

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

**Luis Arias, PhD.**

Profesor Co-Patrocinante:

**Hugo Garcés, PhD.**

Informe de Tesis  
para optar al Grado de:

**Magíster en Ciencias de la  
Ingeniería con mención en  
Ingeniería Eléctrica**

**Estimación de temperatura, radiación local y  
global de diferentes flujos máxicos de llama  
utilizando el método de recuperación espectral  
Maloney-Wandell**

Concepción, Septiembre de 2022

Fernando Antonio Castillo Rivera



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**Profesor Patrocinante:**

Luis E. Arias Parada, Ph.D.

**Profesor Co-Patrocinante:**

Hugo O. Garcés Hernández, Ph.D.

**Estimación de temperatura, radiación local y  
global de diferentes flujos máxicos de llama  
utilizando el método de recuperación espectral  
Maloney-Wandell**

**Fernando Antonio Castillo Rivera**

Informe de Tesis para optar al Grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería  
Eléctrica.

Concepción, Chile.

5 de septiembre de 2022

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.



# Resumen

Actualmente, se buscan nuevas técnicas de control y sensado de combustión de llama para aumentar la eficiencia de este proceso y disminuir las emisiones contaminantes. Una de las técnicas que está siendo ampliamente utilizada en estos procesos, es la espectroscopia de llama, esta se usa ampliamente en el análisis de procesos de combustión industrial. Una llama emite energía sobre una amplia región espectral y sus espectros asociados contienen componentes continuos y discontinuos. En la literatura hay modelos, basados en la ley de Planck o de Wien, para representar el comportamiento espectral de la llama bajo diferentes parámetros de combustión; sin embargo, la naturaleza no lineal de estos modelos, sumada a la alta dimensión de los datos espectrales y la superposición entre las emisiones espectrales continuas y discontinuas, complican el análisis teórico de los procesos de combustión y hacen que sea necesarios métodos mas complejos para obtener valiosa información para el control y la optimización de la llama. En esta tesis se analiza la emisión espectral de la llama emitida por el Gas licuado del petróleo (LPG) bajo distintos puntos de operación respecto de la relación aire/combustible de un mechero Bunsen. Para analizar la emisión espectral de la llama, utilizamos en primer lugar el método de recuperación espectral de Maloney-Wandell en imágenes de llama. De esta manera, obteniendo los espectros recuperados píxel por píxel, se procede a estimar distintos parámetros como la temperatura de llama (en K), radianza local (en  $\mu W/cm^2$ , localizada espacialmente) y radianza global (en  $\mu W/cm^2$ ). Para desarrollar el algoritmo de recuperación espectral de Maloney-Wandell fue necesaria la medición previa de la emisión espectral de la llama con el espectrofotómetro Thorlabs CCS200. La implementación del algoritmo se hizo con distintas cámaras tricromáticas (Basler acA 1920-50gc, Basler scA1390-17gc y Basler acA 1920-150uc), realizando estas mediciones en el rango visible (400 a 700 [nm]). Posteriormente se realizó el análisis de datos obtenidos a partir

de los instrumentos, realizando diversos métodos de procesamiento de señales e imágenes para la eliminación de ruido, donde se introdujo un umbral a partir de la métrica de recuperación espectral (Goodness of Fit Coefficient (GFC)) como método para la validación de píxel y finalmente se procedió a realizar la recuperación espectral de Maloney-Wandell, obteniendo un cubo hiperespectral de espectros recuperados. A partir de este cubo, se estimó la temperatura por el método de dos longitudes de onda, realizando su respectiva validación en base a la temperatura obtenida a partir de los espectros de un espectrofotómetro calibrado, obteniendo un error del 4%. También a partir del cubo se calculó la radiación local y un índice de radiación global. A partir de estos índices, se construyó distintos mapas, píxel a píxel, de temperatura de la llama y de radiación de la llama. Se analizaron 100 imágenes de llama, donde se obtuvieron cubos hiperespectrales y a partir de estos cubos se calculó la temperatura media y los índices de radiación global para distintos flujos máxicos en distintos puntos operacionales. Los resultados muestran que el enfoque de este estudio puede desempeñar un papel esencial en la detección de llamas, proporcionando así una herramienta importante para el seguimiento o control de los procesos de combustión, que nos permita evitar una mala combustión y por lo tanto una disminución de los contaminantes atmosféricos.

**Palabras clave: Análisis Espectral, Emisión, Recuperación Espectral, Radiancia, Combustión.**

# Índice General

Resumen	II
Índice de Figuras	X
Acrónimos	XI
Agradecimientos	XIII
<b>1. Investigación Propuesta</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Hipótesis de Trabajo . . . . .	5
1.3. Objetivos . . . . .	5
1.3.1. Objetivo General . . . . .	5
1.3.2. Objetivos Específicos . . . . .	5
1.4. Alcances y limitaciones . . . . .	6
1.5. Artículos . . . . .	7
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>8</b>
2.1. Combustión . . . . .	8
2.1.1. Fases de la reacción de combustión . . . . .	9
2.1.2. Clases de reacciones de combustión . . . . .	10
2.1.3. Hollín . . . . .	11
2.2. Teoría de la llama . . . . .	13
2.2.1. Clasificación de llamas . . . . .	13



2.2.2.	Forma, color y temperatura de la llama . . . . .	16
2.2.3.	Definiciones relativas a la temperatura de combustión . . . . .	17
2.3.	Teoría espectral de la llama . . . . .	18
2.4.	Ley de Planck . . . . .	19
2.5.	Método de dos longitudes de onda para medición de temperatura . . . . .	20
2.6.	Radiación Local . . . . .	23
2.7.	Radiación Global . . . . .	24
2.8.	Recuperación Espectral . . . . .	24
2.8.1.	Análisis de Componentes Principales . . . . .	25
2.8.2.	Cálculo de componentes principales . . . . .	26
2.8.3.	Modelo del sistema de adquisición . . . . .	29
2.8.4.	Algoritmo de Maloney-Wandell . . . . .	31
2.8.5.	Métrica de Evaluación . . . . .	32
<b>3.</b>	<b>Metodología y materiales</b>	<b>34</b>
3.1.	Set-up Experimental . . . . .	34
3.1.1.	Descripción Set-up Experimental . . . . .	35
3.2.	Metodología . . . . .	37
3.2.1.	Adquisición de datos . . . . .	37
3.2.2.	Procesamiento de Señales . . . . .	38
<b>4.</b>	<b>Resultados</b>	<b>41</b>
4.1.	Resultados Preliminares . . . . .	41
4.1.1.	Matriz de Entrenamiento . . . . .	41
4.1.2.	Sensibilidad Espectral . . . . .	42
4.1.3.	Procesamiento de Imágenes . . . . .	43
4.1.4.	Análisis de componentes principales . . . . .	45
4.1.5.	Espectro recuperado por píxel . . . . .	46
4.1.6.	Mapa de temperatura . . . . .	49
4.1.7.	Mapa de radiación local . . . . .	51



4.1.8. Resultados en distintos puntos de operación . . . . .	53
4.2. Resultados Finales . . . . .	54
4.2.1. Espectro recuperado por píxel . . . . .	54
4.2.2. Mapa de temperatura . . . . .	57
4.2.3. Mapa de radiación local . . . . .	57
4.2.4. Resultados en distintos puntos de operación . . . . .	58
4.2.5. Validación estimación de temperatura . . . . .	64
<b>5. Conclusiones y Trabajo a futuro</b>	<b>67</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	67
5.2. Trabajo a futuro . . . . .	69
<b>Bibliografía</b>	<b>70</b>





# Índice de Figuras

2.1. En (a) podemos ver la formación de radicales, (b) el instante de la combustión y (c) la fase de terminación. . . . .	9
2.2. En (a) se aprecia una combustión incompleta y en (b) una completa. . . . .	11
2.3. Etapas de formación del hollín . . . . .	12
2.4. Clasificación de llamas . . . . .	14
2.5. Ejemplo de una llama de propano en su flujo laminar, transición y turbulenta. . .	15
2.6. Distribución de temperatura de una llama en un proceso de combustión. . . . .	17
2.7. Ejemplo de un espectro electromagnético de una llama azul en el rango visible . .	19
2.8. Radiación espectral de un cuerpo negro para varias temperaturas. . . . .	20
2.9. (a) Reflectancia de cenizas volcánicas (en %) medida en el laboratorio y (b) datos espectrales de entrenamiento, medidos por el satélite.(c) Los primeros cuatro componentes principales para los datos de reflectancia de cenizas referenciales. (d) Varianza acumulada al incrementar el número de componentes principales. . .	29
2.10. Esquema de proceso de adquisición de una cámara CMOS . . . . .	30
2.11. Ejemplo de un sistema típico de adquisición óptica, donde la SSF pertenece a una cámara Basler multiplicado por un espectro adquirido. . . . .	31
3.1. Esquema general de datos a obtener y algoritmos a desarrollar. (Fuente: Elaboración Propia) . . . . .	34

3.2.	Configuración experimental (a) imagen sacada del laboratorio. (b) (1) Notebook (2) Notebook (3) Cámara (4) Espectrofotómetro (5) Fibra óptica (6) Lente Colimador (7) Gas LPG (8) Mechero Bunsen. De la imagen (b) se puede apreciar que la cámara captura la información de toda la llama y el lente colimador esta apuntando a una zona específica de la llama. (Fuente: Elaboración Propia)	35
3.3.	Diagrama de flujo de la secuencia de mediciones. (Fuente: Elaboración Propia)	36
3.4.	(a) Matriz de espectros obtenida sin calibrar ( $S_p$ ). (b) Vector de Calibración ( $C_p$ ). (c) Matriz de entrenamiento de espectros calibrados con ruido ( $I_p$ ), obtenidos de la ecuación (3.1). (d) Matriz de espectros con eliminación de ruidos. (Fuente: Elaboración Propia)	40
4.1.	Matriz de entrenamiento de los distintos puntos de operación de llama. <sup>1</sup> (Fuente: Elaboración Propia).	42
4.2.	Sensibilidad espectral dada por el fabricante (a) Cámara Basler scA 1390-17gc y (b) Cámara Basler acA 1920-50gc.	42
4.3.	Imágenes de llama en distintos puntos de operación. Para tener una mejor visibilidad de las imágenes fueron convertidas a 8 bits. (Fuente: Elaboración Propia).	43
4.4.	Imágenes de llama en distintos puntos de operación. (Fuente: Elaboración Propia).	44
4.5.	Gráfico intensidad de píxel en el canal rojo vs la métrica GFC, donde se puede apreciar que mientras mayor es la intensidad del píxel mejor es esta métrica (a) Cámara Basler acA 1920-50gc. (b) Cámara Basler scA 1390-17gc. (Fuente: Elaboración Propia).	45
4.6.	(a) Gráfico de los 3 primeros componentes principales.(b) Varianza acumulada al incrementar el número de componentes principales. (Fuente: Elaboración Propia)	46
4.7.	(a) Imagen de llama con 12 bits de intensidad, (b) Imagen de llama reconvertida a 8 bits de intensidad, el cuadro rojo se indica donde se midieron los espectros con el espectrofotómetro.(c) Gráfico de la recuperación espectral promedio ( $E_{est1}$ ) en comparación con un espectro calibrado aleatorio de la llama ( $E_1$ ). (d) Gráfico de la recuperación espectral píxel a píxel de toda la llama. (Fuente: Elaboración Propia)	47

4.8.	(a) Imagen de llama, el cuadro rojo se indica donde se hizo la recuperación espectral promedio.(b) Gráfico de la recuperación espectral promedio ( $E_{est1}$ ) en comparación con un espectro calibrado aleatorio de la llama ( $E_1$ ). (c) Gráfico de la recuperación espectral píxel a píxel de toda la llama. (Fuente: Elaboración Propia). . . . .	48
4.9.	(a) Ejemplo de una imagen de una llama turbulenta. (b) y (c) Mapa de temperatura de la llama (d) Dispersión estadística, se aprecia que el promedio de la temperatura de la imagen es $1494.0 \pm 137.7 [K]$ . (Fuente: Elaboración Propia). .	50
4.10.	(a) Ejemplo de una imagen de una llama turbulenta. (b) y (c) Mapa de temperatura de la llama (d) Dispersión estadística, se aprecia que el promedio de la temperatura de la imagen es $1728.3 \pm 182.0 [K]$ . (Fuente: Elaboración Propia). .	51
4.11.	(a) Imagen de llama tomada con la cámara Basler acA 1920-50gc y reconvertida a 8 bits de intensidad, (b) Mapa de radiación local píxel a píxel de la llama de la imagen (a). (c) Dispersión estadística, nos muestra que el promedio de la radiación local de la imagen es $112.8 \pm 62.9 [\mu W/cm^2]$ . (d) Imagen de llama tomada con la cámara Basler scA1390-17gc, (e) Mapa de radiación local píxel a píxel de la llama de la imagen (d), (f) Dispersión estadística, nos muestra que el promedio de la radiación local de la imagen es $88.6 \pm 51.4 [\mu W/cm^2]$ . (Fuente: Elaboración Propia). . . . .	52
4.12.	La figura (a) pertenece al segundo punto de operación, de las cuales se obtuvieron 100 imágenes. (a) Se puede apreciar, el promedio de la temperatura calculada a partir por los mapas de temperatura obtenidos. (b) Se observa la temperatura promedio total por punto de operación. (Fuente: Elaboración Propia). . . . .	54
4.13.	Función sensibilidad espectral dada por el fabricante . . . . .	55
4.14.	Imagen distintos flujos máxicos de llama (a) Llama laminar (b) Llama de transición (c) Llama turbulenta. (Fuente: Elaboración Propia). . . . .	55

4.15. (a) Imagen de llama original (b) estimación espectral promedio ( $E_{est1}$ ) en comparación con un espectro calibrado aleatorio de la llama ( $E_1$ ), obteniendo un GFC entre ambas curvas de 0.9985. (c) Gráfico de la recuperación espectral píxel por píxel de toda la llama. (d) Gráfico intensidad de píxel en el canal rojo ( $C_R$ ) vs la métrica GFC. <sup>2</sup> (Fuente: Elaboración Propia). . . . .	56
4.16. (a) Ejemplo de una imagen de una llama en un punto de operación (b) y (c) Mapa de temperatura de la llama (d) Dispersión estadística, se aprecia que el promedio de la temperatura de la imagen es $1650.2 \pm 153.14 [K]$ . <sup>3</sup> (Fuente: Elaboración Propia). . . . .	58
4.17. (a) Ejemplo de una imagen de una llama en un punto de operación (b) Mapa de radiación local de la llama (c) Dispersión estadística, nos muestra que el promedio de la radiación local de la imagen es $183.8 \pm 95.98 [K]$ . <sup>3</sup> (Fuente: Elaboración Propia). . . . .	59
4.18. La figura pertenece al primer punto de operación de la llama laminar, de las cuales se obtuvieron 100 imágenes. Se puede apreciar, el promedio de la temperatura calculada a partir por los mapas de temperatura obtenidos, donde el promedio total es $2.017,6 \pm 13,39 K$ . (Fuente: Elaboración Propia). . . . .	60
4.19. (a) Ejemplo de una imagen de una llama de tipo laminar con un acceso de aire en la entrada del mechero de 0% o cerrado, (b) Mapa de temperatura de la llama (a), (c) Ejemplo de una imagen de una llama de tipo laminar con un acceso de aire en la entrada del mechero de 100% o completamente abierto, (b) Mapa de temperatura de la llama (c). (Fuente: Elaboración Propia). . . . .	61
4.20. Comportamiento de la temperatura para los diferentes flujos máxicos en los que se modifican las condiciones aire/combustible. (Fuente: Elaboración Propia). . .	62
4.21. (a) Ejemplo de una imagen de una llama de tipo laminar con un acceso de aire en la entrada del mechero de 0% o cerrado, (b) Mapa de radiación de la llama (a), (c) Ejemplo de una imagen de una llama de tipo laminar con un acceso de aire en la entrada del mechero de 100% o completamente abierto, (b) Mapa de radiación de la llama (c). (Fuente: Elaboración Propia). . . . .	63

4.22. Comportamiento del índice de radiación global para los diferentes flujos máxicos en los que se modifican las condiciones aire/combustible y su comportamiento en logaritmo en base 10 del índice de radiación global.<sup>4</sup> (Fuente: Elaboración Propia). 64

4.23. (a) Imagen de llama laminar. La zona roja resaltada era el área del punto de medición usando el espectrofotómetro y la zona de cálculo de los espectros recuperados. (b) Comportamiento de la temperatura durante 30 segundos. (c) Error relativo con respecto a la temperatura estimada usando TCP con los datos medidos del espectrofotómetro.<sup>5</sup> (Fuente: Elaboración Propia). . . . . 66



# Acrónimos

<b>LPG</b>	Gas licuado del petróleo
<b>TCR</b>	Radiación Total Continua (Total Continuous Radiation)
<b>PCA</b>	Análisis de componentes principales (Principal component analysis)
<b>GFC</b>	Goodness of Fit Coefficient
<b>CCD</b>	dispositivo de carga acoplada (charge-Coupled Device)
<b>CMOS</b>	Semiconductor complementario de óxido metálico (complementary metal-oxide-semiconductor)
<b>TCP</b>	Pirometría de dos colores
<b>SVD</b>	Método de descomposición de valores singulares (singular value decomposition)
<b>UV</b>	ultra violeta
<b>IR</b>	Infrarroja
<b>TCP</b>	Pirometría de dos colores
<b>SPyR</b>	Spectral Processing and Radiometry
<b>Radp</b>	radiación local



# Agradecimientos

Quisiera agradecer en esta etapa de crecimiento profesional a las distintas personas que me fueron apoyando en este largo camino el cual contó con un estallido social y una pandemia, en especial agradezco a mis padres Marta y Fernando como también a mi hermano el cual siempre estuvo muy pendiente de mí. También, agradezco a mi polola Bárbara quien siempre estuvo estos años apoyándome y levantándome el ánimo. A mi segunda familia mis amigos Rulo, Cristóbal, Esteban, Pato, Pipe, Ale, Dani, Débora. Además, a mi primo Diego quien me presento a Esteban el cual ha sido fundamental para esta última etapa del magíster. Como también agradecer al laboratorio SPyR y mis amigos que hice ahí en especial a José y al Pollo. Tampoco, puedo olvidar a los chiquill@s de la liga de la Ciencia udec.

Finalmente, agradecer el enorme apoyo, paciencia y tolerancia de los profesores Luis Arias y Hugo Garcés, este último por depositar su confianza en mí para el proyecto Fondef IDeA ID18I10236 dándome la posibilidad de poder financiar este magíster.

A todos uds. gracias.

Sinceramente,

**Fernando Castillo Rivera**

Esta Tesis fue patrocinada por:

- Proyecto FONDEF ID18I10236.





# Capítulo 1

## Investigación Propuesta

### 1.1. Introducción

El mundo entero quema miles de toneladas de combustible anualmente, alcanzando cerca del 80 % de la producción total de energía; acelerando el cambio climático, el calentamiento global y la escasez de combustibles fósiles [1]. Así, se buscan alternativas usando energías renovables como; energía eólica, geotérmica, hidroeléctrica, mareomotriz, solar, undimotriz, biomasa y biocarburantes [2, 3, 4], pero estas no superan el 14 % de la energía que se consume diariamente, el otro 6 % pertenece a energía nuclear [1]. Para nuestro país, Chile, el 59 % de la energía producida, es a través de procesos de combustión [5]. La composición de los requerimientos energéticos en el año 2021 para Chile, estaba compuesta principalmente por la industria y minería con un 40 %, seguida por el transporte con un 33 % y el consumo residencial con un 23 %. Finalmente, y con igual proporción de consumo, se encuentran el sector comercial y público, y el consumo propio del sector energía en total con un 4 % [6]. Por lo tanto, la principal obtención de recursos energético a nivel mundial y regional es en base a combustión, y debido a esto, se busca la manera de poder optimizar y reducir las emisiones de carbono que se producen año a año debido a los procesos de quema.

Actualmente, el diagnóstico de la combustión en equipos industriales, tales como calderas y hornos, generalmente se ha limitado al análisis de la composición de los gases generados mediante técnicas convencionales [7]. Un diagnóstico en el origen del proceso, “la llama”, se dificulta con

estas técnicas, debido al ambiente hostil que representan las altas temperaturas, una atmósfera corrosiva y un limitado acceso a la llama [8, 9]. Hoy en día, la aplicación de métodos ópticos para evaluar estos procesos industriales, es un campo prominente de investigación y desarrollo. Esto se debe a que el uso de sensores ópticos apropiados combinados con métodos de medición bien definidos puede proporcionar información espectral importante como temperatura, radicales, emisividad, energía, que puede estar relacionada con varias condiciones del proceso que deben evaluarse. En varios procesos, como la combustión de combustibles de hidrocarburos, las técnicas de espectroscopía son particularmente adecuadas debido a la naturaleza sin contacto de la tecnología de detección óptica para capturar las emisiones espectrales de la llama. Además, los sensores pasivos o activos ópticos, tales como diodos basados en láser, cámaras con dispositivo de carga acoplada (charge-Coupled Device) (CCD), radiómetros, fotodiodos, fotomultiplicadores y células ultra violeta (UV) nos proporcionan información a partir de la emisión espectral de la llama, de esta manera podemos observar el comportamiento turbulento de la llama, concentración de  $O_2$ , emisión de contaminantes de CO, geometría de la llama, distribución de energía, identificación de moléculas, átomos, radicales e iones, y también la variación de la concentración de estos elementos con la temperatura y las condiciones operativas [10, 11, 12, 13, 14, 15].

