para eliminar el ruido incrementado por la temperatura.
- Distancia de 1.47 *m* desde el quemador hasta el trípode que da soporte al espectrofotómetro.
- Un ángulo de inclinación, α , de 15-18° aprox.
- Las mediciones fueron almacenadas manualmente en archivos *.txt* para su posterior procesamiento a través de *Matlab*.

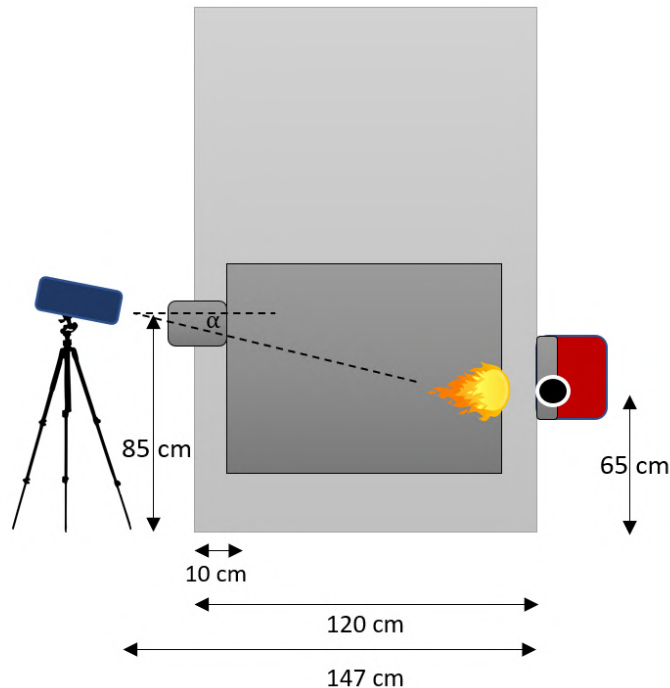


Fig. 4.5: Configuración Set-up óptico para la adquisición del espectro real de una llama a hidrocarburos.

4.1.2. Mediciones

Se presentan los espectros de llama a hidrocarburos en cuentas adquiridos por el espectrofotómetro ATP 8000 con el set-up óptico implementado en el sobrecalentador para la llama de su quemador (Fig.4.6).

Estas, consideran diversos niveles de caudal del comburente en el quemador. Donde, un *Nivel 0* denota un mínimo caudal de Aire y un *Nivel 8* denota un máximo caudal de Aire.



Fig. 4.6: LLama del quemador.

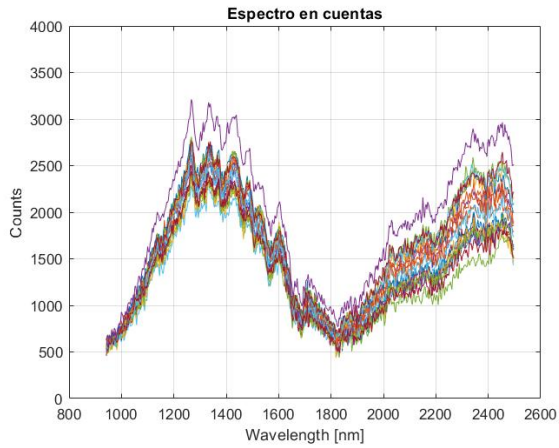


Fig. 4.7: Espectros adquiridos en cuentas en distintos instantes temporales con un 12 % de caudal de aire.

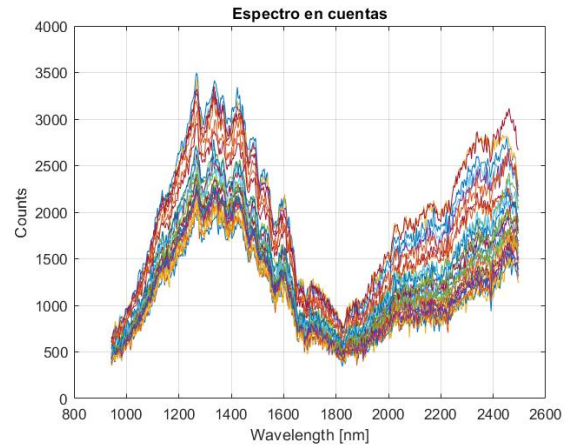


Fig. 4.8: Espectros adquiridos en cuentas en distintos instantes temporales con un 25 % de caudal de aire.

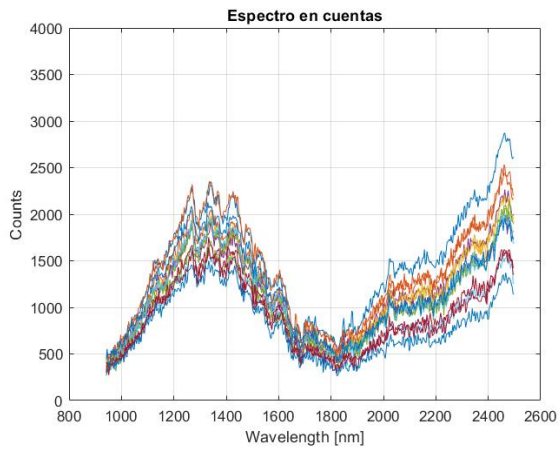


Fig. 4.9: Espectros adquiridos en cuentas en distintos instantes temporales con un 38 % de caudal de aire.