El objetivo final de estos esfuerzos es desarrollar técnicas de control y monitoreo de la combustión para aumentar la eficiencia del proceso y disminuir las emisiones contaminantes [16, 17, 18], algo altamente deseable para la industria de generación de energía y cualquier otra que use la combustión como parte de las cadenas de producción. En particular, las mediciones locales o globales se pueden realizar con varias configuraciones ópticas que generalmente incluyen conjuntos de filtros ópticos acoplados a sensores ópticos como cámaras o fotodetectores. Dichas configuraciones se ajustan espectralmente para estimar la temperatura de la llama local o global mediante el uso de Pirometría de dos colores (TCP) [19, 20].

Sin embargo, con el creciente número de longitudes de onda detectadas, la complejidad y el tamaño del banco óptico de diseño espacial se incrementa [21, 22], lo que hace que dichos sistemas ópticos no sean prácticos para varias aplicaciones en tiempo real. Una solución alternativa es utilizar un sistema de imágenes multiespectrales, pero, la mayoría de ellos son sistemas de escaneo basados en “Push broom” en las que el tiempo necesario para adquirir la información espacial y espectral de la llama hace que sea casi imposible manejar un proceso no estacionario

como una llama, por ejemplo en Arablouei et al (2016) [23] se realizó un nuevo dispositivo rápido y robusto de imágenes hiperespectrales el cual puede capturar un cubo de datos con una resolución espacial de 192x192 píxeles y una resolución espectral de 500 bandas en aproximadamente 30 segundos, pero su procesamiento es muy lento para la oscilación de frecuencia típica de la llama de una caldera la cual supera los 100 Hz [24].

Aunque este es un problema, los sistemas multiespectrales se han diseñado en las últimas décadas en función de la respuesta de la cámara en color de píxeles para un pequeño número de canales y utilizando técnicas de reconstrucción espectral como por ejemplo de Maloney-Wandell. De hecho se analizó a partir de la reflectancia, la diferencia entre ceniza volcánica y nubes de agua ocupando las imágenes del Satélite Modis [25]. En cuanto a la implementación de recuperación espectral aplicado en diagnóstico de combustión, nos encontramos con el trabajo de Toro et al (2014)[10], el cual de la obtención de imágenes de llama con una cámara tricromática, puede recuperar espectros con el algoritmo de Maloney-Wandell de la emisión de llama de un mechero Bunsen (llama turbulenta) y una vela (llama laminar), con el fin de realizar un mapa de estimación de temperatura píxel a píxel con el método de TCP. Sin embargo, no se estudia como se puede ver afectada la temperatura al modificar la entrada aire en el mechero, ni otras variables de combustión como la modificación del flujo másico y tampoco se realiza una validación de la temperatura obtenida a través del método TCP. También, en Garcés et al (2017) [26] se estudió la recuperación espectral con el algoritmo de Maloney-Wandell en imágenes de llama de difusión laminar simétrica axial, obteniendo los espectros de emisión recuperados, calculando a partir de estos la transferencia de energía liberada por la radiación, es decir  $Rad_p$  y  $Rad_g$ . Sin embargo, no se estudia como varia la transferencia de energía para los distintos flujos másicos de llama, lo que permitiría acercarnos a los entornos reales.

El algoritmo de Maloney-Wandell para procesos de combustión se afianza frente a otros métodos de recuperación espectral como lo son Imai-Berns o el de Wiener [10], estos algoritmos tienen en común que no se requiere previamente la sensibilidad espectral del sensor, se basan en el conocimiento a priori de los distintos procesos y han demostrado buenos resultados [27]. Sin embargo, la respuesta del sensor debe medirse para cada espectro de entrenamiento. Lo cual es una tarea difícil para los procesos de combustión de llama, ya que requeriría mediciones actualizadas de nuestros sensores y en diferentes condiciones radiométricas. Además, el algoritmo

de Maloney-Wandell ha demostrado ser uno de los más robusto frente a ruidos e irregularidades como por ejemplo el fondo del horno [28], lo que es ideal para aplicaciones en un entorno poco controlado como los industriales.

Por lo tanto, plantear nuevas alternativas de monitoreo de llama, amplía opciones a la hora de tomar decisiones, pudiendo controlar variables que nos permitan optimizar este proceso y disminuir las emisiones contaminantes. Frente a esto, los sensores ópticos están siendo ampliamente utilizados dado a las distintas variables que pueden medir, sin embargo, estos siguen siendo perfeccionados y estudiados. Así, se plantea que el método de recuperación espectral de Maloney-Wandell al implementarse en una cámara tricromática, permitiría medir más variables, tales como; temperatura, radiación local y global en distintas condiciones de llama, como los distintos flujos másicos o de aire. Adquiriendo un sensor que nos permite sumar nuevas variables a los procesos de control, el cual además, es robusto frente a las distintas adversidades presentes en los entornos reales o industriales.

En esta tesis, se implementó el algoritmo de Maloney-Wandell, el cual está diseñado para extraer espectros continuo de una llama, en alta resolución espectral, y al nivel píxel-a-píxel. Se realizaron mediciones con una cámara con sensor CMOS y CCD Tricromáticas. De esta manera se implementó el algoritmo de recuperación espectral Maloney-Wandell en llamas con distintos flujo másico de LPG en el laboratorio Spectral Processing and Radiometry (SPyR) de la Universidad de Concepción. Una vez obtenidos los espectros recuperados continuos de la llama, se realizaron distintas estimaciones como; la temperatura por el método de TCP (en K), replicando lo hecho por Toro et al (2014) [10], pero añadiendo una corrección de errores mediante GFC; radiación local (Radp) (en unidades radiométricas de  $\mu W/cm^2$ ) y un índice de radiación global  $Rad_g$  (Radianza global, en  $\mu W$ ), dándole continuidad al trabajo hecho por Garcés et al (2017) [26], pero en distintos flujos másicos y variando la razón aire/combustible. Por lo tanto, a partir de los espectros recuperados de imágenes de distintos flujos de llama, se logró construir un mapa de temperatura y de radiación. Finalmente, se validó la estimación de temperatura obtenida por el método de dos longitudes de ondas en los espectros estimados comparándolas con la temperatura obtenida de los espectros reales. Logrando un sensor implementado en distintas cámaras que nos permite medir con un menor ruido, una temperatura más precisa y un número mayor de variables en distintas condiciones de llama, acercándonos más a las condiciones en

entornos industriales.

## 1.2. Hipótesis de Trabajo

Es posible desarrollar, a partir de una cámara tricromática, una implementación del algoritmo de Maloney-Wandell con un menor ruido para estimar la temperatura, radiación local, y un índice global de emisión de energía para diferentes flujos másicos de llama y en distintos porcentajes de accesos de aire de un mechero Bunsen. Además, de una posible validación de la temperatura estimada al ser comparada con un instrumento de referencia.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo General

Desarrollar a través de una cámara tricromática, una implementación del algoritmo de Maloney-Wandell con un menor ruido para estimar la temperatura, radiación local, y un índice global de emisión de energía para diferentes flujos másicos de llama y en distintos porcentajes de accesos de aire de un mechero Bunsen. Además, desarrollar una validación de la temperatura estimada al ser comparada con un instrumento de referencia.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar, con un espectrofotómetro, los distintos puntos de operación del proceso de combustión, a partir de los espectros emitidos por la llama **LPG**. (Objetivo logrado).<sup>1</sup>
- Desarrollar, en diferentes cámaras con sensores distintos, el algoritmo de reconstrucción espectral Maloney-Wandell para llamas turbulentas, laminares y de transición, y validar los espectros recuperados, comparándolos con las mediciones de emisión espectral medidas con un espectrofotómetro. Esta comparación se hará a través de la métrica GFC, eliminando los espectros ruidosos. (Objetivo logrado).<sup>2</sup>

- Desarrollar un sensor óptico que permita estimar temperatura con el método de dos longitudes de onda y radiación local a partir de los espectros recuperados, de manera de crear un mapa píxel a píxel de temperatura y radiación, que permita monitorear el estado de la llama. (Objetivo logrado).<sup>3</sup>
- Calcular un índice global de emisión de energía de llama, que permita caracterizar un estado de combustión (en base a la relación aire/combustible) solo a partir de este índice global.(Objetivo logrado).<sup>4</sup>
- Validar la estimación de temperatura obtenida por el método de dos longitudes de onda, a partir de los espectros recuperados por el método de Maloney-Wandell. (Objetivo logrado).<sup>5</sup>

Donde los artículos <sup>1,2,3,4,5</sup>, indicaran en el texto cuando se cumpla el objetivo específico señalado por este número.

## 1.4. Alcances y limitaciones



- El alcance de esta tesis es plantear un índice global de emisión de energía de llama.
- Validar la temperatura estimada a partir del método de dos longitudes de onda sobre los espectros recuperados de Maloney-Wandell, al comparar la temperatura estimada respecto a una temperatura validada, en este trabajo, se estimo la temperatura a partir de los espectros medidos por medio de un espectrofotómetro y se comparo con la temperatura estimada de los espectros recuperados.
- La clasificación de flujo másico (llamas turbulentas, laminares y de transición) será una definición relativa, debido a que no se cuenta con un medidor de flujo y se determinara mediante su definición cualitativa.
- El acceso a la utilización de los instrumentos se vio supeditado producto de la pandemia.
- Las mediciones son tomadas respetando todas las medidas sanitarias impuestas durante el tiempo de pandemia.

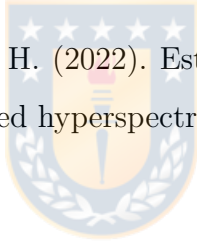
## 1.5. Artículos

A continuación se enlistan los artículos de conferencias asociados a esta tesis.

- **Castillo, F. A.**, Arias, L. E., Garcés, H. O., & Rojas, A. J. (2021, March). Turbulent Flame Monitoring Using Spectral Estimation Techniques. In *2021 IEEE International Conference on Automation/XXIV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)* (pp. 1-8). IEEE.
- **Castillo, F.**, Garcés, H. O., Arias, L., & Rojas, A. (2021, July). Temperature calculation from estimated spectra, using the two-color pyrometry. In *Applied Industrial Spectroscopy* (pp. ATh4C-3). Optical Society of America.

Además, este trabajo ha dado pie a una publicación que a la fecha esta en condición de revisión de pares en la revista *Measurement* de Elsevier.

- **Castillo, F.**, Arias, L. Garcés, H. (2022). Estimation of temperature, local and global radiation of flames, using retrieved hyperspectral imaging.



# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Combustión

La combustión es una reacción exotérmica entre dos sustancias, una de las cuales es reductora, también, denominada combustible, y la otra oxidante denominada comburente. El fenómeno que se origina está relacionado a un gran aumento de temperatura y, generalmente, emisión de luz. La combustión está determinada por la velocidad con la que tiene lugar y la posibilidad de que se acumule calor (aumentando la temperatura). Como consecuencia, se obtienen productos y se libera calor. Por lo tanto, la combustión es un conjunto de procesos físicos y químicos por los cuales se libera parte de la energía interna del combustible. Una parte de esa energía se transforma en calor. El calor liberado por una llama se puede transferir de tres formas diferentes: conducción, convección y radiación. La conducción es la transferencia de calor a través de objetos sólidos, tales como el suelo o el metal en una pared de una caldera. La convección, es la transferencia de calor a través de corrientes de aire es decir el intercambio de moléculas frías y calientes, es la causa de que el agua de una tetera se caliente uniformemente aunque sólo su parte inferior esté en contacto con la llama, lo mismo sucede con la masa de agua en una caldera a vapor. La radiación es la transferencia de calor por radiación electromagnética y es el principal mecanismo por el que la llama calienta las calderas.

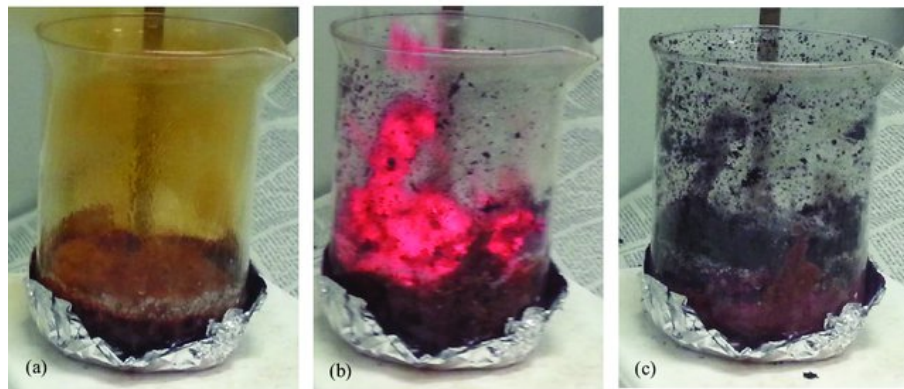
Los combustibles tienen en su composición elementos principales como carbón, hidrógeno, azufre (C,H,S) y otros no combustibles, como el vanadio, níquel, sodio, potasio, silicio, entre



otros (V, Ni, Na, K, Si). El comburente más habitual usado en la combustión es el aire (21 % Oxígeno, 73 % Nitrógeno y 6 % de otros gases). Además, otro elemento importante a definir es el calor de combustión el cual se define como la disminución de la entalpía de un cuerpo en condiciones normales de presión y a una temperatura definida, es decir, es el calor que libera el combustible cuando este produce una reacción química de oxidación. En la combustión, cada uno de los componentes del combustible va a sufrir la reacción de oxidación correspondiente [29].

### 2.1.1. Fases de la reacción de combustión

Se pueden distinguir tres fases en la reacción de combustión. La primera es la fase de pre-reacción (formación de radicales). Los compuestos hidrocarbonados se descomponen dando lugar a la formación de radicales, que son unos compuestos intermedios inestables y muy activos. De este modo el carbono y el hidrógeno pueden reaccionar con el oxígeno. La segunda fase es la de oxidación donde se produce la combinación entre los elementos y el oxígeno. Es una fase muy exotérmica y es cuando tiene lugar la propagación de la llama. Finalmente en la fase de terminación se forman los compuestos estables donde el conjunto de estos compuestos es lo que llamamos gases de combustión. Es necesario que se produzca una gran coordinación entre la primera y la segunda fase, ya que si no podría llegar a producirse una explosión por acumulación de radicales [29]. A continuación en la Fig. (2.1) para una solución de litio.



**Fig. 2.1:** En (a) podemos ver la formación de radicales, (b) el instante de la combustión y (c) la fase de terminación. (Fuente: [30]).

### 2.1.2. Clases de reacciones de combustión

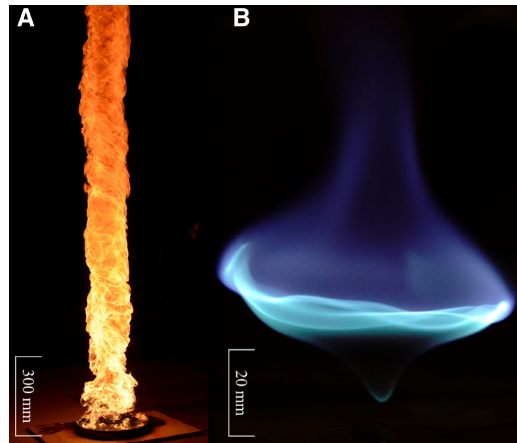
Las reacciones se pueden clasificar según el modo en el cual transcurre el proceso de combustión, es decir, una combustión neutra o estequiométrica, combustión incompleta o imperfecta y combustión completa.

La combustión neutra es aquella que se produce cuando el aire empleado aporta la cantidad justa de oxígeno para que todos los reactivos se transformen en productos. Para que la estequiometría se cumpla, hay que considerar todos los elementos que sufren la reacción de combustión en el combustible. Cuando la reacción tenga lugar totalmente, entonces no habrá H, O, S y C, porque estos elementos se transformarán en productos correspondientes que irán en los gases de combustión. Como gases inertes aparecerá, por lo menos, el nitrógeno. A veces, a los gases de combustión se les llama poder comburívoro o poder fumígeno, los que se definen como los gases húmedos totales procedentes de una combustión neutra o estequiométrica (de todos los elementos combustibles e inertes también).

La combustión incompleta es aquella en la que por defecto en el suministro de aire no hay oxígeno suficiente para que se produzca la oxidación total del carbono. Esto quiere decir que no todo el carbono se va a transformar en  $CO_2$  y aparecerá como producto de combustión el CO, lo que provoca la aparición de los inquemados, definidos como la materia combustible que ha quedado sin quemar o parcialmente quemada, los cuales, también se pueden producir en el aparato quemador. Los inquemados pueden ser de dos clases: sólidos y gaseosos, dentro de los inquemados sólidos está el carbono (hollín), el cual provoca un ennegrecimiento de los humos de combustión. Mientras que dentro de los inquemados gaseosos está el CO,  $H_2$ . Cuando aparecen inquemados es señal de que no se ha aprovechado bien el combustible, por lo que la combustión que se está realizando es deficiente y se deberían tomar medidas de algún tipo para mejorarla.

La combustión completa es aquella donde existe un exceso de aire, es decir, de oxígeno. El exceso se realiza sobre la cantidad estequiométricamente necesaria para que todos los productos combustibles sufran la oxidación (tanto el C como el O ó el H). En este caso no se van a producir inquemados. En la práctica se hace difícil conseguir la combustión completa debido a que debe existir suficiente aire en la cámara de combustión para que ocurra, por ello es necesario aportar un exceso de aire. El exceso de aire se define como la cantidad de aire por encima del teórico

que hay que aportar para que se realice la combustión completa del combustible [29]. En la siguiente Fig. 2.2, se puede apreciar un ejemplo de la combustión completa e incompleta.

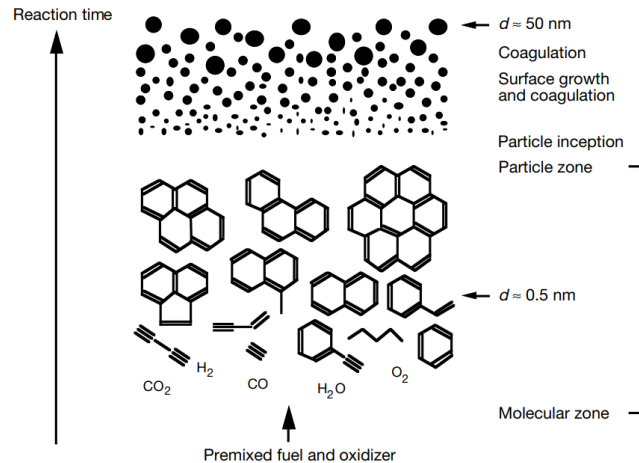


**Fig. 2.2:** En (a) se aprecia una combustión incompleta y en (b) una completa. (Fuente: [31]).

### 2.1.3. Hollín

El hollín son las partículas sólidas que se forman cuando se produce combustión incompleta de hidrocarburos. Está formado principalmente de carbón, como mínimo, posee un 1% de hidrógeno, por lo que responde aproximadamente a la fórmula empírica  $C_8H$ . Las partículas de hollín son nanopartículas esféricas de aproximadamente 50 nm de diámetro. El hollín, tiene un proceso de formación compleja como se puede ver en la Fig. (2.3), donde los hidrocarburos gaseosos livianos son convertidos en carbono sólido en escasos milisegundos. La propensión a formar hollín es una función compleja que depende del tipo de llama, temperatura de llama y la naturaleza del combustible [32].

La emisión de hollín al ambiente tiene efectos directos e indirectos en este. Directamente, altera la radiación global al absorber y dispersar la luz, lo cual reduce el flujo de radiación solar neta a la superficie de la tierra. La absorción de la luz hace que se caliente mas la atmósfera. Del mismo modo, la deposición de hollín en las superficies de hielo y nieve aumenta la absorción de la superficie de la energía solar, calentando y potencialmente derritiendo el hielo y la nieve. Los efectos indirectos en el clima se deben a la capacidad de las partículas de hollín para alterar las propiedades de las nubes al servir como nudo de condensación de nubes (CCN). Para nubes



**Fig. 2.3:** Etapas de formación del hollín (Fuente: [33]).

con el mismo contenido de agua líquida, un aumento en el número de CCN conduce a pequeñas gotas de nubes. Se espera que estas nubes sean más reflexivas, tengan una vida más larga y produzcan menos precipitación [34].

Otro aspecto negativo del hollín es debido al hecho de que sean partículas tan pequeñas y de composición tóxica, lo hace peligroso para la salud de las personas, siendo fáciles de respirar causando enfermedades coronarias, asma, bronquitis y otras enfermedades respiratorias [35, 36]. La toxicidad inducida por la exposición o la inhalación de partículas de hollín depende en gran medida del tamaño y el contenido de las partículas de hollín. Por ejemplo, los contenidos de  $OC^3$ , que son más abundantes en hollín en la etapa inicial de formación, se han encontrado más tóxicos en pruebas in vitro [37]. Se ha sugerido “basándose en experimentos con animales” que las partículas pequeñas de hollín de aproximadamente 100 nm o menos, conocidas como partículas de hollín ultrafinas (UFP), tienen más probabilidades de causar enfermedades respiratorias y circulatorias [38].

Además, las partículas de hollín producidas durante procesos de combustión afectan significativamente el rendimiento y durabilidad de muchos sistemas de ingeniería como las turbinas a gas y motores diesel [39]. Por otro lado, se ha demostrado que un incremento en la producción del hollín aumenta la tasa de liberación de energía [40], lo que implica procesos más eficientes en términos de aparatos de combustión como los hornos industriales, lo cual conlleva una posible mayor emisión de hollín si este no es oxidado completamente. La emisión total del hollín hacia

el ambiente depende del balance entre los procesos de formación y oxidación.

## 2.2. Teoría de la llama

La llama se define como el medio gaseoso en el que se desarrollan las reacciones de combustión. Aquí es donde el combustible y el comburente se encuentran mezclados y en reacción. La llama puede adoptar diferentes formas, según el medio técnico, y también la forma del quemador. Esto es así porque el quemador es donde se pulveriza el combustible para que entre en contacto con el aire. El frente de llama es la zona que marca la separación entre el gas quemado y el gas sin quemar y donde tienen lugar las reacciones de oxidación principales. La propagación de la llama es el desplazamiento de ésta a través de la masa gaseosa, donde esta propagación se efectúa en el frente de llama. La velocidad de propagación va a depender de la transmisión de calor entre la llama y las zonas contiguas (gases quemados y no quemados). Cuando los gases sin quemar alcanzan la temperatura de ignición, entonces empezarán a sufrir la combustión. Para que la llama comience y quede estable, se debe estabilizar el frente de llama. Para ello, se debe coordinar la velocidad de escape de gases y de propagación de la llama con la entrada de comburente (aire) y combustible. Para que tenga lugar la combustión es necesario que se alcance la temperatura de ignición, que es aquella a la cual la mezcla combustible/comburente no se extingue, aunque se retire la fuente de calor externa [41].

### 2.2.1. Clasificación de llamas

Las llamas se pueden clasificar por el tipo de mezcla de los reactivos, por el tipo de flujo, por su posición relativa a las paredes, por el tipo de combustible, por la granulometría del combustible condensado, etc [42]. A continuación, en la Fig. 2.4 se presenta un esquema de clasificación:

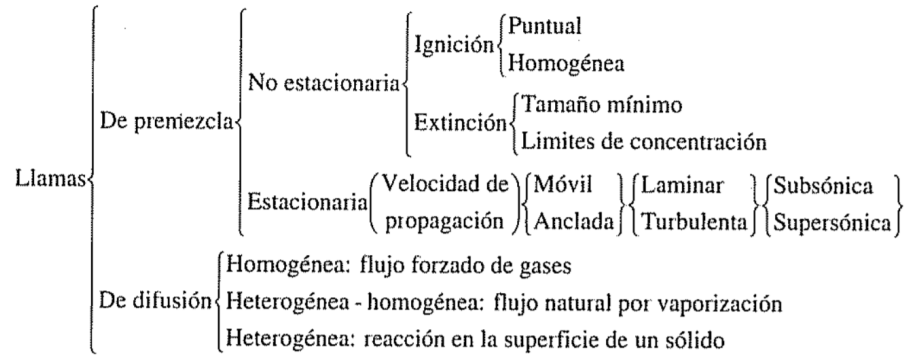


Fig. 2.4: Clasificación de llamas. (Fuente: [42]).

## De premezcla

Las llamas de premezcla, son aquellas en que el oxidante y el combustible inicialmente se encuentran juntos y combustionan en una zona común. Una de las características de las llamas de premezcla es que en este tipo de llamas la combustión es más completa y se alcanzan mayores temperaturas. Un motor de combustión interna alternativo de gasolina o conocidos como motores diésel es un ejemplo de dispositivo en el que se produce este tipo de combustión, otro ejemplo es el de una llama de cocina.

## Difusión

Las llamas de difusión, son aquellas en que el combustible y el oxidante se encuentran inicialmente separados, para luego difundir hacia una zona de reacción desde partes opuestas de la llama. De este modo, las llamas axisimétricas de difusión en coflujo laminar tienen un campo de velocidades relativamente simple, lo que permite realizar mediciones experimentales replicables, como también modelos numéricos en sólo dos dimensiones debido a la simetría axial. Una vela o la llama de un mechero es un ejemplo de llama de difusión.

Ambos tipos de procesos pueden ser laminares o turbulentos dependiendo de cómo sea el flujo másico de la mezcla de reactivos o de cada uno de los reactivos por separado.

### Laminar

Se llama laminar si es que la forma de la llama se asemeja a una lámina, es decir, no existen grandes variaciones en el movimiento (por ejemplo en el caso de una vela).

### Transición

Se llama transición ya que la llama se encuentra en un estado intermedio entre laminar y turbulento,

### Turbulenta

Es turbulenta en el caso que la forma de la llama sea más irregular y no sigue un flujo aerodinámico.



**Fig. 2.5:** Ejemplo de una llama de propano en su flujo laminar, transición y turbulenta. (Fuente: [43])

Podemos clasificar si la llama es turbulenta o laminar de forma más empírica a través del número de Reynolds, el cual es adimensional y queda expresado por la ecuación (2.1).

$$Re = \frac{uL_c}{\nu} \quad (2.1)$$

Donde  $u$  es la velocidad de fluido en  $m/s$ ,  $L_c$  es el largo característico que es responsable de formar la capa límite de la zona de transferencia de calor en  $m$  y  $\nu$  es la viscosidad cinemática en  $m^2/s$ . El número de Reynolds indica la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido. En la Tabla 2.1, podemos apreciar esta clasificación.

**Tabla 2.1:** Rangos de Reynolds y comportamiento de fluidos [44]

Reynolds entre	Característica
0 - 1	movimiento laminar lento, altamente viscoso
1 - 100	laminar, fuerte dependencia del número de Reynolds
100 - $10^3$	laminar, es útil la teoría de capa límite
$10^3$ - $10^4$	transición a la turbulencia
$10^4$ - $10^6$	turbulento, moderada dependencia del número de Reynolds
$10^6$ - $\infty$	turbulento, débil dependencia del número de Reynolds

El numero de Reynolds puede ser calculado a partir de la ecuación 2.1, al medir la velocidad  $u$  con un instrumento pequeño y sensible como un anemómetro de hilo caliente, un transductor de presión piezoeléctrico o un rotámetro [45], dejando las otras variables fijas en la ecuación. Para profundizar respecto al tema, puede consultarse Zargar et al (2019) [46].

Es preciso conocer el tipo de llama, ya que para realizar el algoritmo de recuperación espectral Maloney-Wandell, es necesario tener la matriz de entrenamiento del proceso. Para este estudio, se ocupó una llama de difusión laminar, transición y turbulenta.

### 2.2.2. Forma, color y temperatura de la llama

La forma que presenta una llama depende del medio técnico que prepara la mezcla del combustible/comburente, es decir, depende del quemador utilizado, ya que éste es el encargado de pulverizar y repartir el combustible. Si la combustión es buena, la llama no será opaca. El color negro lo van a dar los inquemados.

La temperatura que va a alcanzar la llama dependerá de factores como la composición y porcentaje del comburente, la velocidad global de la combustión, la cual depende de la reactividad del combustible, la forma y eficacia del sistema de combustión y de la temperatura inicial



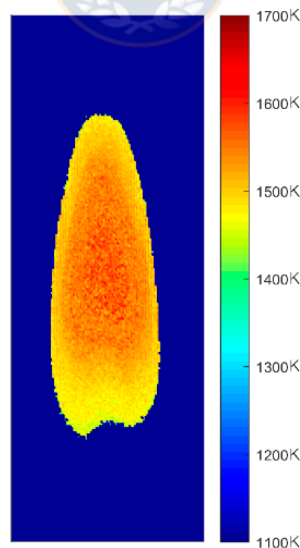
de los reactivos. Se deberá tener en cuenta también el calor sensible de los reactivos. Al llegar y sobrepasar los  $2000^{\circ}\text{C}$ , los gases de combustión se pueden descomponer, por ello da a lugar que otros compuestos pueden afectar a la combustión y a la llama[41].

### 2.2.3. Definiciones relativas a la temperatura de combustión

La temperatura es una variable referida a la magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico. En procesos de combustión la temperatura es un parámetro muy importante para evaluar la eficiencia térmica en la calidad de la combustión.

#### Temperatura adiabática de combustión

También se denomina temperatura teórica de combustión o temperatura de combustión calorimétrica. Es la temperatura que se obtendría en una combustión estequiométrica con mezcla perfectamente homogénea y en un tanque que permita evitar cualquier pérdida de calor al exterior, es decir un recipiente adiabático. Esta temperatura aumenta con la potencia calorífica del combustible y disminuye con el poder calorífico del combustible [47].



**Fig. 2.6:** Distribución de temperatura de una llama en un proceso de combustión. (Fuente: [48]).

### Temperatura máxima de llama adiabática

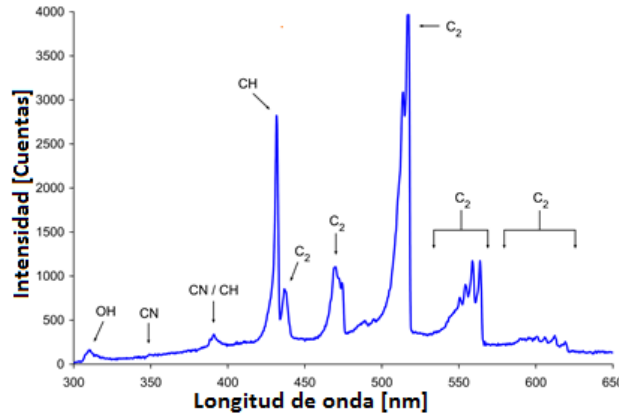
Es la temperatura que se alcanza cuando la cantidad de aire empleada en la combustión es la cantidad estequiométricamente necesaria para ello. Se trata de un valor ideal, ya que las condiciones estequiométricas son imposibles de conseguir en la realidad. Las temperaturas máximas de la llama son en 200-300°C inferiores a la temperatura máxima teórica de la llama. En la llama se distinguen 3 zonas, que son: la zona de inflamación, la zona de reacción y la zona oxidante. La zona de inflamación (llama transparente), es la zona donde existe un déficit de oxígeno y es la zona mas interior. La zona oxidante o penacho (llama anaranjada), es la zona donde hay exceso de oxígeno y es la zona exterior. Mientras que la zona de reacción o zona de temperatura máxima (llama azul), es la zona que queda entre ambas y contiene la mayor emisión de energía (calor) [47]. En la Fig. 2.6 se ilustra un ejemplo de un mapa de temperatura de llama.

### 2.3. Teoría espectral de la llama

La llama y su espectro, contiene importante información sobre el proceso de combustión lo que implica que el análisis de dicha información permite evaluar el estado de la combustión con respecto a las diferentes especies presentes. La energía emitida por una llama es espectralmente distribuida en emisiones continuas y discontinuas dependiendo del tipo de combustible. El espectro continuo se encuentra atribuido a una amplia banda de longitudes de onda producido por la radiación emitida por un cuerpo como resultado de su temperatura, mientras que un espectro discontinuo se encuentra confinado a una banda angosta de longitudes de onda y producido por átomos y moléculas aisladas [49, 50]. Un ejemplo del espectro de llama se puede ver en la Fig. (2.7).

De la emisión espectral de llama podemos obtener distintos parámetros a partir de los espectros continuos y discontinuos. Los espectros continuos están relacionados al cálculo de temperatura, un parámetro importante ya que está asociado al hollín la que se puede obtener al realizar la TCP [51]. También, se puede obtener la energía que produce una llama a través del  $Rad_g$ , parámetro relevante debido a que permitiría optimizar los procesos de combustión [26].

Los espectros discontinuos están asociados a la emisión de contaminantes en la atmósfera como  $CO$  Y  $NO_x$ , parámetros considerables para regular la calidad del aire [15].



**Fig. 2.7:** Ejemplo de un espectro electromagnético de una llama azul en el rango visible. (Fuente: [52])



## 2.4. Ley de Planck

En 1899 Planck expresó una hipótesis a partir de los resultados experimentales que obtuvo de cuerpos que captaban o emitían energía. Por lo tanto, la energía emitida o captada por un cuerpo como radiación electromagnética es múltiplo de una constante  $h$  por la frecuencia  $f$  de radiación. Luego la expresión para la intensidad de radiación emitida por un cuerpo negro es la siguiente:

$$I_{b\lambda}(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right]} \left[ \frac{W}{m^2 nm} \right] \quad (2.2)$$

donde  $c_1$  y  $c_2$  son conocidas como constante de Planck, las cuales equivalen a  $c_1 = 8\pi hc^2 = 1,4997 \times 10^{-15} [Wm^2]$  y  $c_2 = hc/k = 1,438 \times 10^{-2} [mK]$  [53]. En la Fig. (2.8) se aprecia el comportamiento de la ley de Planck para diferentes temperaturas de un cuerpo negro.

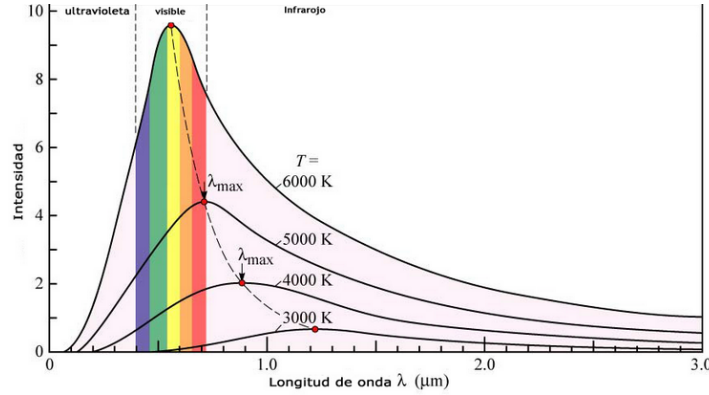


Fig. 2.8: Radiación espectral de un cuerpo negro para varias temperaturas. (Fuente: [54])

## 2.5. Método de dos longitudes de onda para medición de temperatura

Este método es bastante utilizado para hacer mediciones de temperatura con una precisión aceptable. Fue propuesto por Campbell en 1925 [55] y utiliza las mediciones en dos longitudes de onda, inicialmente obtenidas mediante filtros de banda angosta, lo cual será reemplazado en el presente trabajo por las mediciones obtenidas digitalmente mediante el radiómetro.

En primer lugar, definimos la emisividad monocromática, como la proporción de radiación térmica emitida por un objeto a una diferencia de temperatura determinada. Esta radiación no necesita un medio para propagarse ya que es electromagnética. El coeficiente de emisividad monocromática  $E_\lambda$  es un número adimensional que establece la relación de un objeto para irradiar energía térmica con su capacidad de irradiar energía si este fuese un cuerpo negro, de acuerdo a,

$$E_\lambda = \frac{I_\lambda}{I_{b\lambda}} \quad (2.3)$$

donde  $I_\lambda$  es la intensidad de radiación espectral de un cuerpo y  $I_{b\lambda}$  es la intensidad de radiación espectral del cuerpo negro. Cuando, se esta presente a un cuerpo negro, el coeficiente  $E_\lambda = 1$ . En cambio, para un objeto real, el coeficiente es menor. De acuerdo a esto y considerando una llama percibida por un observador y la radiación que ésta emite, va a ser dependiente de la longitud de onda  $\lambda$ , la temperatura  $T$  y denominaremos  $\omega$  como a las cantidades de hollín y

radicales. Con esto, se puede expresar la Ecuación (2.3) como,

$$I_{\lambda}(\lambda, T, \omega) = E_{\lambda}(\lambda, T, \omega) \cdot I_{b\lambda}(\lambda, T). \quad (2.4)$$

La ecuación (2.4) muestra que la radiación espectral de la llama es proporcional a la radiación que emitiría un cuerpo negro a la temperatura y longitud de onda respectiva mediante la emisividad monocromática. Según Ngendakumana et al (1993) [56], para determinar la emisividad de una llama se puede asumir que la llama se encuentra en un equilibrio termodinámico, por lo tanto se aplica la ley de Kirchhoff de Radiación Térmica, la cual enuncia que en equilibrio térmico, la emitancia (o emisividad) es igual a su absorbancia.

$$E_{\lambda} = A_{\lambda} = 1 - e^{-K_{\lambda}L} \quad (2.5)$$

donde  $A_{\lambda}$  es la absorbancia monocromática,  $K_{\lambda}$  es el coeficiente de absorbancia monocromática y  $L$  es el largo de la trayectoria óptica.

Por otro lado, a partir de la ley de Bourger, dice que la radiación espectral  $I_{\lambda}$  a lo largo de una trayectoria dada, se atenúa exponencialmente cuando pasa a través de un medio absorbente de dispersión, es decir,

$$I_{\lambda} = I_{\lambda 0} e^{-K_{\lambda}L} \quad (2.6)$$

siendo  $I_{\lambda 0}$  la intensidad en el origen de la trayectoria. En Gaydon et al (1960) [57] se muestra que el coeficiente de absorbancia se puede expresar como  $K_{\lambda} = k\lambda^{\alpha}$ , donde  $k$  es el coeficiente de extinción, por lo tanto la emisividad se puede expresar como

$$E_{\lambda} = 1 - e^{-\frac{\beta}{\lambda^{\alpha}}} \quad (2.7)$$

donde los parámetros  $\beta$  y  $\alpha$  se encuentran en los rangos

$$0,7 < \beta < 1,1$$

$$0,65 < \alpha < 1,43$$

Siendo  $\alpha = 1,39$  para el gas licuado del petróleo (LPG) [10].

Además, se tiene de la ley de Planck, que establece,

$$I_{b\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right]} \quad (2.8)$$

y reemplazando la emisividad obtenida (Ecuación 2.7) y la ley de Planck (Ecuación 2.8) en la Ecuación (2.4), nos queda

$$I_{\lambda}(T) = [1 - e^{-\frac{\beta}{\lambda^{\alpha}}}] \cdot \left[ \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right]} \right] \quad (2.9)$$

Considerando la ley de desplazamiento de Wien que permite expresar cuantitativamente los cambios que se producen con las variaciones de temperatura en el espectro de un cuerpo, y puede ser representada en la siguiente ecuación como

$$\lambda_{m\acute{a}x}T \geq 2,898 \times 10^{-3}[mK] \quad (2.10)$$

Así, se puede aproximar la Ecuación (2.9) según la relación establecida en la Ecuación (2.10), quedando

$$e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \geq 1 \quad (2.11)$$

reduciendo la ley de radiación de Planck a,

$$I_{b\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (2.12)$$

Dado que la radianza espectral de una llama  $I_{\lambda}$  es más pequeña que la de un cuerpo negro  $I_{b\lambda}$  a la misma temperatura, se puede asumir que de la Ecuación (2.7),  $E_{\lambda} \leq 1$ , con lo que se puede aproximar a,

$$E_{\lambda} \approx -\frac{\beta}{\lambda^{\alpha}} \quad (2.13)$$

Así, la radianza espectral  $I_{\lambda}$  está dada por,

$$I_{\lambda}(T) = -\frac{\beta c_1}{\lambda^{\alpha+5}} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (2.14)$$

La ecuación posee dos incógnitas, la temperatura  $T$  (variable que se busca), y el factor  $\beta$ . Dado que  $\beta = k_s L_s$  añade una incógnita más a la ecuación, donde  $k_s$  depende de cuánto hollín hay en un instante y  $L_s$  del espesor de la llama en el instante en el que se está midiendo ésta, variando en el tiempo sobre todo en una llama fluctuante. Por lo que, teniendo el espectro de una llama, estos factores serán los mismos para cualquier longitud de onda. Entonces se

realiza una razón entre dos intensidades de radiación espectral, eliminando estas variables de la ecuación y pudiendo así tener a la temperatura  $T$  como la única incógnita del problema. Por lo que de la Ecuación de intensidad (2.14) se realiza una razón entre las longitudes de onda  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , quedando,

$$\frac{I_{\lambda_1}(T)}{I_{\lambda_2}(T)} = \frac{-\frac{\beta c_1}{\lambda_1^{\alpha+5}} e^{-\frac{c_2}{\lambda_1 T}}}{-\frac{\beta c_1}{\lambda_2^{\alpha+5}} e^{-\frac{c_2}{\lambda_2 T}}} \quad (2.15)$$

y despejando la temperatura  $T$ , nos queda que

$$T = \frac{c_2 \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \left( \frac{I_{\lambda_1}(T) \cdot \lambda_1^{\alpha+5}}{I_{\lambda_2}(T) \cdot \lambda_2^{\alpha+5}} \right)} \quad (2.16)$$

Esta ecuación (2.16), sera la utilizada para la estimación de temperatura para nuestros espectros recuperados.

## 2.6. Radiación Local



El modelo matemático para los espectros de llama  $E_m$ , medidos por un sensor óptico como un espectrofotómetro viene dado por la suma de un componente de radiación continuo o de banda ancha  $E$ , además de componentes discontinuos  $E_d$  y un ruido aditivo  $n$ , como se presenta en la ecuación (2.17):

$$E_m(\lambda, u, k) = E(\lambda, u, k) + E_d(\lambda, u, k) + n(\lambda, u, k) \quad (2.17)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $u$  es la ubicación espacial del volumen de medición en la llama y  $k$  es un tiempo discreto (relacionado con el tiempo de integración de la medición óptica)[50].

El componente discontinuo  $E_d$  está típicamente relacionado con la formación de radicales libres, como  $\text{OH}^*$  centrado a 309 nm,  $\text{CH}^*$  centrado a 432 nm y  $\text{C}_2^*$  centrado a 516 nm. La intensidad de la concentración discontinua de estos radicales representan variables ópticas comúnmente aplicadas en el diagnóstico de combustión basado en espectros de llama de alta resolución [58, 59].

El componente continuo  $E$  es el que posee la mayor parte de la información sobre la energía liberada de la llama [60]. De esta manera, si el componente continuo está calibrado, nombrado

como  $\hat{E}$  en  $\mu W/cm^2nm$ , lo cual es en esencia, la radiación espectral del objetivo y recopilada por un sistema óptico calibrado.