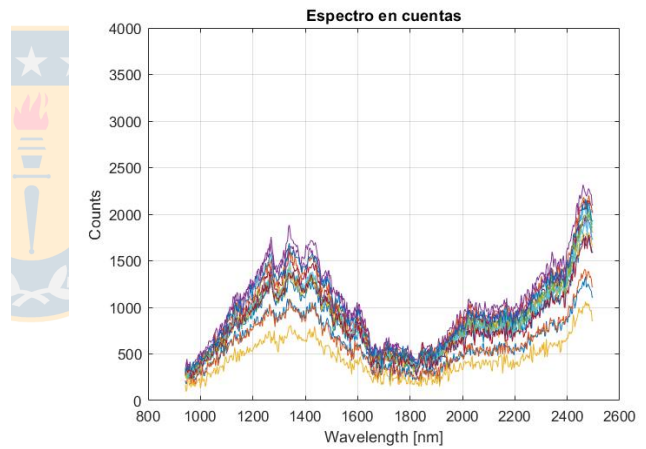


Fig. 4.10: Espectros adquiridos en cuentas en distintos instantes temporales con un 50 % de caudal de aire.

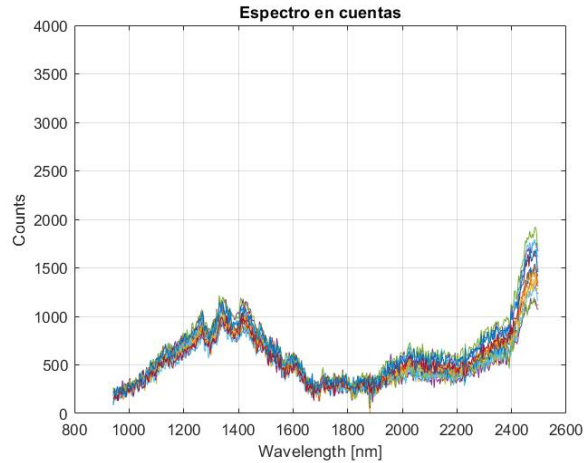


Fig. 4.11: Espectros adquiridos en cuentas en distintos instantes temporales con un 65 % de caudal de aire.

Ahora, utilizando el vector de calibración calculado en el capítulo anterior y utilizando la ecuación (3.4). Es decir, dividiendo cada espectro adquirido de la llama por el vector de calibración, se obtienen los espectros en términos de su irradiancia espectral mW/m^2nm .

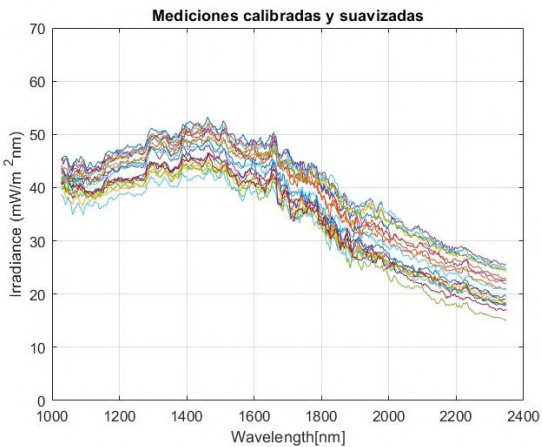


Fig. 4.12: Irradiancia espectral de llama a distintos instantes temporales con un 12 % de caudal de aire.

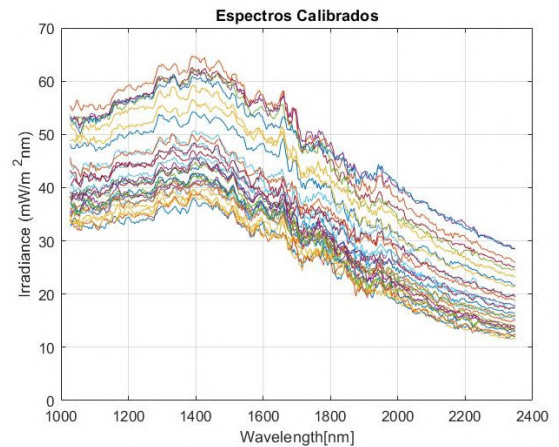


Fig. 4.13: Irradiancia espectral de llama a distintos instantes temporales con un 25 % de caudal de aire.

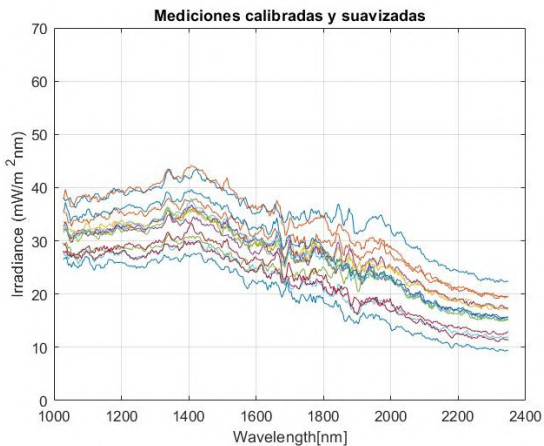


Fig. 4.14: Irradiancia espectral de llama a distintos instantes temporales con un 38% de caudal de aire.

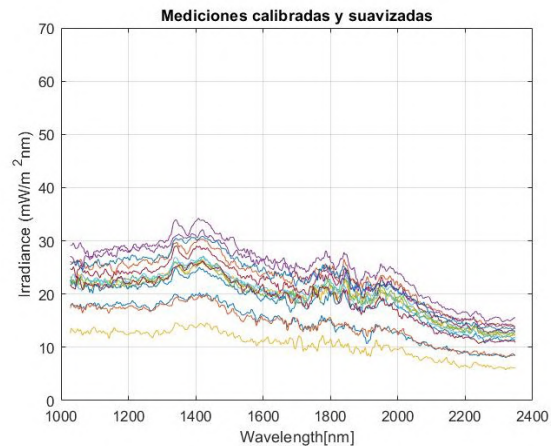
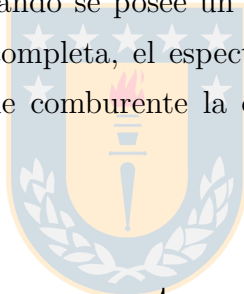


Fig. 4.15: Irradiancia espectral de llama a distintos instantes temporales con un 50% de caudal de aire.