El término aditivo  $n$  resume los efectos de ruido aleatorio blanco no correlacionado, principalmente dado por el ruido de la lectura electrónica, la corriente oscura del sensor y la carga no esencial, como la carga inducida por el reloj.

De esta manera, podemos definir la radiación local  $Rad_p$  como cantidad de energía capturada por un sensor óptico en un píxel local [26], y está determinada por la siguiente ecuación:

$$Rad_p(k, u) = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \hat{E}(\lambda, u, k) d\lambda \quad (2.18)$$

donde  $\lambda_{min}$  y  $\lambda_{max}$  representan los límites iniciales y finales respectivamente de las longitudes de onda medidas.

## 2.7. Radiación Global

De acuerdo con la ecuación (2.18), se propone en Garcés et al (2017) [26] que el área bajo el espectro continuo  $E(\lambda, u, k)$  es proporcional a la energía liberada por la llama, en el dominio de la banda espectral  $\lambda \in [\lambda_1, \lambda_2]$ . Por lo tanto, a partir de los espectros recuperados a nivel de píxel ( $\hat{E}_{MW}$ ), es posible estimar la energía global liberada por la llama,  $Rad_g$  de  $Rad_p(u, k)$ . Por lo tanto, usando la ecuación fundamental de transferencia radiativa [50], y asumiendo que los parámetros radiométricos son invariantes,  $Rad_g$  se puede calcular como la suma acumulada de la radiación local calibrada sobre toda la imagen de la llama, de la siguiente manera :

$$Rad_g(k) = \frac{A_f}{R^2} \cdot \sum_{u=1}^L Rad_p(u, k) \quad (2.19)$$

donde  $A_f$  representa el área de la llama en dos dimensiones,  $R$  es la distancia media entre la llama y el sensor óptico y  $L$  es el número total de píxeles que miden la llama.

## 2.8. Recuperación Espectral

A continuación se mostrarán los fundamentos básicos para realizar la recuperación espectral de Maloney-Wandell.



### 2.8.1. Análisis de Componentes Principales

El análisis de componentes principales (PCA) es una técnica estadística multivariante de simplificación, que permite transformar un conjunto de variables originales correlacionadas entre sí, en un conjunto sintético de variables no correlacionados denominados factores o componentes principales. En esta transformación no se establecen jerarquías entre variables y se elimina la información repetida. Las nuevas variables son combinaciones linealmente independientes de las variables originales, ordenadas de acuerdo a la representación de dispersión respecto a la nube total de información recogida en las muestras[61].

Desde el punto de vista matemático, PCA es una transformación lineal que permite distribuir datos en un sistema de referencia más conveniente para la reducción de su dimensión. En efecto, si se tiene un set de datos bidimensionales que depende de  $x_1$  y  $x_2$ , se pueden rotar los ejes hasta obtener  $y_1$  e  $y_2$  de modo que estas nuevas variables son combinaciones lineales de las dos primeras, como se muestra en las ecuaciones (2.20) y (2.21).

$$y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \quad (2.20)$$

$$y_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 \quad (2.21)$$

Los coeficientes  $a_{11}$  y  $a_{12}$  conforman un vector componente, mientras que  $a_{21}$  y  $a_{22}$  son referidos a otro vector. Dependiendo de la varianza de cada uno de ellos, se les llamará primer y segundo componente principal. Finalmente, si se tiene  $d$  variables  $x_1, x_2, \dots, x_d$ , el nuevo sistema de referencia  $y_1, y_2, \dots, y_d$  puede ser representado de la siguiente forma:

$$[y] = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_d] = \begin{bmatrix} a_{11}x_1 & a_{12}x_2 & \dots & a_{1d}x_d \\ a_{21}x_1 & a_{22}x_2 & \dots & a_{2d}x_d \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{d1}x_1 & a_{d2}x_2 & \dots & a_{dd}x_d \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Y podemos escribirla como:

$$y_d = \sum_{i=1}^{\infty} a_{id}x_i \quad (2.23)$$

Posteriormente, se calculan los componentes principales.

### 2.8.2. Cálculo de componentes principales

Existen diferentes formas de cálculo de componentes principales, siendo los métodos más ocupados en cálculo de vectores propios y el método SVD (Simple Value Descomposition). Ambos pueden trabajar sobre la matriz de correlación  $R$  o sobre la matriz de covarianza  $C$ . Ambos métodos necesitan de una matriz de datos a la cual aplicar PCA, y que recibe el nombre de matriz de entrenamiento  $M_{m \times n}$ , que contiene  $n$  muestras que dependen de  $m$  variables, las cuales se representan en la ecuación (2.23). La construcción de la matriz de correlación  $R_{m \times n}$  se define en la ecuación (2.24).

$$R = [r_{i,j}] = \frac{cov(M_i, M_j)}{\sqrt{var(M_i)var(M_j)}} \quad (2.24)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

Donde  $M_i$  es la  $i$ -ésima columna de la matriz de entrenamiento. El cálculo con la matriz de correlación equivale a obtener componentes con variables estandarizadas, ya que la correlación es normalizada por las desviaciones estándar, como se muestra en la ecuación (2.24). Por otro lado, para construir la matriz de covarianza  $C_{m \times m}$  definida en la ecuación (2.26).

$$C = [c_{i,j}] = cov(M_i, M_j) \quad (2.25)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

Al realizar el cálculo con la matriz de covarianza, no se tendrán los componentes principales estandarizados.

#### Cálculo de vectores propios

Se calculan los valores propios de la matriz  $R$  o  $C$ , de la forma típica mostrada a continuación en la ecuación (2.26).

$$det(C - \lambda I) = 0 \quad (2.26)$$

Una vez determinados los valores propios  $\lambda_i$ , es necesario calcular los vectores propios  $v_i$  solucionando el sistema de ecuaciones representado en forma matricial en la ecuación (2.27).

$$(C - \lambda_i I) \cdot v_i = 0 \quad (2.27)$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

Estos  $m$  vectores propios son los componentes que tienen información asociada al proceso, y aquellos que tengan mayor cantidad de información son llamados componentes principales. La cantidad de varianza es directamente proporcional al valor propio correspondiente, y se puede calcular su porcentaje sumando todos los valores propios que representan el 100 % de la varianza. Esto quiere decir que los  $m$  vectores propios forman una base de la matriz de entrenamiento  $M$ , de modo que como los componentes principales tienen la mayor cantidad de información se tiene una buena representación solo con ellos.



### Cálculo con SVD

El método de descomposición de valores singulares de una matriz  $C$  o  $R$ , consiste en factorizar dicha matriz en 3 matrices. Una corresponde a una matriz diagonal  $S$  y dos matrices unitarias  $U$  y  $V$ , de modo que se cumple con la ecuación (2.28).

$$C = USV^t \quad (2.28)$$

En la diagonal de  $S$  se encuentran los valores propios de  $C$  y en las columnas de  $V$  se encuentran los vectores propios (componentes principales). Finalmente, el análisis de la varianza es análogo al del caso del cálculo por el método de los vectores propios [62].

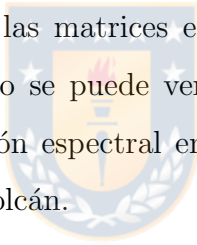
Para efectos del algoritmo de Maloney-Wandell, consideraremos la matriz covarianza  $C$ , obteniendo componentes principales sin estandarizar, esto debido a que no buscamos obtener una correlación, si no obtener una óptima reducción de datos de nuestra matriz de entrenamiento. Se muestra la matriz de correlación  $R$ , con el fin de mostrar la capacidad de cálculo de PCA. Además, en Matlab con la función ‘pca’ se obtiene por defecto componentes sin estandarizar. Sin embargo, se puede estandarizar la matriz de entrenamiento usando la función ‘zscore()’. Esta

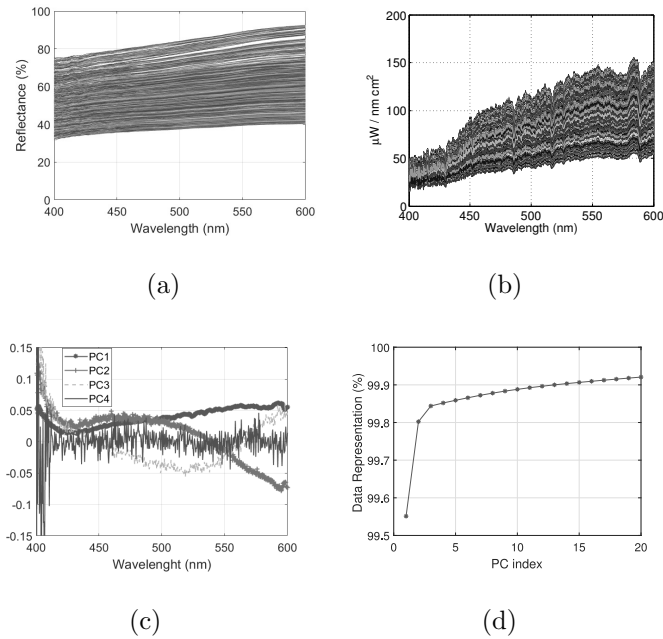
función utiliza descomposición SVD por defecto, pero se puede modificar al cambiar parámetros con el cálculo de vectores propios utilizando ‘eig’.

Esta técnica se utilizará para formar la base de la matriz de entrenamiento para el uso de algoritmos de recuperación espectral. Al ocupar el algoritmo PCA en Matlab, se obtendrán los coeficientes de los componentes principales, donde nos queda como resultado una matriz, en la que las filas van a corresponder a observaciones y las columnas a las variables que contienen los coeficientes para un componente principal, las que están en orden descendente de varianza de componente.

### Ejemplo Análisis de Componentes Principales

A continuación se indica un ejemplo del cálculo de PCA [25], donde se midió la reflectancia de las cenizas en conjunto con la emisión de la atmósfera (Fig. 2.9 (a) y (b)) y se aplicó PCA (Fig. 2.9 (c)) para una reducción de las matrices espectrales con tal de conservar la mayor información posible de la matriz como se puede ver en la Fig. 2.9 (d), para posteriormente desarrollar el algoritmo de recuperación espectral en imágenes del satélite MODIS de ceniza volcánica durante la erupción de un volcán.



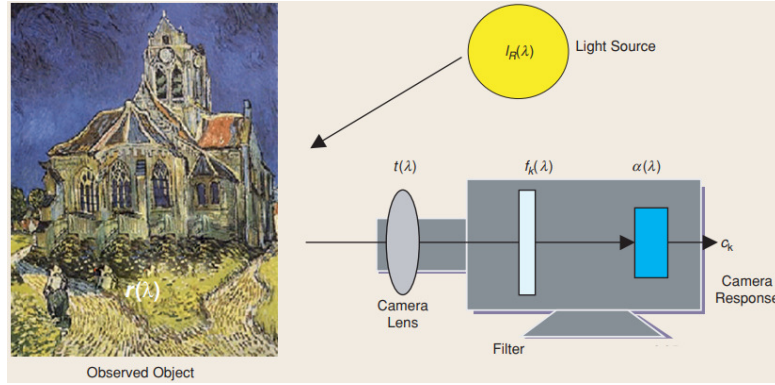


**Fig. 2.9:** (a) Reflectancia de cenizas volcánicas (en %) medida en el laboratorio y (b) datos espectrales de entrenamiento, medidos por el satélite. (c) Los primeros cuatro componentes principales para los datos de reflectancia de cenizas referenciales. (d) Varianza acumulada al incrementar el número de componentes principales. (Fuente: [25]).

Otros ejemplos que se pueden observar en ingeniería con el uso de [PCA](#), es para evaluar la precisión de los sensores, monitorear el estado de calidad de un determinado tipo de equipo o sistema, clasificar defectos de rodamientos en las máquinas, detectar fallos en las cajas de cambios, en la clasificación de datos hiperespectrales, para la realización de reconocimiento facial, etc [63].

### 2.8.3. Modelo del sistema de adquisición

Un sistema de adquisición (como la cámara Basler) se resume en la Fig. 2.10, donde  $I_R(\lambda)$  representa la fuente de luz que incide sobre un objeto observado por una cámara. El objeto observado refleja la luz  $r(\lambda)$ , la cual pasa por la óptica de la cámara  $t(\lambda)$ , los filtros  $f_k(\lambda)$  y finalmente la incide sobre el sensor con una función  $\alpha(\lambda)$ .



**Fig. 2.10:** Esquema de proceso de adquisición de una cámara CMOS, extraído de [64].

Los canales RGB de la cámara pueden ser modelados con una función de transferencia optoelectrónica lineal [65]. Así, considerando además el proceso de adquisición de una cámara descrito en la Fig. 2.10, la respuesta de cada canal  $c_k$ , puede ser descrito de acuerdo a la ecuación (2.29).

$$c_k = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I_R(\lambda)r(\lambda)t(\lambda)f_k(\lambda)\alpha(\lambda)d\lambda + e_k = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} r(\lambda)\omega_k d\lambda + e_k \quad (2.29)$$

Donde  $\omega_k = I_R(\lambda)t(\lambda)f_k(\lambda)\alpha(\lambda)$  denotada como sensibilidad espectral de cada canal  $k$  y  $e_k$  representa ruido aditivo de la cámara como por ejemplo, ruido de corriente oscura, ruido de captura, ruido por defectos geométricos y ruido del amplificador. Además, se debe tener en consideración los efectos producidos por los lentes ópticos (parámetro  $t(\lambda)$ ) tales como des-encuadres, aberraciones o recortes de imagen, por tanto se debe elegir un lente óptico según las cualidades del sensor de la cámara y se debe tener atención en variables como ángulo de visión, distancia focal y el campo de visión. Para una profundización mayor a los efectos de los lentes se puede consultar en [66]. Otro, parámetro a considerar es el tiempo de adquisición de las imágenes el cual al llevar a los límites de adquisición es posible que se produzcan imágenes superpuestas, píxeles erróneos o imágenes corruptas, siendo importante conocer el sistema de adquisición en este caso la cámara y la capacidad de transmisión de datos del ordenador [67].

En un proceso real, la radianza espectral toma valores continuos en los números reales. Sin embargo, cuando esta radiación es medida por algún instrumento, se reduce su dimensión a  $N$  canales. Por esta sencilla razón, la respuesta lineal, en un dominio real continuo, planteada en

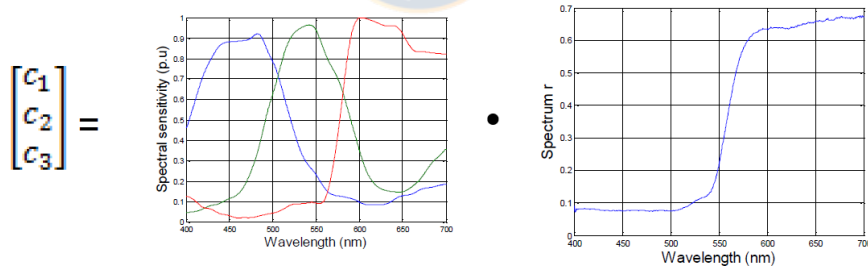
la ecuación (2.29) debe ser discretizada y expresada en forma matricial de la siguiente forma:

$$c_{k \times 1} = w_{k \times N}^t \cdot r_{N \times 1} + e_{k \times 1} \quad (2.30)$$

Finalmente la ecuación (2.30) corresponde a la respuesta por píxel de una cámara CCD y serán los valores con los cuales se diseñara un sistema óptico de medición espectral orientado a estimar temperatura y radiación local en un procesos de combustión. Para comprender de mejor forma la ecuación (2.30), esta puede ser extendida, para representar de mejor manera un sistema tricromático RGB:

$$\begin{bmatrix} c_R \\ c_G \\ c_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{R(1 \times 1)} & w_{R(1 \times 2)} & \cdots & w_{R(1 \times N)} \\ w_{G(1 \times 1)} & w_{G(1 \times 2)} & \cdots & w_{G(1 \times N)} \\ w_{B(1 \times 1)} & w_{B(1 \times 2)} & \cdots & w_{B(1 \times N)} \end{bmatrix}^t \cdot \begin{bmatrix} r_{1 \times 1} \\ r_{1 \times 2} \\ r_{1 \times 3} \\ \vdots \\ r_{1 \times N} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_R \\ e_G \\ e_B \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

De la ecuación (2.31), podemos ejemplificarlo con un sistema típico de adquisición en la Fig.2.11



**Fig. 2.11:** Ejemplo de un sistema típico de adquisición óptica, donde la SSF pertenece a una cámara Basler multiplicado por un espectro adquirido. (Fuente: [54]).

#### 2.8.4. Algoritmo de Maloney-Wandell

Debido a que en este estudio, se presenta un sistema, el cual posee varios procesos, los cuales contienen ruidos e irregularidades, por ejemplo puede existir ruidos debido al fondo del horno o reflexiones que no pertenecen a nuestro sistema, como también pueden existir ruidos

asociados a los sensores ópticos ocupados. En consecuencia, se utiliza el algoritmo de Maloney-Wandell ya que es un de los más robustos frente a estas situaciones [28]; considera un modelo lineal, es por ello que es necesario utilizar sensores con una respuesta de ese tipo (como Basler). Matemáticamente, el algoritmo de Maloney-Wandell está descrito por la ecuación (2.32),

$$\hat{E}_{N \times 1} = V_{N \times n} \cdot \Lambda_{n \times k}^{\dagger} \cdot c_{k \times 1} \quad (2.32)$$

en el cual,  $N$  es el número de longitudes de onda,  $n$  es el número de vectores base,  $k$  es el número de canales,  $\hat{E}_{N \times 1}$  es el espectro recuperado,  $V_{N \times n}$  son las bases lineales,  $c_{k \times 1}$  es la respuesta óptica de cada canal  $k$  y  $\Lambda_{n \times k}^{\dagger}$  es la pseudoinversa de  $\Lambda_{n \times k} = \omega_{k \times N} \cdot V_{N \times n}$ , donde  $\omega_{k \times N}$  contiene las sensibilidades espectrales de los  $k$  canales con un muestreo a  $N$  longitudes de onda.

### 2.8.5. Métrica de Evaluación

En el contexto de los sistemas multispectrales existen principalmente dos métricas: colorimétricas y espectrales. Las métricas colorimétricas, como las propuestas por el CIE (CIELUV, CIELAB, CIE94 y CIEDE2000), estas tienen como objetivo evaluar la precisión de la recuperación espectral, ya que toman en cuenta la respuesta del sistema visual humano en condiciones de iluminación y observación controladas, dando una buena evaluación sobre la coincidencia de color. Sin embargo las ecuaciones de diferencia de color son propensas a producir una mala correlación con las coincidencias espectrales, en particular para pares metaméricos (pares idénticos bajo condiciones de iluminación específicas). Las métricas espectrales son aquellas que miden la distancia entre dos curvas espectrales, como el error de raíz cuadrada media (RMSE) o GFC (coeficiente de bondad de ajuste o en inglés Goodness of fit coefficient), que utiliza la desigualdad de Schwartz y es un aceptado índice de similitud entre dos espectros. Sin embargo, se han propuesto algunas métricas espectrales nuevas para comparar espectros que tienen en cuenta las propiedades del sistema visual humano, como RMSE ponderado (WRMSE) con la diagonal de la matriz de Cohen R, o el índice de comparación espectral de Viggiano (SCI). Finalmente, otra métrica ampliamente utilizada en las mediciones de radiación solar es el porcentaje del error de irradiancia integrado [IIE (%)] en todo el espectro visible [68].



En este trabajo para evaluar la calidad de la recuperación espectral entre un espectro real y uno estimado, se utilizó la métrica Goodness-of-Fit-Coefficient (GFC). Esta métrica se describe en la siguiente ecuación:

$$GFC = \frac{\sum_{j=1}^p E_j \cdot \hat{E}_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^p E_j^2 \cdot \sum_{j=1}^p \hat{E}_j^2}} \quad (2.33)$$

donde  $E$  es el espectro original y  $\hat{E}$  es el espectro estimado; GFC compara la proyección espectral (donde un GFC cercano a 1 significa una coincidencia excelente) [25].

Normalmente, se usa el coeficiente de correlación de Pearson para evaluar distintas estimaciones, sin embargo para la correlación de los espectros recuperados no son ocupados, ya que se buscan parámetros que nos permitan minimizar el uso energético del sistema para evaluar la calidad de la reconstrucción espectral [27], por el momento solo se evaluará este indicador.



# Capítulo 3

## Metodología y materiales

### 3.1. Set-up Experimental

En primer lugar, se planificó la realización de las mediciones experimentales, de tal manera de poder realizar de buena forma el algoritmo de recuperación espectral Maloney-Wandell sobre las imágenes de combustión de llamas turbulentas, con el fin de poder obtener un mapa de estimación de temperatura y de radiación, a continuación en la Fig. 3.1 se muestra un esquema general.

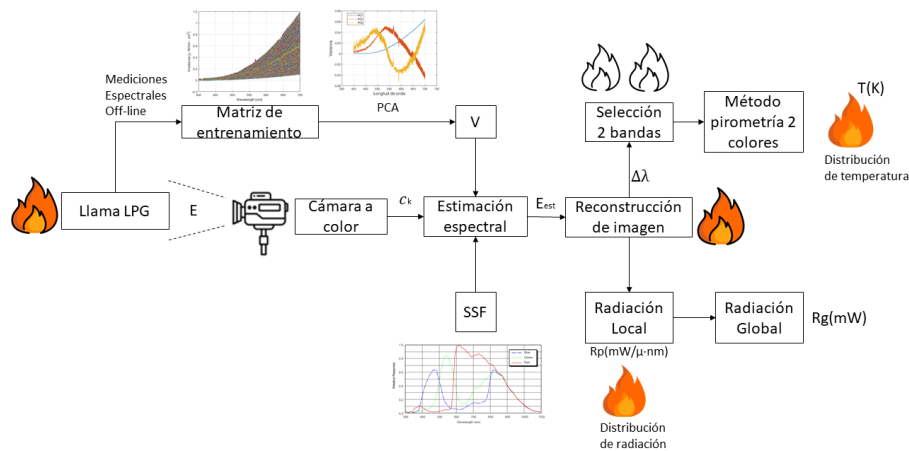
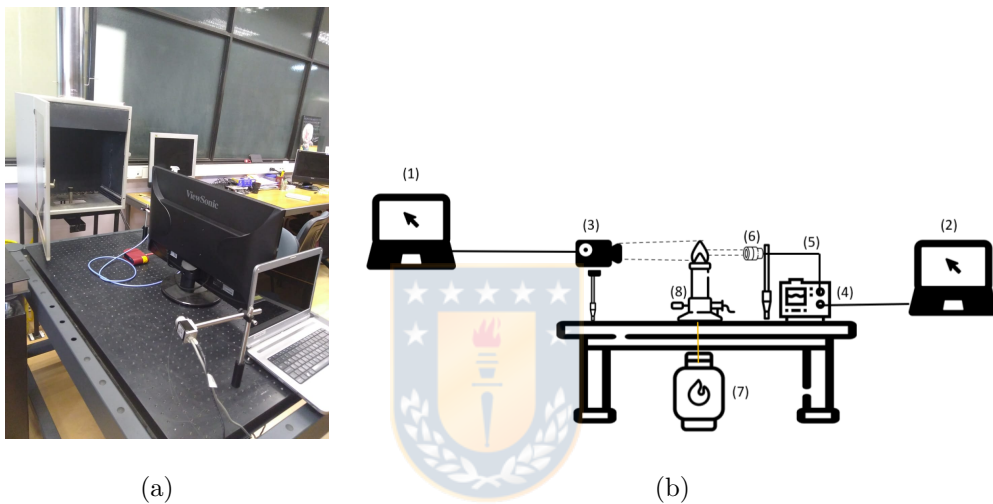


Fig. 3.1: Esquema general de datos a obtener y algoritmos a desarrollar. (Fuente: Elaboración Propia)

### 3.1.1. Descripción Set-up Experimental

Para realizar correctamente el algoritmo de recuperación espectral fue necesario utilizar la configuración que se muestra en la Fig. 3.2, esta configuración se realizó para todas las muestras experimentales de los distintos tipos de llama obtenidos en nuestros experimentos. La configuración incluye, gas LPG, un mechero (ej. Bunsen), Cámara (ej. Basler acA 1920-50gc), espectrofotómetro Thorlabs CCS200, fibra óptica, lente colimador y finalmente una computadora portátil para la obtención de imágenes y el procesamiento de datos del espectrofotómetro.



**Fig. 3.2:** Configuración experimental (a) imagen sacada del laboratorio. (b) (1) Notebook (2) Notebook (3) Cámara (4) Espectrofotómetro (5) Fibra óptica (6) Lente Colimador (7) Gas LPG (8) Mechero Bunsen. De la imagen (b) se puede apreciar que la cámara captura la información de toda la llama y el lente colimador esta apuntando a una zona específica de la llama. (Fuente: Elaboración Propia)

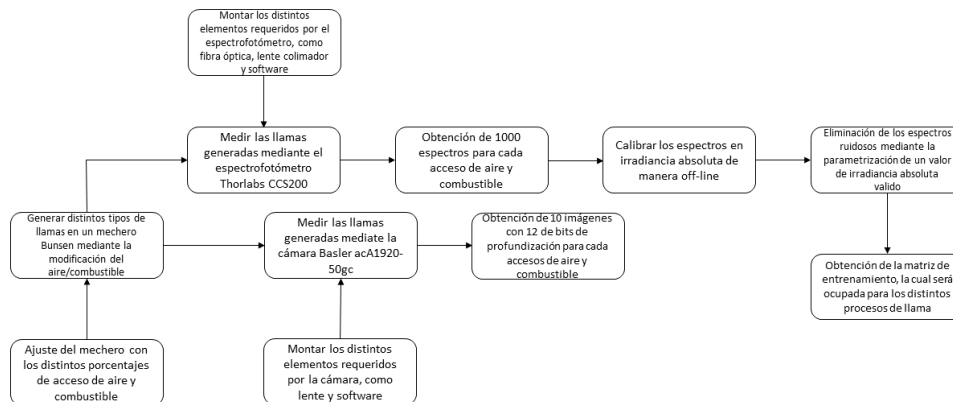
Como combustible se ocupó gas licuado del petróleo (LPG), el cual está compuesto por una mezcla de hidrocarburos livianos constituidos principalmente por propano y butano, donde el poder calorífico por volumen estimado es de  $23.410 [kJ/l]$  y su poder calorífico estimado es de  $49.000 [kJ/kg]$  [69]. Debido a las características del mechero, al encender este se puede obtener una llama de forma turbulenta. Así, se selecciona una región de la llama en donde estará apuntado el espectrofotómetro, simultáneamente se obtienen imágenes de la llama a través de la cámara, la cual tiene la capacidad de guardar 50 fps. A continuación se deja una tabla de

referencia 3.1 con los distintos componentes usados con su correspondiente marca y modelo.

**Tabla 3.1:** Tabla de los distintos componentes con su correspondiente marca y modelo

Componentes	Marca	Modelo
Notebook	Acer	Aspire 3 a315-42-r8j9
Notebook	Toshiba	-
Cámara	Basler	1920-50gc 1390-17gc 1920-150uc
Espectrofotómetro	Thorlabs	CCS200
Fibra Óptica	Oceaninsight	QP400-2-UV-VIS
Lente Colimador	Oceaninsight	74-UV
Gas LPG	Lipigas	-
Mechero Bunsen	-	-

A continuación, en la Fig. (3.3) se muestra el diagrama de flujo para la obtención de la matriz de entrenamiento e imágenes. La cual muestra la realización de la secuencia de mediciones para el primer experimento llevado a cabo con la cámara Basler acA 1920-50gc, posteriormente con las siguientes cámaras se obtienen 100 imágenes para cada flujo aire/combustible. Sin embargo, no se vuelve a medir con el espectrofotómetro, ya que se tiene una matriz espectral caracterizada de manera puntual para distintas condiciones de llama.



**Fig. 3.3:** Diagrama de flujo de la secuencia de mediciones. (Fuente: Elaboración Propia)

También, se deja una tabla (3.2) con los principales parámetros de las 3 cámaras usadas.

**Tabla 3.2:** Detalles técnicos de las distintas cámaras usadas

Marca de la Cámara	Modelo	Resolución (H x V)	Sensor	Tamaño del sensor (óptico)	Tecnología del sensor	Tamaño de píxel [ $\mu m^2$ ]	Frecuencia de imagen [fps]	Potencia de Consumo (típico)	Peso (típico)
Basler	acA1920-150uc	1920×1200	Python 2000	2/3"	CMOS	4.8 × 4.8	150	3.9 W	< 80 g
	scA1390-17gc	1392×1040	Sony ICX267	2/3"	CCD	6.45×6.45	17	3.5 W	170 g
	acA1920-50gc	1920×1200	Sony IMX174	1/1.2"	CMOS	5.86×5.86	50	3.2 W	< 90 g

## 3.2. Metodología

Es preciso explicar los diferentes aspectos en los que se trabajó durante este estudio, y que permitieron obtener los resultados.

### 3.2.1. Adquisición de datos

En primer lugar, se generaron tres tipos diferentes de llamas en el mechero Bunsen, modificando el flujo másico de gas LPG: el primer experimento se llevó a cabo sobre llamas laminares, el segundo experimento sobre llamas de transición (entre laminar y turbulento) y finalmente en el último experimento se generaron llamas turbulentas. Para cada tipo de llama se configuraron 5 tipos diferentes de flujos de aire, cambiando el porcentaje de acceso de aire en el quemador: 0% (completamente cerrado), 25%, 50%, 75% y 100% (completamente abierto), los cuales definimos como punto de operación. Luego, la combustión de hidrocarburos para los distintos puntos de operación fue detectada por el espectrofotómetro de manera off-line, con el fin de obtener la matriz de entrenamiento. La cual es muy importante debido a que con ella es posible realizar el algoritmo de recuperación espectral Maloney-Wandell. Finalmente, se obtienen distintas imágenes de la combustión de hidrocarburos de los distintos puntos de operación para los diferentes flujos másicos.

Para la medición de la Radiancia Global ( $Rad_g$ ), descrita en el Capítulo 2, es necesario medir la distancia que hay desde el mechero hasta el sensor óptico, esta va cambiando a medida que se cambia el flujo másico debido a que se modifica la altura de la llama, con el fin de capturar la forma total de la combustión de llama. Por otro lado para obtener el área del tamaño de

píxel  $A_p$ , se adquirieron distintas imágenes de una regla colocada en el mechero a medida que se cambiaba el flujo másico dado que la distancia al sensor óptico iba cambiando. De esta manera se puede calcular cuantos píxeles corresponden en  $1 \text{ cm}^2$ .

### 3.2.2. Procesamiento de Señales

#### Calibración

Se calibró en radiancia absoluta los espectros de las distintas llamas obtenidas del espectrofotómetro Thorlabs CCS200. Este procedimiento se tuvo que realizar off-line, debido a que el software no permitía realizarlo en línea, para esto se ocupó la ecuación (3.1)

$$I_P = C_P \cdot \left( \frac{S_P - D_P}{T \cdot A \cdot dL_P} \right) \quad (3.1)$$

donde,

$I_p$  = radiancia absoluta, en  $\mu W/nm \cdot cm^2$

$C_p$  = archivo de calibración, en  $\mu \text{ J/cuenta}$  (específico para la óptica de muestreo).

$S_p$  = espectro de muestra, en recuentos.

$D_p$  = espectro oscuro, en recuentos.

T = tiempo de integración, en segundos.

A = área de colección, en  $cm^2$  ( $A = 1$  para una esfera integradora).

$dL_P$  = extensión de longitud de onda (cuántos nanómetros representa cada píxel).

#### Obtención de Vector de Calibración

Para calcular el vector de calibración, es necesario despejar la ecuación 3.1, así queda que

$$C_p = \frac{I_P \cdot (T \cdot A \cdot dL_P)}{S_P - D_P} \quad (3.2)$$

En primer lugar, se debe tomar en cuenta la realización de una interpolación para las mediciones de espectro en cuentas de la lámpara con respecto al archivo de calibración que nos entrega esta, ya que el vector no es del mismo tamaño. Además, hay que considerar que se asume un tiempo de integración, un área y una extensión de longitud de onda o delta lambda, por lo que, al

aumentar o disminuir estos solo se considera como ruido ( $e_r$ ). Así, el vector de calibración en palabras simples viene dado por

$$C_p = \frac{I_P}{E_{rc}} + e_r \quad (3.3)$$

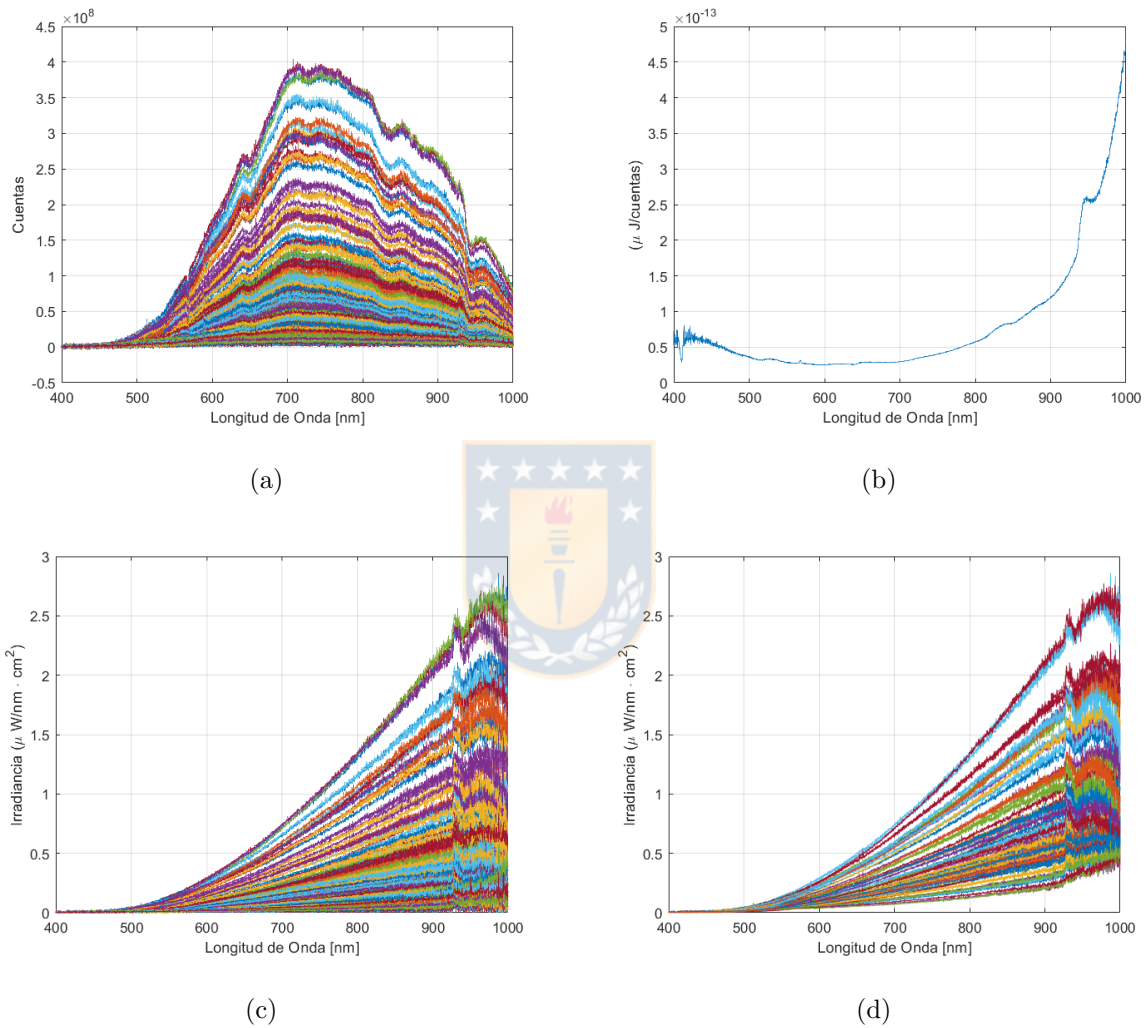
donde,  $I_P$  será el archivo de calibración interpolado (asumiendo una Irradiación ideal) y  $E_{rc}$  sera la radiación en cuentas de nuestra lampara ( $E_{rc} = S_p - D_p$ ). De esta manera se obtiene el vector de calibración para la radiación o  $C_p$ . Así, la Irradiancia Absoluta vendrá dada como

$$I_P = (C_p \cdot E_{rc}) \left[ \frac{\mu W}{cm^2 \cdot nm \cdot s} \right] \quad (3.4)$$

En resumen, para obtener el espectro calibrado en irradiacia absoluta, se reemplazo en la ecuación (3.1) los espectros adquiridos de la llama por el espectrofotómetro Thorlabs CCS200 ( $S_p$ ) (Fig. 3.4 (a)), realizando posteriormente sus respectivas restas y divisiones, y se multiplicó por el vector de calibración obtenido de la lampara HL-2000-CAL (Oceanoptics) ( $C_p$ ) (Fig. 3.4 (b)), obteniendo como resultado los espectros calibrados en irradiancia absoluta ( $I_p$ ) (Fig. 3.4 (c)).

### Eliminación de Ruido

La llama turbulenta, es una llama la que está en constante movimiento y puede tener diferentes tamaños, por lo que al guardar espectros durante el proceso de combustión es posible que a veces no se esté apuntando a la llama, si no que al fondo del horno, por lo que ese dato, es un dato ruidoso, el cual afecta eventualmente a la matriz de entrenamiento de la llama. Entonces, para solucionar este problema se parametrizó un valor de la radiancia absoluta válido, es decir, si hay algún espectro menor a este valor, este será eliminado. Por ejemplo, para la matriz de espectros correspondientes a la Fig. (3.4) (c) que corresponde a un punto de operación, se aprecia los espectros sin el parámetro aplicado para la eliminación de espectros ruidosos y en la Fig. (3.4) (d) se puede ver la matriz espectral sin espectros ruidosos, ya que se aplicó el parámetro para la eliminación de estos ruidos.



**Fig. 3.4:** (a) Matriz de espectros obtenida sin calibrar ( $S_p$ ). (b) Vector de Calibración ( $C_p$ ). (c) Matriz de entrenamiento de espectros calibrados con ruido ( $I_p$ ), obtenidos de la ecuación (3.1). (d) Matriz de espectros con eliminación de ruidos. (Fuente: Elaboración Propia)



# Capítulo 4

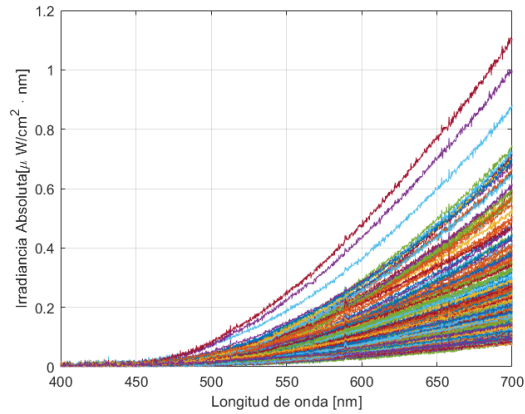
## Resultados

### 4.1. Resultados Preliminares

Para la obtención de los resultados preliminares, se generaron dos llamas de tipo turbulento en el mechero Bunsen, variando el flujo másico de gas LPG. El primer flujo de gas fue aleatorio y el segundo flujo de gas fue mayor que el caso anterior. Para cada experimento, se configuraron 3 tipo diferentes de flujos de aire, cambiando el porcentaje de acceso de aire en el quemador: 0% (completamente cerrado), 50% y 100% (completamente abierto), los cuales definimos como punto de operación. Para el desarrollo de los algoritmos de recuperación espectral de Maloney-Wandell se hizo necesario obtener distintas imágenes y espectros de llama. A continuación se muestran los distintos resultados preliminares obtenidos, tales como los espectros recuperados en dos cámaras, la estimación de temperatura y radiación local.

#### 4.1.1. Matriz de Entrenamiento

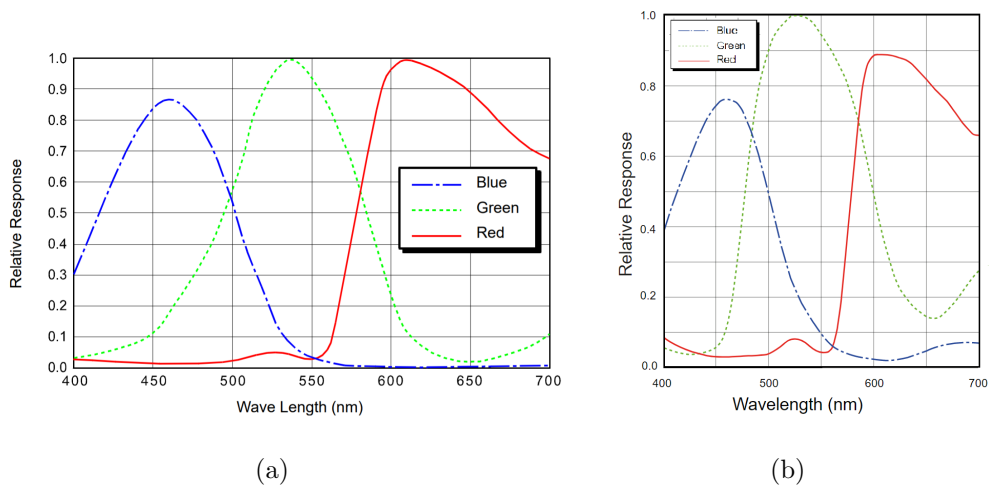
Una vez realizada la calibración descrita en el Capítulo 3, se obtuvo la matriz de entrenamiento para la combustión de gas LPG, midiendo distintos puntos de llama, obteniendo espectros variados para los diferentes puntos de operación como se ve en la Fig 4.1, esta matriz es fundamental para el algoritmo de recuperación espectral, ya que va a ser la matriz base para la implementación en las dos cámaras ocupadas.



**Fig. 4.1:** Matriz de entrenamiento de los distintos puntos de operación de llama.<sup>1</sup> (Fuente: Elaboración Propia).

#### 4.1.2. Sensibilidad Espectral

A continuación, en la Fig. (4.2) se muestran las sensibilidades espectrales dada por el fabricante, recordar que estas son muy importante para el algoritmo de recuperación espectral Maloney-Wandell.



**Fig. 4.2:** Sensibilidad espectral dada por el fabricante (a) Cámara Basler scA 1390-17gc y (b) Cámara Basler acA 1920-50gc. (Fuente: [70]).