En este punto, se destaca que cuando se posee un menor caudal de comburente, es decir, cuando se posee una combustión incompleta, el espectro de emisión de la llama es mayor y a medida que se aumenta el nivel de comburente la emisión de la llama va decreciendo en amplitud.



4.2. Estimación de Temperatura

De las mediciones adquiridas y posteriormente calibradas, se aprecia un comportamiento dinámico de la curva. Esto, era algo esperable puesto que la llama es un proceso a alta velocidad y espacialmente posee cambios bruscos en tiempos muy acotados. Por lo previo, visualizar de manera certera en dónde sucede el peak de emisión no es tarea sencilla.

Para estimar la temperatura en la que se encuentra la llama a partir de su espectro de radiación en el rango del SWIR, se comparará con el modelo de radiación de cuerpo negro a diversos valores de temperatura a través de la métrica GFC. En este caso, se toma un espectro adquirido y se compara con 500 curvas que van desde los 1700 hasta los 3000 K, cada una de estas curvas posee una temperatura específica la cual, es calculada con la ley de desplazamiento de Wien. La que entregue un mejor resultado, valor de GFC más cercano a 1, será la que tenga mejor aproximación (Fig.(4.16)) y con esto, se podrá poseer una estimación de la temperatura a la que se encuentra la llama en dicha muestra.

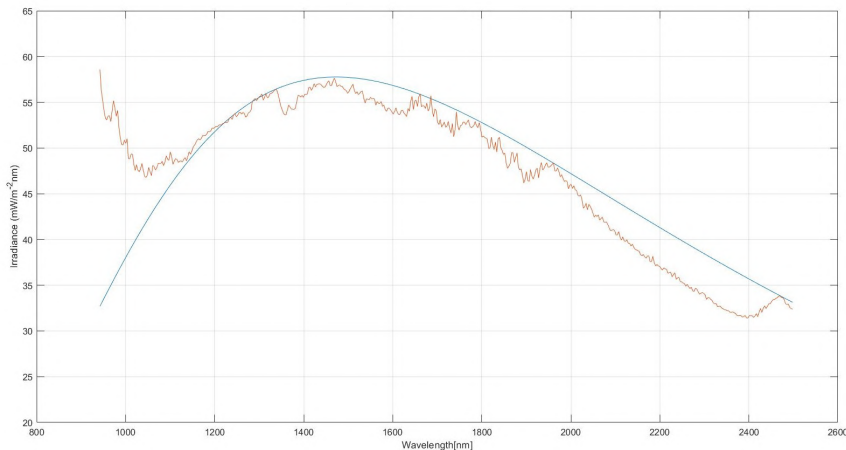


Fig. 4.16: Comparación espectro adquirido y calibrado *vs* curva de cuerpo negro aproximada por GFC.

Para el cálculo del GFC se consideró un rango comprendido de los 1306-1502 *nm*. Esto pues, en esos puntos se estima que ocurre el máximo de emisión. Se presentan los valores de GFC de las muestras calibradas con respecto a las curvas de radiación de cuerpo negro que poseen la mejor aproximación y la temperatura asociada a esta para cada nivel de comburente:

- **Nivel 0:** Correspondiente a un 12% de caudal de comburente.

Señal	GFC	Temperatura	Señal	GFC	Temperatura
Muestra 1	0.99986	1968 K	Muestra 12	0.99987	2010 K
Muestra 2	0.99987	1950 K	Muestra 13	0.99989	1973 K
Muestra 3	0.99984	1976 K	Muestra 14	0.99986	2017 K
Muestra 4	0.99986	1960 K	Muestra 15	0.99989	1950 K
Muestra 5	0.99986	2007 K	Muestra 16	0.99989	1978 K
Muestra 6	0.99988	1939 K	Muestra 17	0.99989	1931 K
Muestra 7	0.99989	1952 K	Muestra 18	0.99989	1963 K
Muestra 8	0.99988	2004 K	Muestra 19	0.99992	1981 K
Muestra 9	0.99987	1986 K	Muestra 20	0.99991	1952 K
Muestra 10	0.99988	1950 K	Muestra 21	0.99991	1947 K
Muestra 11	0.99987	2002 K			<i>T_{avg}: 1971 K</i>

- **Nivel 1:** Correspondiente a un 25 % de caudal de comburente.

Señal	GFC	Temperatura	Señal	GFC	Temperatura
Muestra 1	0.99991	2075 K	Muestra 17	0.99984	2176 K
Muestra 2	0.99992	2135 K	Muestra 18	0.99980	2158 K
Muestra 3	0.99986	2090 K	Muestra 19	0.99984	2184 K
Muestra 4	0.99991	2098 K	Muestra 20	0.99990	2174 K
Muestra 5	0.99987	2129 K	Muestra 21	0.99991	2049 K
Muestra 6	0.99978	2093 K	Muestra 22	0.99989	2106 K
Muestra 7	0.99975	2109 K	Muestra 23	0.99987	2093 K
Muestra 8	0.99978	2085 K	Muestra 24	0.99991	2069 K
Muestra 9	0.99979	2127 K	Muestra 25	0.99991	2072 K
Muestra 10	0.99973	2176 K	Muestra 26	0.99991	2067 K
Muestra 11	0.99974	2135 K	Muestra 27	0.99982	2158 K
Muestra 12	0.99983	2179 K	Muestra 28	0.99988	2213 K
Muestra 13	0.99983	2166 K	Muestra 29	0.99990	2161 K
Muestra 14	0.99986	2171 K	Muestra 30	0.99987	2168 K
Muestra 15	0.99982	2187 K	Muestra 31	0.99987	2161 K
Muestra 16	0.99968	2187 K			<i>T_{avg}: 2134 K</i>

- **Nivel 2:** Correspondiente a un 38 % de caudal de comburente.

Señal	GFC	Temperatura	Señal	GFC	Temperatura
Muestra 1	0.99973	2142 K	Muestra 9	0.99969	2132 K
Muestra 2	0.99977	2215 K	Muestra 10	0.99967	2148 K
Muestra 3	0.99976	2228 K	Muestra 11	0.99967	2129 K
Muestra 4	0.99974	2231 K	Muestra 12	0.99958	2187 K
Muestra 5	0.99964	2231 K	Muestra 13	0.99962	2137 K
Muestra 6	0.99971	2140 K	Muestra 14	0.99957	2127 K
Muestra 7	0.99966	2221 K	Muestra 15	0.99975	2137 K
Muestra 8	0.99968	2200 K			<i>T_{avg}: 2174 K</i>

- **Nivel 3:** Correspondiente a un 50 % de caudal de comburente.

Señal	GFC	Temperatura	Señal	GFC	Temperatura
Muestra 1	0.99946	2145 K	Muestra 9	0.99905	2163 K
Muestra 2	0.99910	2236 K	Muestra 10	0.99942	2192 K
Muestra 3	0.99899	2218 K	Muestra 11	0.99943	2184 K
Muestra 4	0.99921	2137 K	Muestra 12	0.99873	2132 K
Muestra 5	0.99915	2218 K	Muestra 13	0.99906	2163 K
Muestra 6	0.99919	2202 K	Muestra 14	0.99921	2116 K
Muestra 7	0.99906	2202 K	Muestra 15	0.99919	2096 K
Muestra 8	0.99922	2171 K			<i>T_{avg} 2172 K</i>

A continuación, se presenta de manera gráfica los resultados expuestos en las tablas, es decir, el comportamiento de la temperatura para cada muestra según el nivel de comburente:

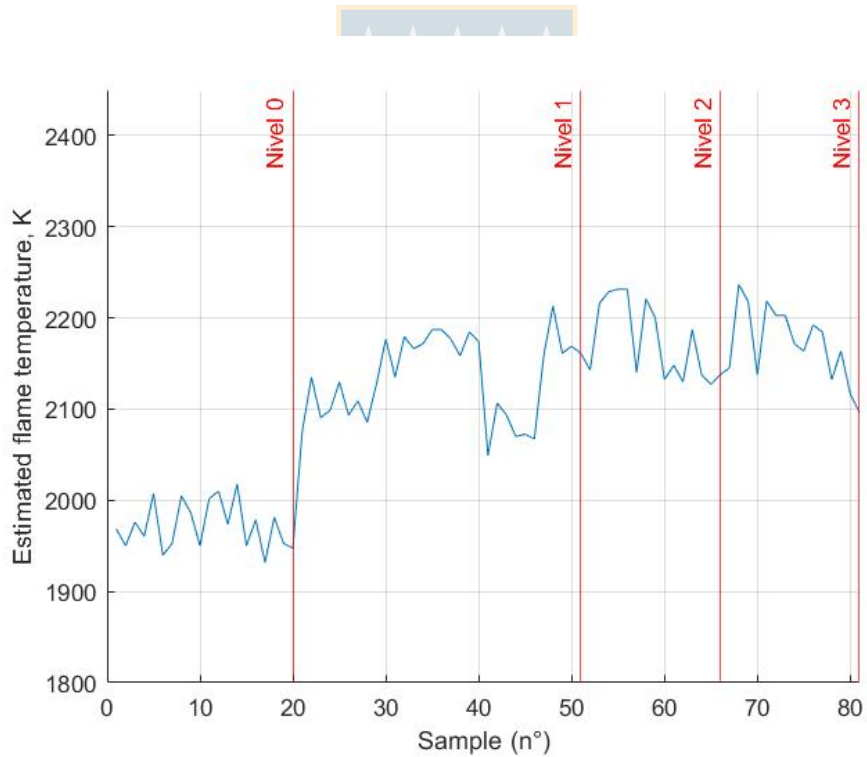


Fig. 4.17: Variación de temperatura por muestras adquiridas según nivel de comburente.

4.3. Validación de Temperatura

La mejor forma para realizar la validación de temperatura sería midiendo la llama a hidrocarburos con un método de contacto, es decir, con una termocupla y comparando los resultados. Sin embargo, por las temperaturas a las que está operando el quemador del sobrecalentador se necesitaría una termocupla específica de alto costo y de igual forma se utilizaría como un dispositivo de sacrificio pues, lo más probable es que se fundiría. Por previa razón, es insostenible validar con esa metodología.

Por lo tanto, para validar la temperatura estimada se comparó con el método de dos longitudes de onda utilizando un espectrómetro que opera en el VIS y adquiriendo el espectro de emisión de la misma llama del quemador. A su vez, se trabajó con espectros adquiridos en enero del presente año con el ATP 8000, en donde el sobrecalentador de termofluidos poseía otra boquilla en el quemador y con esto, una llama más amplia.

4.3.1. Medición en el VIS

Con la finalidad de utilizar el método de dos longitudes de onda se trabajó en el rango del VIS con un espectrómetro *Flame* (Fig.(4.18)) de *Ocean Optics*. Este, posee un rango espectral comprendido de 190-1100 *nm* y una resolución óptica de 0.1 - 10.0 *nm*.