### 4.1.3. Procesamiento de Imágenes

#### Obtención de Imágenes Cámara Basler acA 1920-50gc

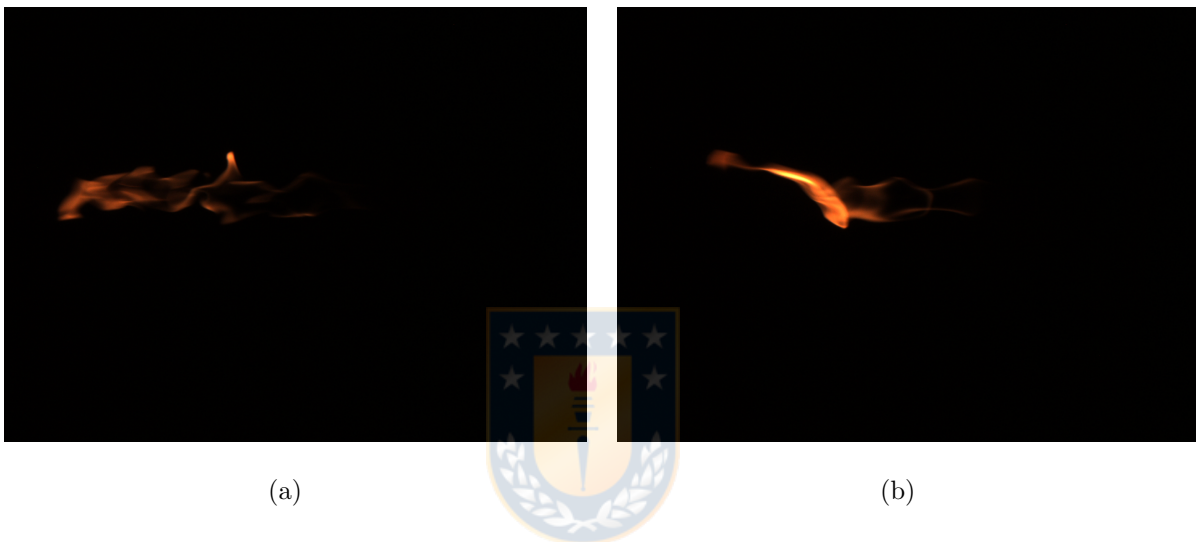
Se obtuvieron 10 imágenes de llama para cada punto de operación, utilizando la cámara Basler acA 1920-50gc, la cual trabaja con una resolución espacial de 1920x1200 píxeles y 50 fps, además esta cámara trabaja con una intensidad de píxeles de 12 bits, es decir, llega hasta las 4096 cuentas. A continuación, se muestran imágenes de llama en la Fig. 4.3 obtenida de los distintos puntos de operación.



**Fig. 4.3:** Imágenes de llama en distintos puntos de operación. Para tener una mejor visibilidad de las imágenes fueron convertidas a 8 bits. (Fuente: Elaboración Propia).

### Obtención de Imágenes Cámara Basler scA 1390-17gc

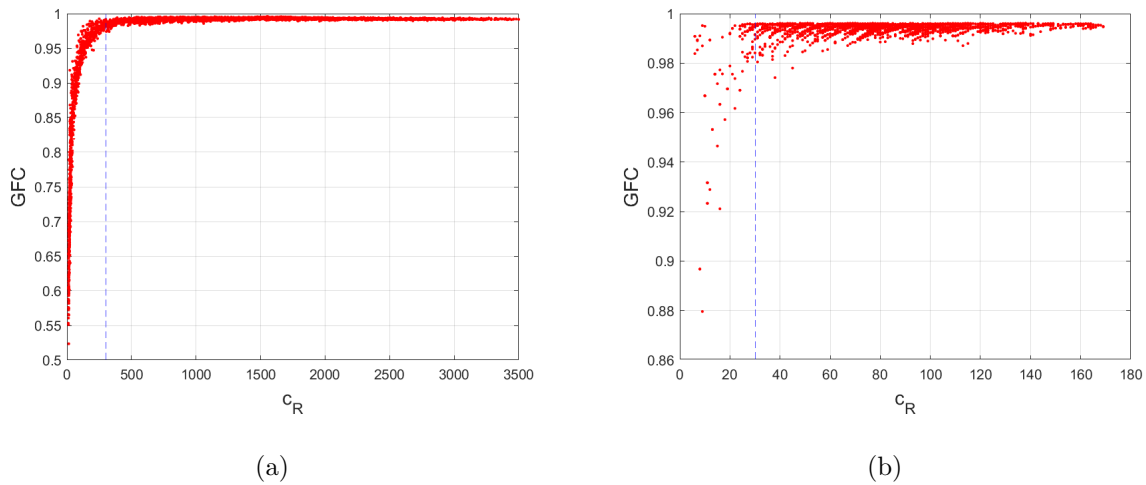
Se obtuvieron 100 imágenes de llama para cada punto de operación, se ocupó la cámara Basler scA 1390-17gc, la cual trabaja con una resolución espacial de 1390x1038 píxeles y 17 fps, además esta cámara trabaja con una intensidad de píxeles de 12 bits, pero el software guarda en imágenes de 8 bits. A continuación, se mostrarán imágenes de llama en la Fig. 4.4 obtenida de los distintos puntos de operación



**Fig. 4.4:** Imágenes de llama en distintos puntos de operación. (Fuente: Elaboración Propia).

### Eliminación de ruido en las imágenes

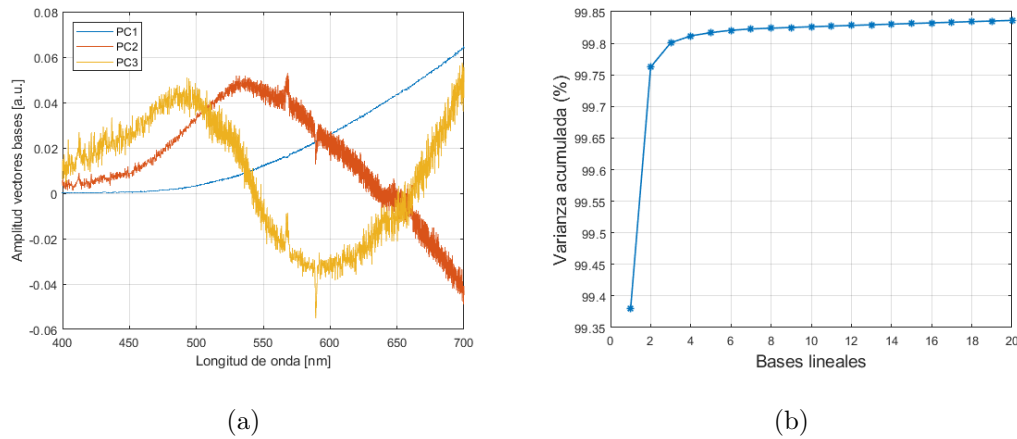
Al obtener las imágenes de las distintas llamas, se obtienen píxeles que no corresponden a una llama, si no que corresponden a algún ruido (ej. fondo del horno), por lo que estos píxeles hay que descartarlos, para esto, se ocupó como métrica el **GFC** (godness-of-fit) en comparación con la intensidad de píxel de la imagen. Así, dependiendo la cámara y la intensidad de los píxeles se fueron eligiendo distintas métricas. Un ejemplo de esto se encuentra en la Fig. 4.5 (a), la cual pertenece a la cámara Basler acA 1920-50gc que trabaja con una intensidad de píxeles de 12 bits, de esta manera se puede apreciar en la figura, que esta se parametriza con respecto a una intensidad de píxel mayores o iguales a 300 ( $C_R > 300$ ), ya que estas superan el 0.97 del **GFC** y para la Fig. 4.5 (b) pertenece a la cámara Basler scA 1390-17gc la cual tiene una intensidad de 8 bits, así, se parametrizó con valores mayores a 30 ( $C_R > 30$ ), ya que el **GFC** supera el 0.97.



**Fig. 4.5:** Gráfico intensidad de píxel en el canal rojo vs la métrica GFC, donde se puede apreciar que mientras mayor es la intensidad del píxel mejor es esta métrica (a) Cámara Basler acA 1920-50gc. (b) Cámara Basler scA 1390-17gc. (Fuente: Elaboración Propia).

#### 4.1.4. Análisis de componentes principales

En primer lugar, para tener una buena recuperación espectral es muy importante obtener los componentes principales (PCA) de la matriz de entrenamiento, en este caso se tomó la matriz de entrenamiento de la Fig. 4.1 y se obtuvo su PCA, mostrando el resultado obtenido en la Fig. 4.6 (a), donde se pueden observar los componentes principales de la matriz de entrenamiento, los que fueron calculados con la matriz de covarianza, es decir, sin estandarizar.



**Fig. 4.6:** (a) Gráfico de los 3 primeros componentes principales.(b) Varianza acumulada al incrementar el número de componentes principales. (Fuente: Elaboración Propia)

Se puede observar que los tres primeros componentes principales, como se espera, el primer componente principal es el que concentra la mayor información del proceso, por lo tanto es el más similar a un espectro aleatorio obtenido de la llama y además, se puede observar que este no corta el eje, el segundo componente corta una vez y el tercero corta dos veces.

Por otra parte, la varianza acumulada del primer componente principal de la matriz (Fig. 4.6 (b)) es cercana a 99.4 %, a diferencia de los resultados obtenidos con la varianza acumulada del tercer componente principal, que es cercana a 99.8 %. Esto se debe principalmente a la dispersión de los datos, puesto que el primer componente principal apunta en dirección al espacio que se encuentre la mayor concentración de datos.

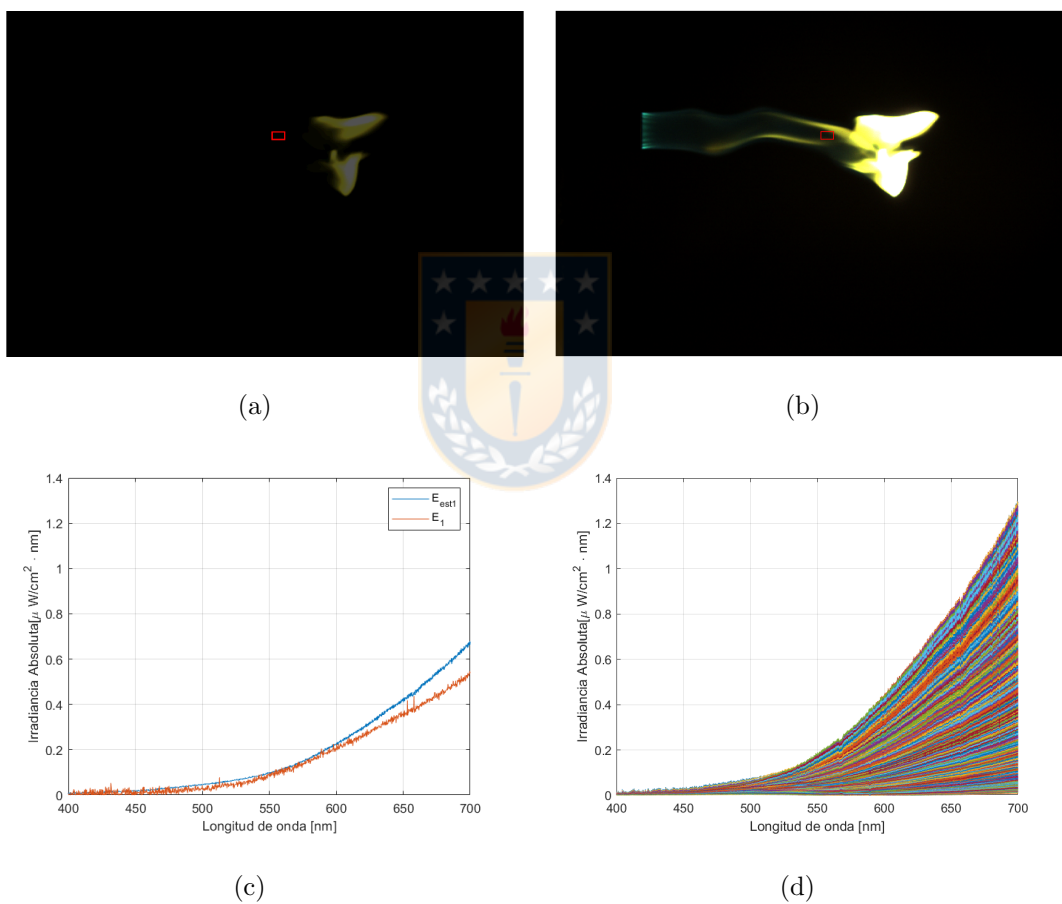
Para realizar la recuperación espectral se utilizaron los primeros tres componentes principales y los tres canales espectrales de nuestras cámaras.

#### 4.1.5. Espectro recuperado por píxel

A continuación, se muestran los resultados de dos imágenes de distintas cámaras, obtenidos a través del algoritmo de Maloney-Wandell para la recuperación de espectros de imágenes de llama turbulenta.

### Cámara Basler acA 1920-50gc

En la Fig. 4.7 (a) y (b) se presenta una imagen, la cual fue utilizada para realizar el algoritmo de recuperación espectral Maloney-Wandell píxel a píxel, este se realizó en una región determinada, lo cual esta indicado en el cuadro rojo. El resultado obtenido se puede ver en la Fig. 4.7 (c) el cual compara el espectro promedio de la recuperación espectral en el cuadro rojo con respecto a un espectro aleatorio calibrado obtenido del espectrofotómetro y en la figura (d) se puede observar la recuperación espectral píxel a píxel de toda la llama.

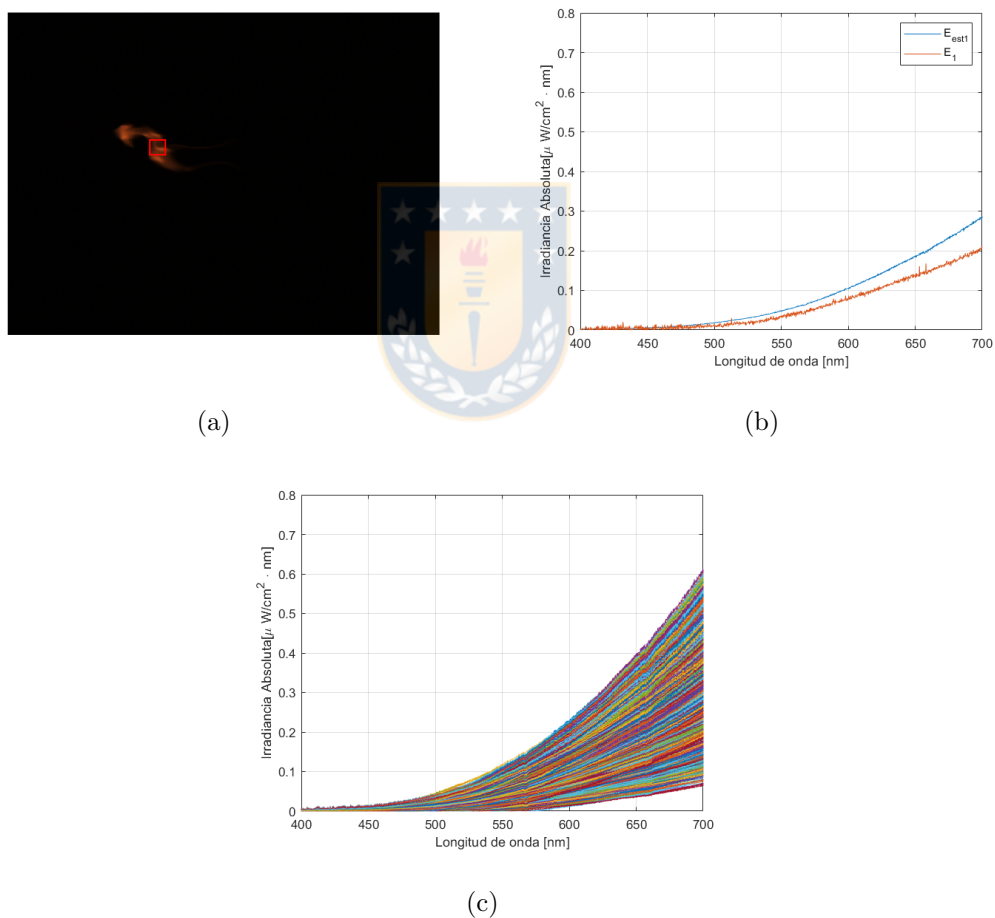


**Fig. 4.7:** (a) Imagen de llama con 12 bits de intensidad, (b) Imagen de llama reconvertida a 8 bits de intensidad, el cuadro rojo se indica donde se midieron los espectros con el espectrofotómetro. (c) Gráfico de la recuperación espectral promedio ( $E_{est1}$ ) en comparación con un espectro calibrado aleatorio de la llama ( $E_1$ ). (d) Gráfico de la recuperación espectral píxel a píxel de toda la llama. (Fuente: Elaboración Propia)

Se puede apreciar que en la Fig. 4.7 (c), el espectro estimado promedio ( $E_{est1}$ ) es muy similar a un espectro calibrado del espectrofotómetro ( $E_1$ ), esto se puede confirmar a través de la métrica GFC, ya que al calcular esta entre ambas curvas, obtenemos un valor de 0.9976, lo que es muy cercano a 1 indicándonos que son muy semejantes entre si.

### Cámara Basler scA 1390-17gc

Se presenta en la Fig. 4.8, la recuperación espectral obtenida con la cámara Basler scA 1390-17gc, donde se obtuvo una imagen de profundidad de 8 píxeles.



**Fig. 4.8:** (a) Imagen de llama, el cuadro rojo se indica donde se hizo la recuperación espectral promedio. (b) Gráfico de la recuperación espectral promedio ( $E_{est1}$ ) en comparación con un espectro calibrado aleatorio de la llama ( $E_1$ ). (c) Gráfico de la recuperación espectral píxel a píxel de toda la llama. (Fuente: Elaboración Propia).



Se puede apreciar que en la Fig. 4.8 (b), el espectro estimado promedio ( $E_{est1}$ ) es muy similar a un espectro calibrado del espectrofotómetro ( $E_1$ ), esto se puede confirmar a través de la métrica GFC, ya que al calcular esta entre ambas curvas, obtenemos un valor de 0.9981, lo que es muy cercano a 1 indicándonos que son muy semejantes entre si y en la figura (c) podemos observar la recuperación espectral píxel a píxel de toda la llama.

Debido a que las distintas imágenes de llama son turbulentas y poseen comportamientos espectrales distintos, no es posible realizar una comparación entre las distintas cámaras, sin embargo con la métrica GFC garantizamos espectros similares a los de la llama ( $> 0.97$ ). Por otro lado, al realizar la recuperación espectral en imágenes de 12 bits de profundización (cámara Basler acA 1920-50gc) permite obtener una mayor resolución para cada canal que la de 8 bits de profundización (cámara Basler scA 1390-17gc), dado que para la primera tenemos una profundización de 4096 bits y la segunda de 256 bits. Con respecto a la estimación de un indicador de desempeño que pueda comparar los espectros recuperado con los diferentes espectros obtenidos por el espectrofotómetro para los diferentes flujos de aire/combustible, quedara para un trabajo a futuro, dado que los espectros obtenidos del espectrofotómetro fueron obtenido de manera puntal y off-line para distintos comportamientos de llama, por lo tanto, para estimar este indicador se debe plantear un nuevo experimento con su respectivo estimador.

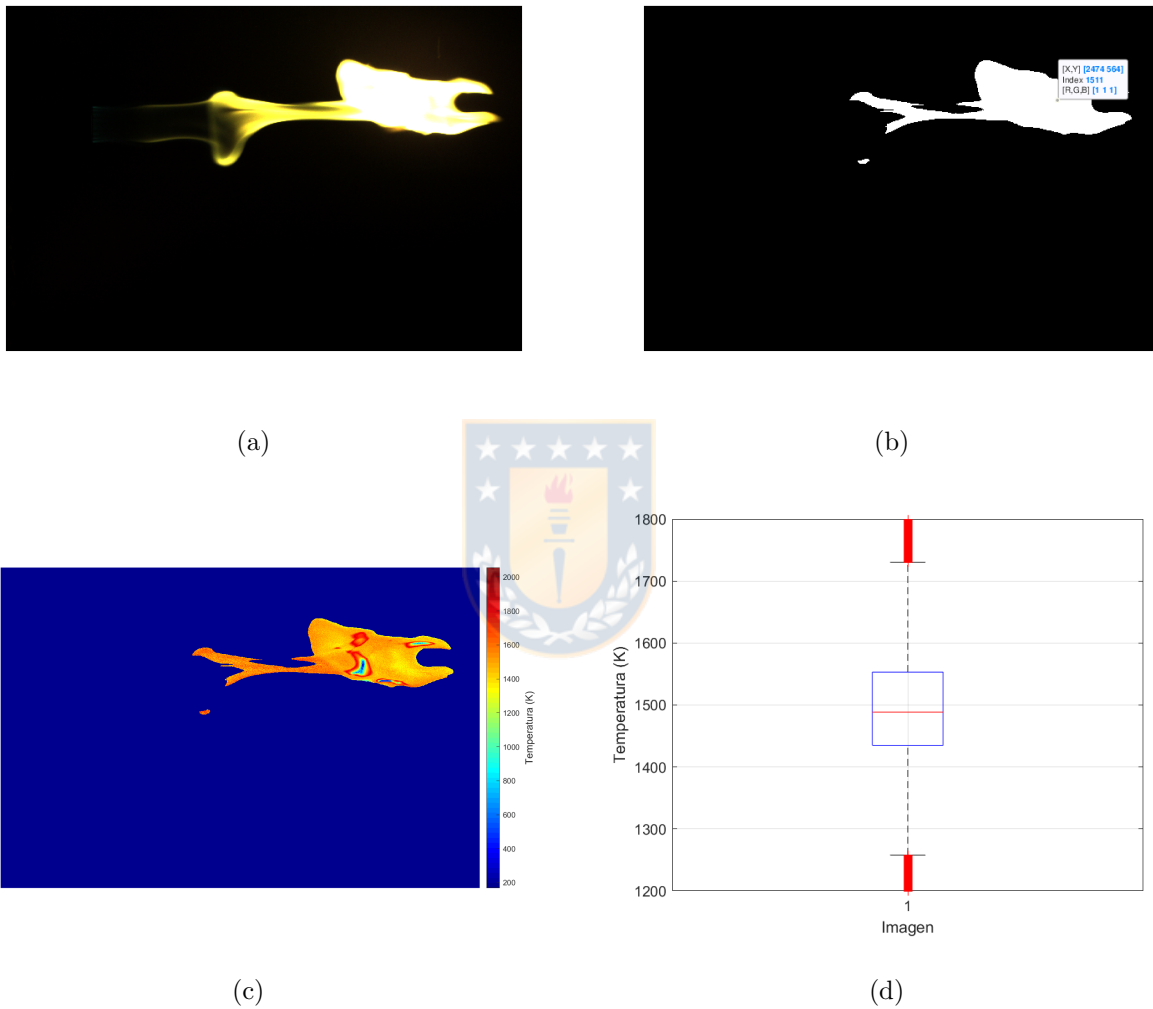
#### 4.1.6. Mapa de temperatura

Para realizar el mapa de temperatura en primer lugar se debe calcular la temperatura de la llama a través del método de dos longitudes de onda (descrito en el capítulo 2) en el espectro recuperado de la imagen de la llama. De esta manera se construye un mapa píxel a píxel de la temperatura de llama. A continuación se muestra en la Fig. 4.9 y 4.10 el mapa de temperatura de llama.