La calibración se realizó a través de su software *Spectra Suite* considerando una lámpara de calibración de halógeno (Fig.(4.19)) y una fibra óptica de diámetro 400 μm . La calibración a través del software contempla el cálculo de un vector de calibración el cual se define como se nos indica en [23]:

$$V_{ecal} = \frac{I_P \cdot (T \cdot A \cdot dL_P)}{S_P - D_P} \quad (4.1)$$

Donde:

- I_P : Archivo de calibración, espectro de referencia.
- T : Tiempo de integración medido en segundos.
- A : Área de colección medida en cm^2 .

- dL_P : Extensión de longitud de onda medido en nanómetros.
- S_P : Espectro emitido por una fuente óptica en cuentas.
- D_P : Espectro oscuro (*Dark*) medido en cuentas.



Fig. 4.18: Espectrómetro Flame.



Fig. 4.19: Lamp HL 2000.

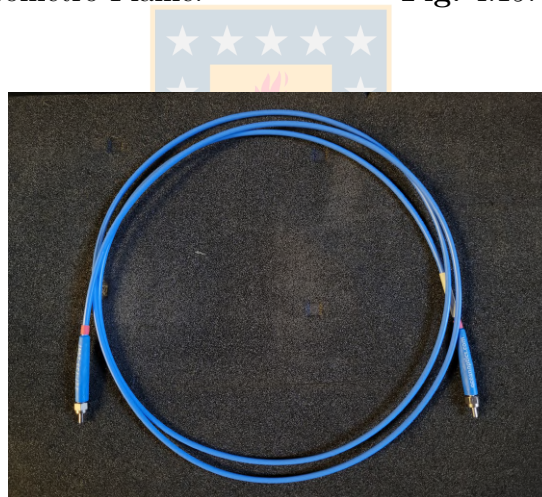


Fig. 4.20: Fibra Óptica VIS/NIR.

El modelo para la adquisición de espectros en el laboratorio de termofluidos consistió en acoplar un lente colimador con la fibra óptica y esta última, instalarla en un soporte a modo de capturar la llama del quemador.



Fig. 4.21: Set-up óptico implementado para mediciones en el VIS.

Se presentan los espectros adquiridos en términos de su irradiancia espectral considerando un tiempo de integración de 500 ms:

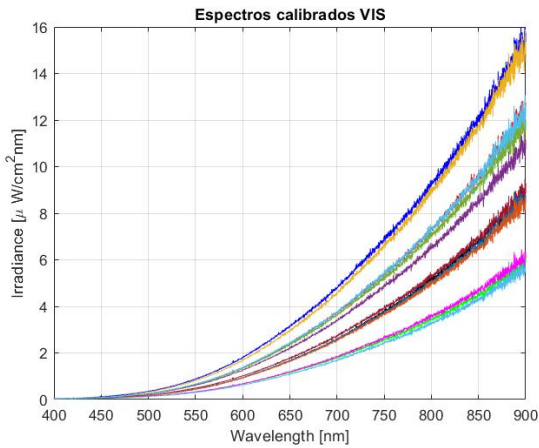


Fig. 4.22: Espectros adquiridos y calibrados en el rango visible considerando un 12% de caudal de comburente.

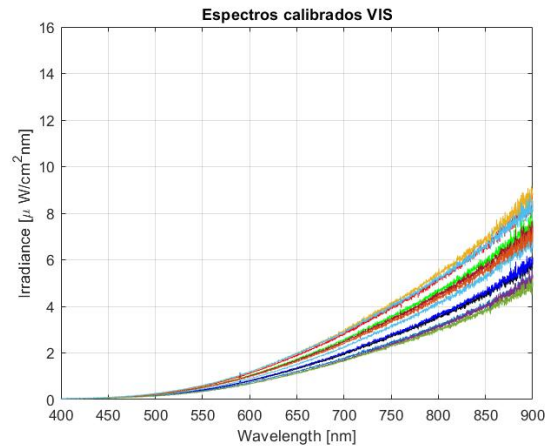


Fig. 4.23: Espectros adquiridos y calibrados en el rango visible considerando un 25% de caudal de comburente.

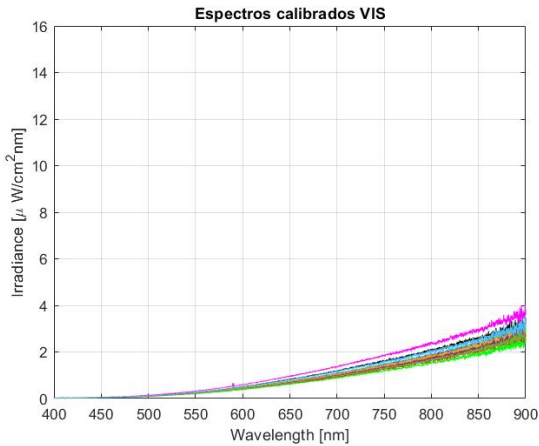


Fig. 4.24: Espectros adquiridos y calibrados en el rango visible considerando un 38% de caudal de comburente.

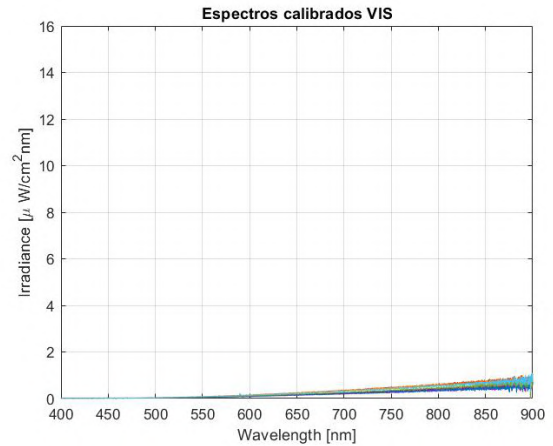


Fig. 4.25: Espectros adquiridos y calibrados en el rango visible considerando un 50% de caudal de comburente.

Ahora, para estimar la temperatura se utilizó el método de dos longitudes de ondas. Para esto, se consideró λ_1 : 580 nm y λ_2 : 680 nm ya que ambas no están sufriendo fenómenos de absorción ni emisión y además, están proximas entre si. De esta manera, la temperatura por muestra adquirida en el tiempo y su promedio está dada por:

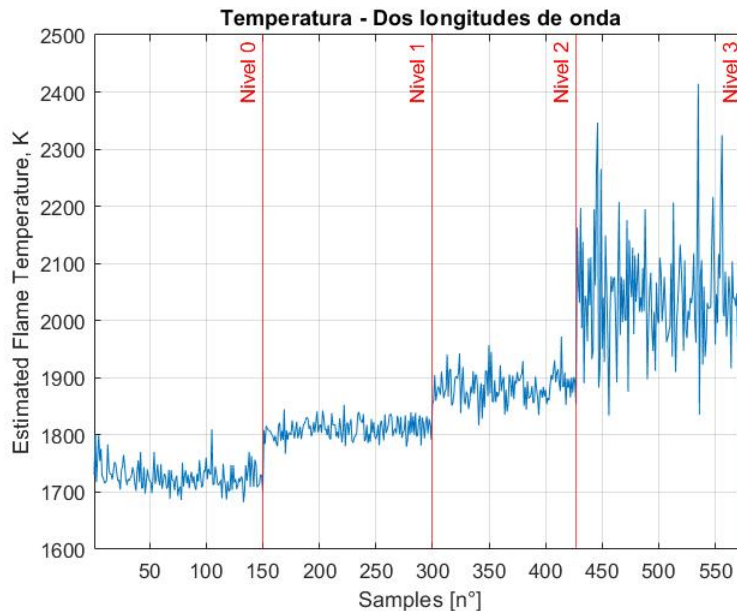


Fig. 4.26: Variación de temperatura por muestras adquiridas según nivel de comburente utilizando pirometría de dos colores.

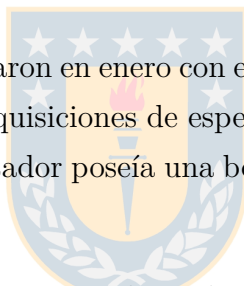
Tabla 4.1: Temperatura Promedio por Nivel.

Comburente	Temperatura Promedio
Nivel 0	1727 K
Nivel 1	1810 K
Nivel 2	1883 K
Nivel 3	2045 K

Se puede notar que en el Nivel 3 la temperatura posee mucho dinamismo. Esto se debe principalmente a que en dicho nivel, la señal incidente poseía poca emisión por lo que la SNR decayó. Sin embargo, aún se logra apreciar la tendencia ascendente de la temperatura.

4.3.2. Medición en el SWIR

Las siguientes mediciones se realizaron en enero con el mismo set-up mostrado en la Fig.(4.5). Las diferencias es que para dichas adquisiciones de espectro se utilizó un tiempo de integración de 5 ms y el quemador del sobrecalentador poseía una boquilla que le permitía poseer una llama más amplia espacialmente.



A continuación, se presentan los espectros adquiridos ya calibrados a 3 niveles de comburente:

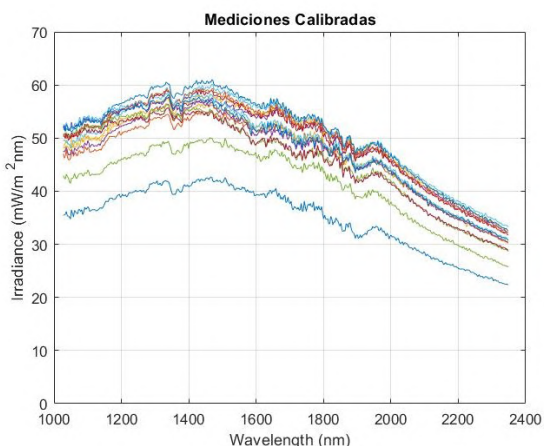


Fig. 4.27: Irradiancia espectral de llama a distintos instantes temporales con un 25% de caudal de aire.

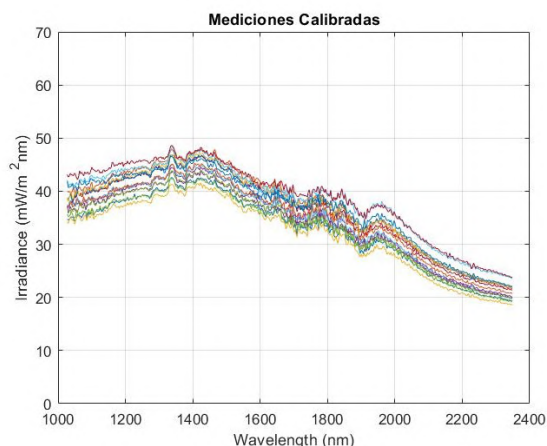


Fig. 4.28: Irradiancia espectral de llama a distintos instantes temporales con un 38% de caudal de aire.

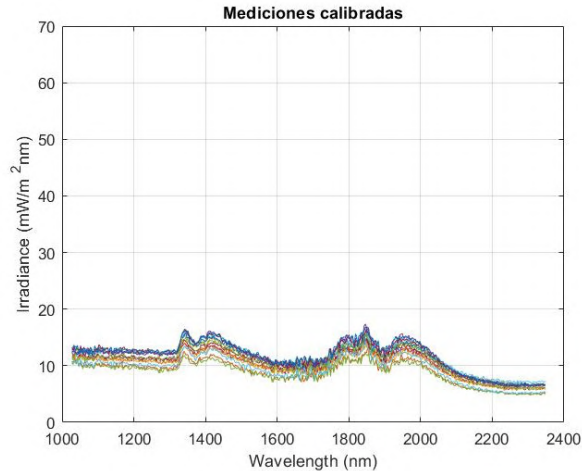


Fig. 4.29: Irradiancia espectral de llama a distintos instantes temporales con un 65 % de caudal de aire..