Se pueden apreciar en las figuras 4.9 (c) y 4.10 (c), que el mapa de temperatura es una herramienta que permite distinguir distintos puntos de la llama y como esta varía de manera axial y radialmente. La diferencia que podemos ver entre los mapas de temperatura de las distintas cámaras, es su resolución, dado que la cámara Basler acA 1920-50gc (Fig. 4.9) posee una mayor profundización de bits. Debido a que las imágenes son de procesos distintos y no

contamos con un instrumento de referencia para su temperatura, no se puede decir que mapa es mas preciso o mejor.

### Cámara Basler acA 1920-50gc

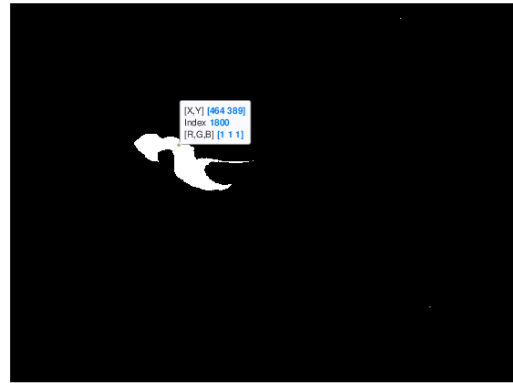


**Fig. 4.9:** (a) Ejemplo de una imagen de una llama turbulenta. (b) y (c) Mapa de temperatura de la llama (d) Dispersión estadística, se aprecia que el promedio de la temperatura de la imagen es  $1494.0 \pm 137.7 [K]$ . (Fuente: Elaboración Propia).

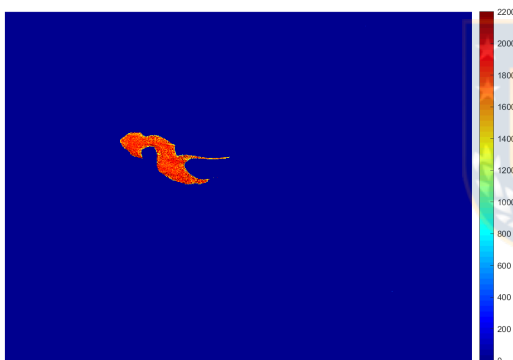
## Cámara Basler scA1390-17gc



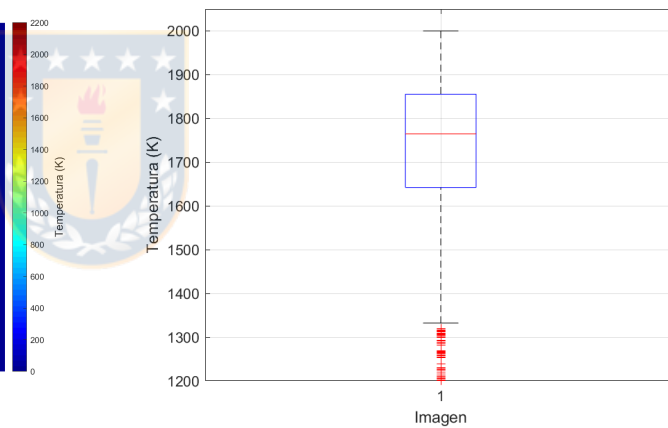
(a)



(b)



(c)



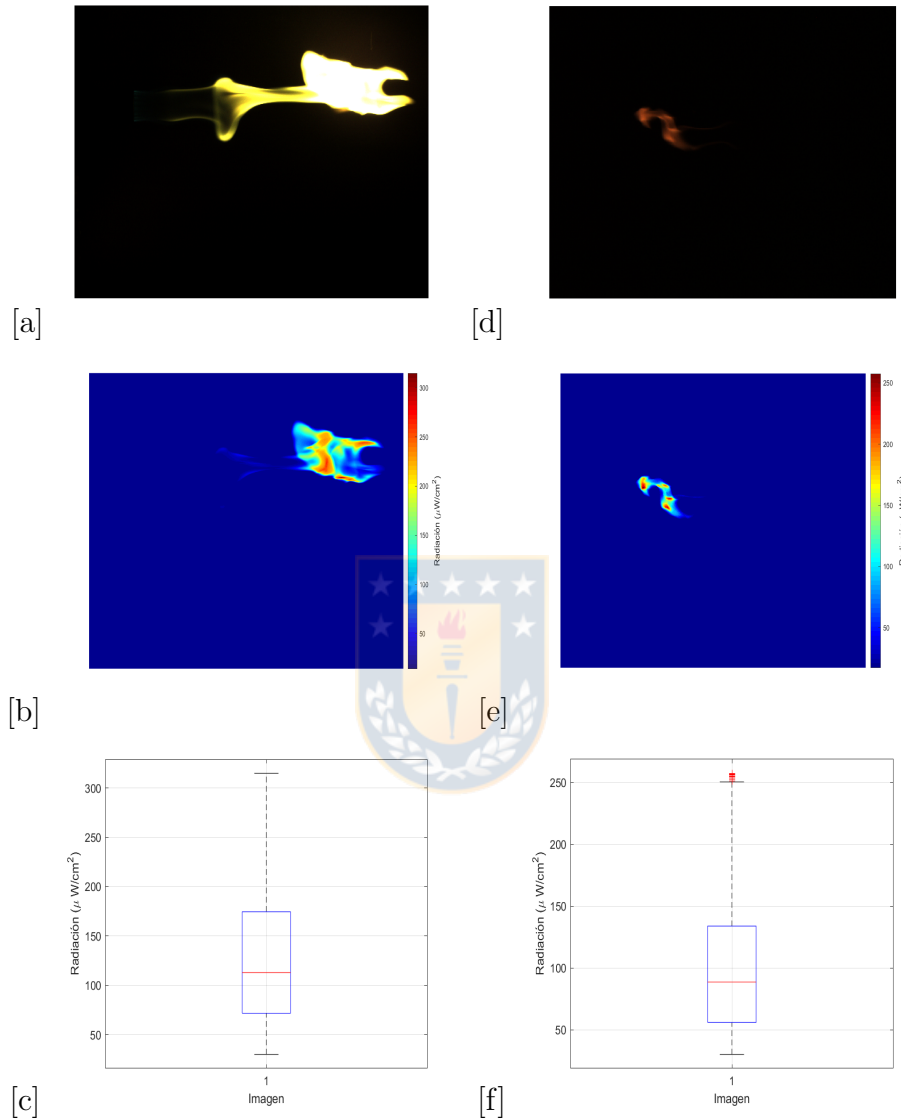
(d)

**Fig. 4.10:** (a) Ejemplo de una imagen de una llama turbulenta. (b) y (c) Mapa de temperatura de la llama (d) Dispersión estadística, se aprecia que el promedio de la temperatura de la imagen es  $1728.3 \pm 182.0 [K]$ . (Fuente: Elaboración Propia).

#### 4.1.7. Mapa de radiación local

A continuación, se muestran los mapas de radiación local, los cuales se calculan con la ecuación (2.18) en los espectros recuperados obtenidos de las imágenes de llama de las 2 cámaras ocupadas. Se puede ver en la Fig. 4.11 los mapas de radiación obtenidos en (b) y (e) a partir

de las imágenes (a) y (d) respectivamente. Posteriormente, se observa la dispersión estadística en (c) y (f) de los mapas de radiación (b) y (e) respectivamente.



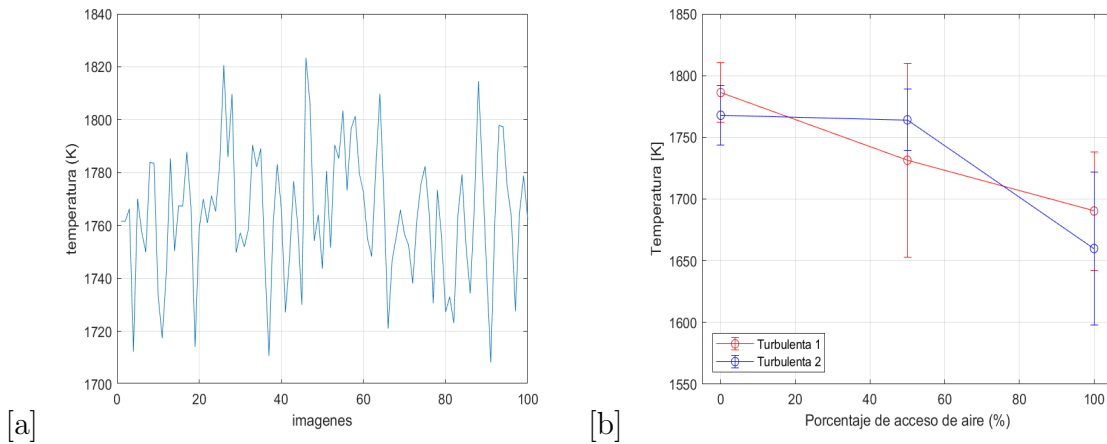
**Fig. 4.11:** (a) Imagen de llama tomada con la cámara Basler acA 1920-50gc y reconvertida a 8 bits de intensidad, (b) Mapa de radiación local píxel a píxel de la llama de la imagen (a). (c) Dispersión estadística, nos muestra que el promedio de la radiación local de la imagen es  $112.8 \pm 62.9 [\mu W/cm^2]$ . (d) Imagen de llama tomada con la cámara Basler scA1390-17gc, (e) Mapa de radiación local píxel a píxel de la llama de la imagen (d), (f) Dispersión estadística, nos muestra que el promedio de la radiación local de la imagen es  $88.6 \pm 51.4 [\mu W/cm^2]$ . (Fuente: Elaboración Propia).

Se observa una clara diferencia entre las imágenes de estimación de temperatura (Fig. 4.9 y 4.10) y las de radiación (Fig. 4.11), mientras la estimación de temperatura muestra una imagen homogénea, la radiación indica zonas más energéticas dentro de la llama. Esto es relevante ya que podemos observar el comportamiento radiativo de la llama y ver en qué puntos la llama está produciendo más energía, esto añade una nueva variable para los procesos de control, que pueden ayudar a optimizar mejor las distintas variables a la hora de tomar decisiones. De esta manera, la radiación local al ser medida correctamente, promete ser un indicador para poder optimizar el proceso de combustión de llamas turbulentas, que es el tipo de llama perteneciente a un entorno industrial.

#### 4.1.8. Resultados en distintos puntos de operación

En este análisis se considera solo la cámara Basler scA 1390-17gc, debido a que en esta cámara se obtienen al menos 100 imágenes por punto de operación. Para posteriormente, calcular el promedio total de temperatura por cada punto de operación. Para realizar este análisis se considera el promedio por imagen de las distintas temperaturas estimadas a partir de los espectros recuperados en cada píxel, obteniendo una temperatura promedio por imagen, es decir se calcula un promedio en las 100 imágenes como se puede ver en la Fig. 4.12 (a), así, se promedian estos valores en las 100 imágenes y se obtiene un promedio total de temperatura por cada punto de operación, como se puede ver en la Fig. 4.12 (b).

De la Fig. 4.12 (b), se puede apreciar el comportamiento de la temperatura total a medida que se va abriendo el acceso de aire del mechero Bunsen. Se observa que la temperatura de la llama tipo turbulenta 1 tiende a disminuir a medida que va entrando más aire al mechero Bunsen, pero para la llama tipo turbulenta 2 la temperatura tiende a aumentar hasta llegar a un acceso de aire del 50 %, para luego disminuir a una temperatura menor al del primer punto de operación o 0 % de acceso de aire. El comportamiento observado queda para un futuro estudio, dado que la temperatura puede estar siendo afectada por distintas variables como lo son el hollín o productos derivados de la combustión.



**Fig. 4.12:** La figura (a) pertenece al segundo punto de operación, de las cuales se obtuvieron 100 imágenes. (a) Se puede apreciar, el promedio de la temperatura calculada a partir por los mapas de temperatura obtenidos. (b) Se observa la temperatura promedio total por punto de operación. (Fuente: Elaboración Propia).

## 4.2. Resultados Finales

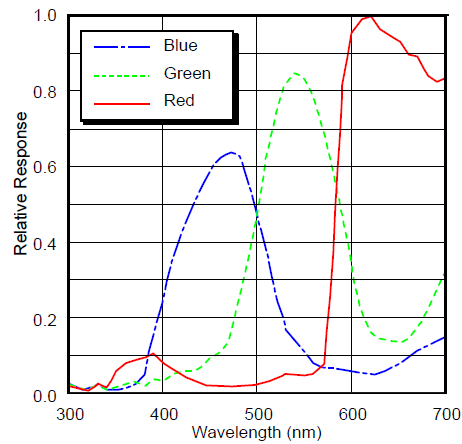
A partir de los resultados preliminares previos, se ampliaron nuestras mediciones aumentando los puntos de operación para distintos flujos másicos. Sin embargo, por disponibilidad de equipos se ocupó la cámara Basler acA1920-150uc, que es una cámara tricromática con un sensor CMOS y una captura de imagen de una intensidad de píxeles de 8 bits. En la Fig. 4.13, se muestra la sensibilidad espectral de esta cámara dada por el fabricante.

### 4.2.1. Espectro recuperado por píxel

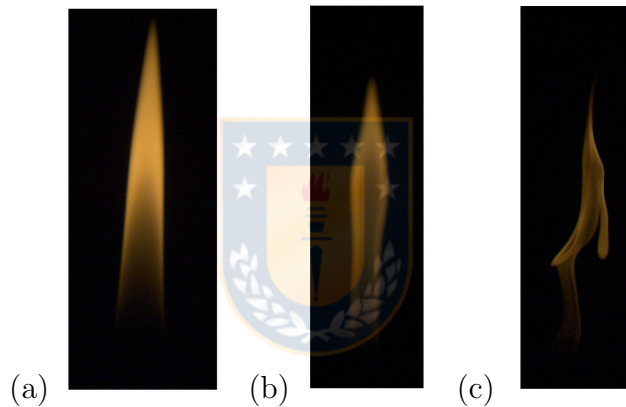
Dado que la matriz de entrenamiento (Fig. 4.1) es la misma para todo el proceso de combustión es que se preservan los mismos componentes principales (Fig. 4.6) obtenidos anteriormente. Además, la SSF de esta cámara, la cual es dada por el fabricante, se puede ver en la Fig. (4.13), donde se considera el rango entre los 400 [nm] y 700 [nm].

A continuación, en la Fig. 4.14 se muestra un ejemplo de las imágenes de llama con distintos flujos másicos obtenidos por la cámara Basler acA1920-150uc.

A partir de las imágenes de los diferentes flujos másicos en distintos puntos de operación



**Fig. 4.13:** Función sensibilidad espectral dada por el fabricante. (Fuente: [70])



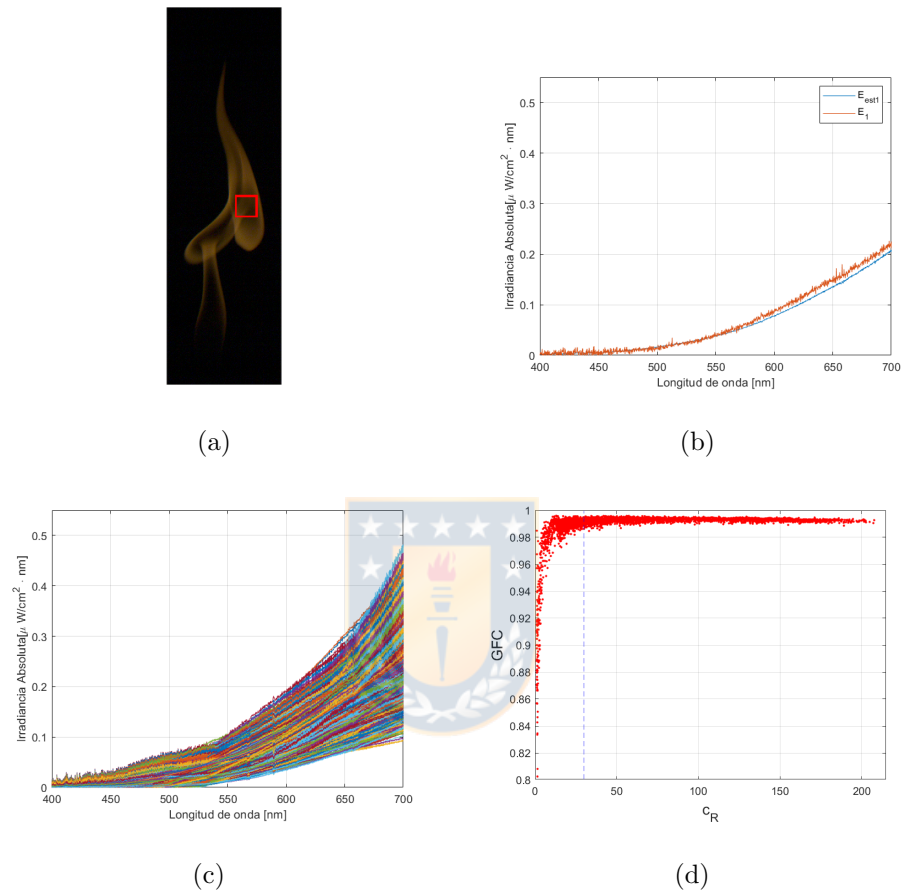
**Fig. 4.14:** Imagen distintos flujos máxicos de llama (a) Llama laminar (b) Llama de transición (c) Llama turbulenta. (Fuente: Elaboración Propia).

(ejemplo en Fig. 4.14) y de los distintos componentes necesarios nombrados anteriormente es posible realizar una correcta recuperación espectral, como se muestra en el esquema de la Fig 3.1, a continuación se realiza la recuperación espectral a través del algoritmo de Maloney-Wandell.

### Cámara Basler acA1920-150uc

En la Fig. 4.15 (a) se presenta una imagen, la cual es utilizada como ejemplo para realizar el algoritmo de recuperación espectral Maloney-Wandell píxel a píxel, este se realizó en una región determinada lo cual está indicado en el cuadro rojo. El resultado obtenido se puede ver en la Fig. 4.15 (b) el cual compara el espectro promedio de la recuperación espectral en el cuadro rojo

con respecto a un espectro aleatorio calibrado obtenido del espectrofotómetro y en la figura (c) podemos observar la recuperación espectral píxel a píxel de toda la llama, dado que en un píxel de imagen de llama se encuentra contenido nuestro espectro recuperado.



**Fig. 4.15:** (a) Imagen de llama original (b) estimación espectral promedio ( $E_{est1}$ ) en comparación con un espectro calibrado aleatorio de la llama ( $E_1$ ), obteniendo un GFC entre ambas curvas de 0.9985. (c) Gráfico de la recuperación espectral píxel por píxel de toda la llama. (d) Gráfico intensidad de píxel en el canal rojo ( $C_R$ ) vs la métrica GFC.<sup>2</sup> (Fuente: Elaboración Propia).

Debido a que son procesos distintos, no es posible hacer una comparación de los espectros recuperados con las distintas cámaras (Fig. (4.7) y (4.8)). Sin embargo, al restringir los espectros ruidosos con el parámetro GFC, dado que se parametrizó con valores mayores a 30 ( $C_R > 30$ ), este nos asegura que vamos a tener una coincidencia de un 0.97 (donde un GFC cercano a 1 significa una excelente coincidencia) respecto a un espectro original, este límite se ve marcado con una línea punteada azul en la Fig (4.15) . Por lo tanto, independiente de la cámara usada, la



restricción nos asegura un buen espectro recuperado. Esto, demuestra la versatilidad que tiene el algoritmo de Maloney-Wandell, que independiente de la cámara, la cual puede poseer un sensor CCD o CMOS y una resolución de profundidad distinta, se puede lograr buenos resultados.