Para estimar temperatura, nuevamente se comparó los espectros medidos con el modelo de radiación de cuerpo negro a diversos valores de temperatura a través de la métrica GFC. Al poseer la mejor aproximación se podrá estimar la temperatura a la que se encuentra la llama en dicha muestra.

En este caso, para utilizar la métrica se consideró un rango comprendido de los 1300 - 1510 *nm*. Se presentan los valores de GFC de las muestras calibradas con respecto a las curvas de ración de cuerpo negro que poseen la mejor aproximación y la temperatura asociada a esta para los 3 niveles de comburente:

- **Nivel 1:** Correspondiente a un 25 % de caudal de comburente.

Señal	GFC	Temperatura	Señal	GFC	Temperatura
Muestra 1	0.99980	1970 K	Muestra 9	0.99989	2033 K
Muestra 2	0.99987	1994 K	Muestra 10	0.99988	2046 K
Muestra 3	0.99987	1991 K	Muestra 11	0.99992	2132 K
Muestra 4	0.99988	1970 K	Muestra 12	0.99993	2148 K
Muestra 5	0.99987	1997 K	Muestra 13	0.99992	2101 K
Muestra 6	0.99988	1991 K	Muestra 14	0.99993	2114 K
Muestra 7	0.99987	2038 K	Muestra 15	0.99993	2106 K
Muestra 8	0.99989	2020 K			<i>T_{avg}: 2043 K</i>

- **Nivel 2:** Correspondiente a un 38 % de caudal de comburente.

Señal	GFC	Temperatura	Señal	GFC	Temperatura
Muestra 1	0.99984	2080 K	Muestra 9	0.99983	2083 K
Muestra 2	0.99987	2075 K	Muestra 10	0.99987	2072 K
Muestra 3	0.99985	2077 K	Muestra 11	0.99984	2101 K
Muestra 4	0.99987	2088 K	Muestra 12	0.99983	2088 K
Muestra 5	0.99983	2088 K	Muestra 13	0.99981	2114 K
Muestra 6	0.99982	2090 K	Muestra 14	0.99986	2137 K
Muestra 7	0.99985	2069 K	Muestra 15	0.99982	2127 K
Muestra 8	0.99983	2080 K			<i>T_{avg}: 2043 K</i>

- **Nivel 3:** Correspondiente a un 65 % de caudal de comburente.

Señal	GFC	Temperatura	Señal	GFC	Temperatura
Muestra 1	0.99747	2234 K	Muestra 9	0.99716	2145 K
Muestra 2	0.99719	2273 K	Muestra 10	0.99764	2179 K
Muestra 3	0.99781	2208 K	Muestra 11	0.99604	2182 K
Muestra 4	0.99743	2226 K	Muestra 12	0.99676	2213 K
Muestra 5	0.99753	2249 K	Muestra 13	0.99610	2244 K
Muestra 6	0.99727	2148 K	Muestra 14	0.99715	2210 K
Muestra 7	0.99764	2132 K	Muestra 15	0.99714	2187 K
Muestra 8	0.99755	2161 K			<i>T_{avg}: 2199 K</i>

A continuación, se presenta de manera gráfica los resultados expuestos en las tablas, es decir, el comportamiento de la temperatura para cada muestra según los 3 niveles de comburente:

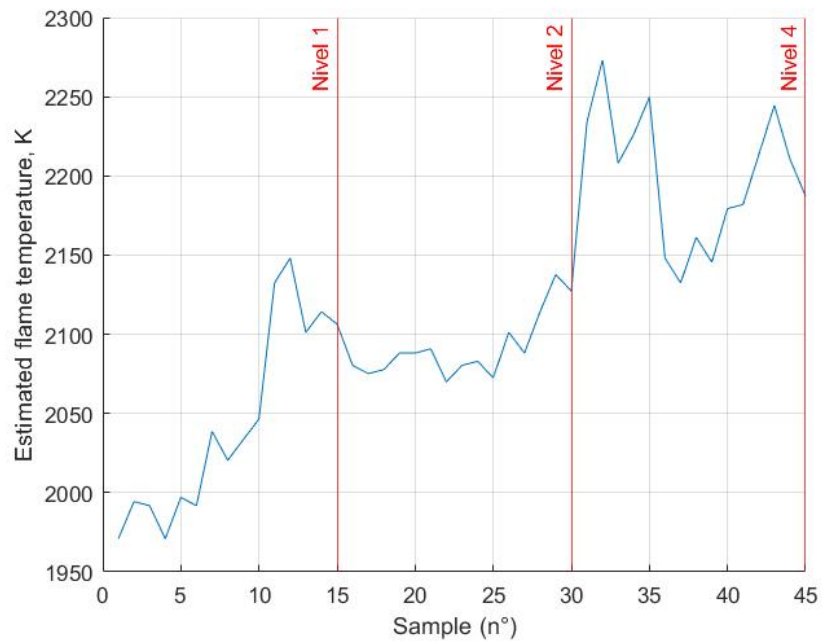


Fig. 4.30: Variación de temperatura por muestras adquiridas según nivel de comburente.



5. Conclusiones

En este trabajo se ha estimado temperatura de llama a hidrocarburos, basados en la ley de desplazamiento de Wien y espectros medidos en el rango SWIR. Para la validación de tendencias del cambio de temperatura, se ha realizado mediciones en el rango VIS, estimando temperatura de llama con el método de dos longitudes de onda. Los resultados muestran que la tendencia en el cálculo de temperatura posee una alta correlación, con una diferencia porcentual entorno al 12%.

En base a los espectros medidos en el SWIR, se demostró que el peak de emisión de una llama a hidrocarburos sucede entorno a los 1700nm y que por dicha razón, es válido aplicar la ley de Wien para estimación de temperatura. A partir de los espectros medidos, se realizó una aproximación usando ley de Planck. A partir de esta aproximación, se estimó la longitud de onda donde ocurre el máximo de emisión, permitiendo estimar la temperatura.

La adquisición de espectros se realizó mediante el uso del espectrofotómetro ATP 8000 de *Optosky*. Con este dispositivo se realizaron mediciones a la llama del quemador a gasóleo del sobrecalentador perteneciente al laboratorio de termofluidos del departamento de ingeniería mecánica. Dichas mediciones consideraron diversos caudales de comburente en el quemador lo que provocó cambios en la emisión espectral de la llama y variaciones en su morfología.

Este trabajo es el primer acercamiento al cálculo de temperatura a través de la ley de Wien en el rango del SWIR para una llama a hidrocarburos, por lo que sienta las bases para futuras investigaciones ya sea con los espectros adquiridos de llama o bien, mejorar el modelo para la adquisición y posterior cálculo de temperatura.

Como trabajo futuro, se sugiere mejorar la SNR del espectrofotómetro con el uso de un lente óptico que garantice alta transmitancia hasta los 2500nm o un cambio de rendija que permita una mejor incidencia de luz desde la fuente óptica. Por otra parte, los espectros medidos evidencian una serie de bandas de emisión y absorción, por lo que se sugiere un estudio espectral de estas bandas, ya que evidenciarían la presencia de compuestos químicos presentes en el procedo de combustión.

Bibliografía

- [1] Katharina Kohse-Hoinghaus, “Clean combustion: Chemistry and diagnostics for a systems approach in transportation and energy conversion,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 65, p. 1-5, 2018.
- [2] Oscar Farias y Luis Arias, “Diagnóstico de la combustión de gas y petróleo mediante el análisis del espectro visible de la llama,” *8° Congreso iberoamericano de ingeniería mecánica*, 25 de octubre, 2007.
- [3] Xiaoshu, Zhihai Cheng and S. Wang, “Flame measurement and combustion diagnoses with spectrum analysis,” *AIP Conference Proceedings*, 2007.
- [4] Fernando Castillo, José Cifuentes, Milton Marín, Luis Arias and H. Garcés, “Study spectral emission of burning biomass in the vis and nir spectral band,” *Conference Chilecon, Pucón*, december, 2017.
- [5] A.I Fisenko and S. Ivashov, “Determination of the true temperature of emitted radiation bodies from generalized wien’s displacement law,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, Volume 32, November, 1999.
- [6] Carlos Toro, Luis Arias , Sergio Torres and D. Sbarbaro, “Flame spectra-temperature estimation based on a color imaging camera and a spectral reconstruction technique,” 22 September, 2014.
- [7] Fernando A. Castillo, Luis E. Arias, Hugo O. Garcés and A. J. Rojas, “Turbulent flame monitoring using spectral estimation techniques,” *IEEE international Conference on Automation*, 2021.
- [8] Z. Zhou, D. Tian, Z. Wu, Z. Bian, and W. Wu, “Reconstruction of flame temperature distribution using tomographic and two-color pyrometric techniques,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, no. 11, pp. 3075–3084, 2015.
- [9] Fan Jiang, Shi Liu, Shiqiang Liang, Zhihong Li, Xueyao Wang and G. Lu, “Visual flame monitoring system based on two-color method,” *Journal of Thermal Science*, vol. 18, pp. 284–288, 2009.

- [10] Matsui, Yukio, et al, “A study on the time and space resolved measurement of flame temperature and soot concentration in a d.i. diesel engine by the two-color method.” *SAE Transactions*, 1979.
- [11] Alan S. Morri, Reza Langari, *Measurement and instrumentation: theory and application*, 2012.
- [12] P. Viera-Gonzalez, “Estudio del acoplamiento de un colector solar con fibras ópticas plásticas para la iluminación de interiores,” Ph.D. dissertation, 06 2014.
- [13] Emilio Gómez G., *Guía básica de Conceptos de Radiometría y Fotometría*, 2006.
- [14] Carlos Toro Navarrete, “Desarrollo de sistemas de adquisición multiespectral para el monitoreo y caracterización de procesos industriales,” Ph.D. dissertation, Universidad de Concepción, 2014.
- [15] Avantes, Optical Spectrometers: an introduction, Disponible en <https://www.avantes.com>.
- [16] Luis Arias Parada, “Medición de la información espectral global: nueva técnica para fotodetección de llama y control del proceso de combustión usando un arreglo basado en fotodiodos,” Ph.D. dissertation, Universidad de Concepción, 2009.
- [17] Luis arias, Sergio Torres, Daniel Sbarbaro and O. Farias, “Photodiode-based sensor for flame sensing and combustion-process monitoring,” 2008.
- [18] Miguel A. López-Álvarez, Javier Hernández-Andrés, Javier Romero, F. J. Olmo, A. Cazorla, and L. Alados-Arboledas, “Using a trichromatic ccd camera for spectral skylight estimation,” *Appl. Opt.* 47, H31-H38, 2008.
- [19] Optosky, Datasheet ATP 8000, Disponible en <https://optosky.com>.
- [20] Artisan, Digital Radiometric Power Supply, Disponible en <https://www.artisanng.com>.
- [21] Newport, Calibrated Source Lamp Quartz Tungsten Halogen, Disponible en <https://www.newport.com>.
- [22] CIB Unigas, Disponible en <https://www.cibunigas.it>.
- [23] Fernando Castillo, “Obtención del vector de calibración,” Noviembre de 2021.