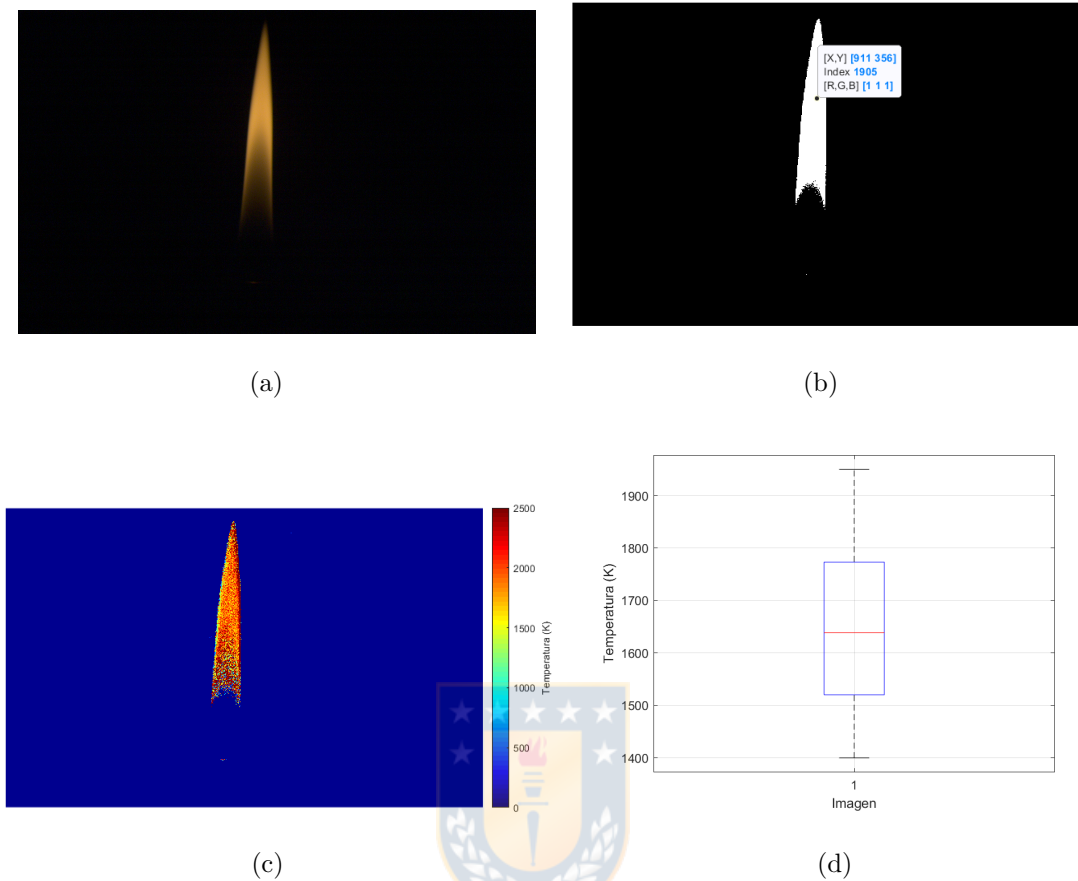
### 4.2.2. Mapa de temperatura

A partir de la estimación de temperatura estimada por el método de dos longitudes de onda (descrito en el capítulo 2), es posible realizar el mapa de temperatura pixel por pixel. A continuación en la Fig. (4.16), se puede ver un ejemplo de la obtención de un mapa de temperatura. En (a) se encuentra la imagen de llama obtenida por la cámara Basler acA1920-150uc, en (b) el mapa de temperatura sin el mapa de colores, (c) mapa de temperatura con su respectivo mapa de colores y (d) dispersión estadística del mapa de temperatura. Debido a que son distintos procesos, no es posible hacer una comparación de temperatura con respecto a las anteriores (Fig. 4.9 y 4.10), sin embargo, para esta cámara, se realizó la validación de temperatura, obteniendo un bajo error, esto se vera con mayor detalles en la sección 4.2.5.

### 4.2.3. Mapa de radiación local

A continuación en la Fig. (4.17), se muestra un ejemplo de un mapa de radiación local obtenido a través de los espectros recuperados de las imágenes de llama. En (a) se ve un ejemplo de la imagen a color de la llama, en (b) se aprecia el mapa de radiación local y en (c) la dispersión estadística asociada al mapa de radiación local de la imagen (b).

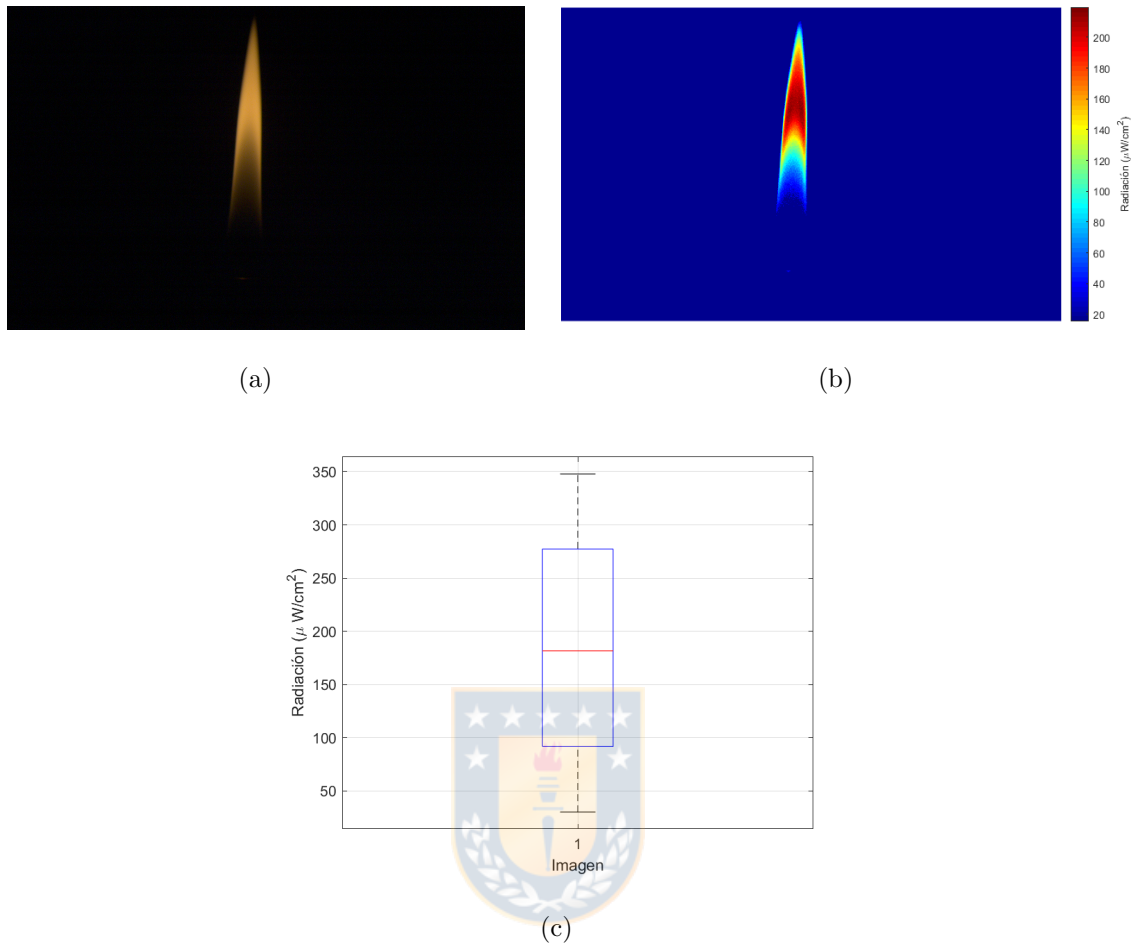
La temperatura y la radiación local fueron estimadas en una imagen de llama laminar y tal como se vio en los resultados anteriores (llamas turbulentas), hay una diferencia clara entre las imágenes de estimación de temperatura (Fig. 4.16 (c)) y las de radiación local (Fig. 4.17(b)), ya que, la estimación de temperatura muestra una imagen homogénea y la de radiación local indica zonas con distinta energía dentro de la llama. Esto, demuestra lo versátil que es el algoritmo de Maloney-Wandell, ampliando las opciones de sensado y estudio de la llama.



**Fig. 4.16:** (a) Ejemplo de una imagen de una llama en un punto de operación (b) y (c) Mapa de temperatura de la llama (d) Dispersión estadística, se aprecia que el promedio de la temperatura de la imagen es  $1650.2 \pm 153.14 [K]$ .<sup>3</sup> (Fuente: Elaboración Propia).

#### 4.2.4. Resultados en distintos puntos de operación

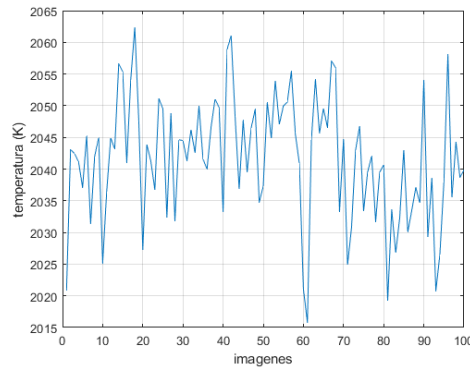
Para la obtención de los resultados en distintos puntos de operación, se generan tres tipos diferentes de llamas en el mechero Bunsen, modificando el flujo másico de gas LPG: el primer experimento se llevó a cabo sobre llamas laminares, el segundo experimento sobre llamas de transición (entre laminar y turbulento) y finalmente en el ultimo experimento se generaron llamas turbulentas. Para cada tipo de llama se configuraron 5 tipos diferentes de flujos de aire, cambiando el porcentaje de acceso de aire en el quemador: 0 % (completamente cerrado), 25 %, 50 %, 75 % y 100 % (completamente abierto), los cuales definimos como punto de operación.



**Fig. 4.17:** (a) Ejemplo de una imagen de una llama en un punto de operación (b) Mapa de radiación local de la llama (c) Dispersión estadística, nos muestra que el promedio de la radiación local de la imagen es  $183.8 \pm 95.98$  [ $K$ ].<sup>3</sup> (Fuente: Elaboración Propia).

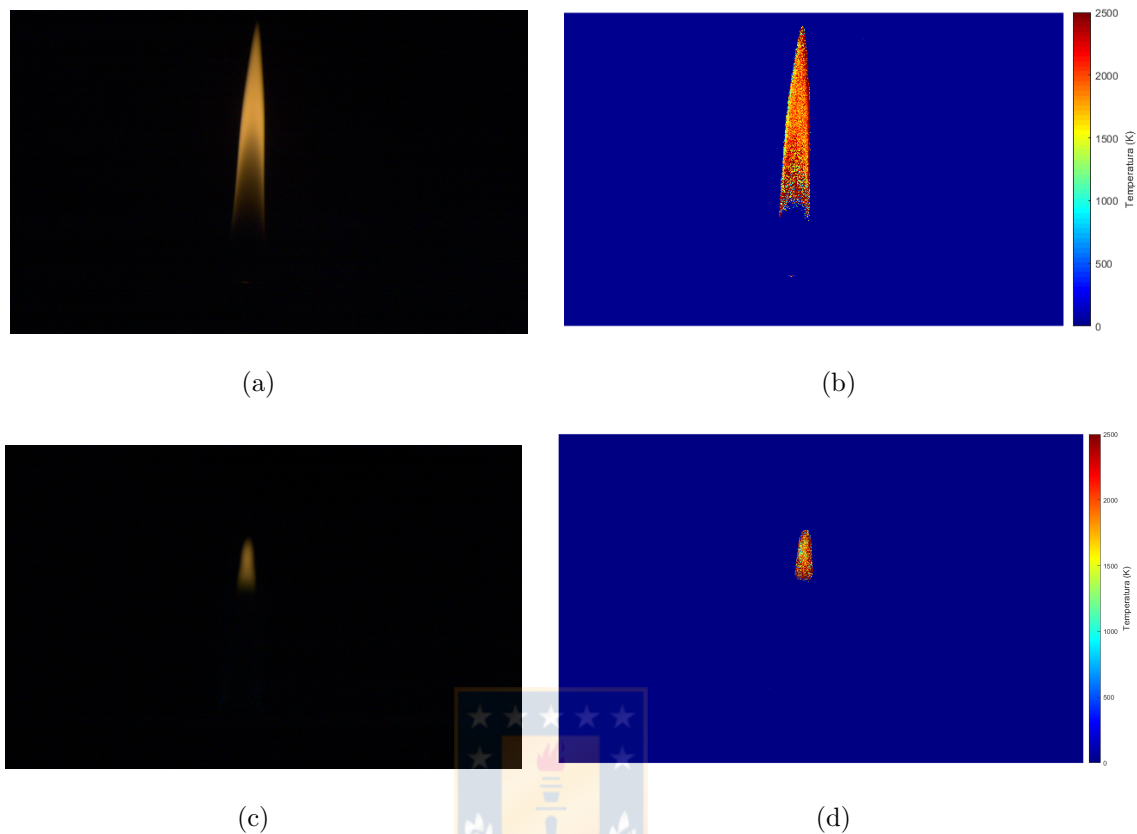
## Temperatura

En este análisis se consideraron 100 imágenes por punto de operación en cada uno de los flujos másicos. Para realizar este análisis se considera el promedio por imagen de las distintas temperaturas estimadas a partir de los espectros recuperados en cada píxel, obteniendo una temperatura promedio por imagen, es decir se calcula un promedio en las 100 imágenes como se puede ver en la Fig. 4.18, así, se promedian estos valores a partir de estas 100 imágenes y se obtiene un promedio total de temperatura por cada punto de operación, como se puede ver en la Fig. 4.20.



**Fig. 4.18:** La figura pertenece al primer punto de operación de la llama laminar, de las cuales se obtuvieron 100 imágenes. Se puede apreciar, el promedio de la temperatura calculada a partir por los mapas de temperatura obtenidos, donde el promedio total es  $2.017,6 \pm 13,39$  K. (Fuente: Elaboración Propia).

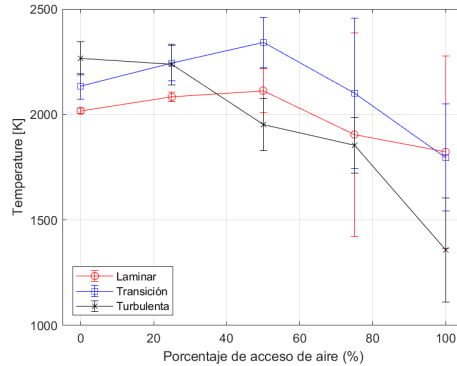
A continuación, en la Fig. (4.19) se aprecia una llama de tipo laminar, la cual se diferencia por la cantidad de acceso de aire que entra al mechero. Para la imagen (a) el acceso de aire en el quemador es de 0% (representando el primer punto de operación) y para la imagen (c) el acceso de aire en el quemador es de 100% (representando el quinto punto de operación). Por lo tanto, la imagen (a) representa una combustión incompleta, mientras que la imagen (c) representa una combustión completa. También, se muestra su respectivo mapa de temperatura, la imagen (b) es el mapa de (a) y la imagen (d) es el mapa de (c).



**Fig. 4.19:** (a) Ejemplo de una imagen de una llama de tipo laminar con un acceso de aire en la entrada del mechero de 0% o cerrado, (b) Mapa de temperatura de la llama (a), (c) Ejemplo de una imagen de una llama de tipo laminar con un acceso de aire en la entrada del mechero de 100% o completamente abierto, (d) Mapa de temperatura de la llama (c). (Fuente: Elaboración Propia).

De la Fig. 4.20, se aprecia el comportamiento de la temperatura total, se puede ver que para los tipos de llama laminar y de transición la temperatura promedio tiende a aumentar a medida que crece el porcentaje de acceso de aire hasta el 50%, luego la temperatura tiende a disminuir. Mientras que para el tipo de llama turbulenta la temperatura promedio tiende a disminuir a medida que aumenta el acceso de aire, además, en los tres tipos de llama la varianza aumenta mientras aumenta el acceso de aire. Debido a que este experimento se llevo a cabo en llamas no confinadas y que no poseíamos la información de distintas variables como lo son el hollín o diferentes productos derivados de la combustión, no es posible dar una explicación precisa a este fenómeno. Sin embargo, cumple el objetivo de este estudio, al logra medir distintas variaciones

de temperatura para diferentes condiciones de la llama, ya sea flujo másico y porcentaje de acceso de aire en el mechero.

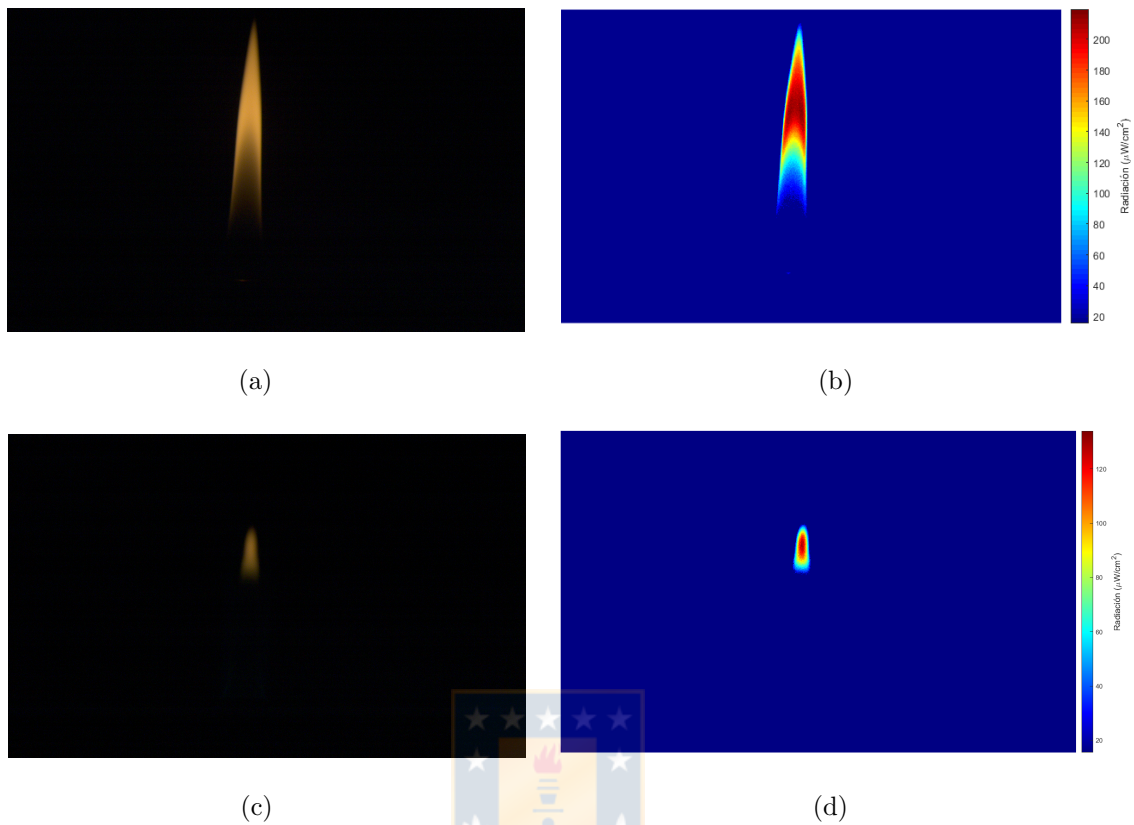


**Fig. 4.20:** Comportamiento de la temperatura para los diferentes flujos másicos en los que se modifican las condiciones aire/combustible. (Fuente: Elaboración Propia).



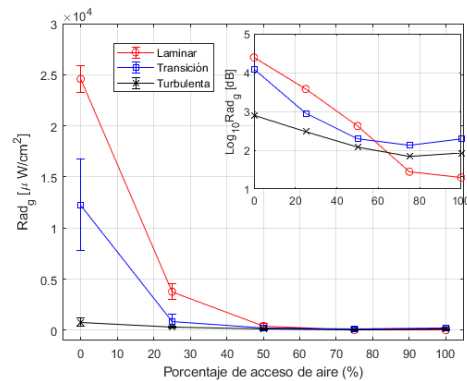
## Radiación Global

Finalmente, a partir de la radiación local, las cuales se ven ejemplificadas en la Fig. 4.21 (b) para un acceso de aire del mechero de 0 % o cerrado y (d) para un acceso de aire del mechero de 100 % o abierto y en el que ambas figuras, demuestran zonas con distintos niveles energéticos para las diferentes partículas que están entrando en estado de combustión. Se puede obtener la radiación global para los distintos flujos másicos, dada en la Ecuación (2.19).



**Fig. 4.21:** (a) Ejemplo de una imagen de una llama de tipo laminar con un acceso de aire en la entrada del mechero de 0% o cerrado, (b) Mapa de radiación de la llama (a), (c) Ejemplo de una imagen de una llama de tipo laminar con un acceso de aire en la entrada del mechero de 100% o completamente abierto, (b) Mapa de radiación de la llama (c). (Fuente: Elaboración Propia).

A continuación en la Fig. 4.22 se observa el comportamiento de la radiación global ( $Rad_g$ ) en los distintos tipos de llama con respecto a la entrada de aire, además de ver su comportamiento logarítmico dentro de esta figura.



**Fig. 4.22:** Comportamiento del índice de radiación global para los diferentes flujos másicos en los que se modifican las condiciones aire/combustible y su comportamiento en logaritmo en base 10 del índice de radiación global.<sup>4</sup> (Fuente: Elaboración Propia).

Se puede apreciar de la Fig. 4.22, que a diferencia del índice de temperatura, la radiación global promedio y su desviación estándar disminuyen rápidamente a medida que aumenta el acceso de aire en el mechero. Este resultado muestra que cuando aumenta el acceso de aire, el tamaño de la llama disminuye (parámetro  $A_f$  en la Ecuación (2.19)) a una distancia  $R$ . Por lo tanto,  $Rad_g$  disminuye. Por otro lado, el aumento de la desviación estándar a menores porcentajes de acceso de aire, se debe a que al disminuir el acceso de aire, contamos con un número mayor de partículas con combustión incompleta, las cuales producen distintas reparticiones de energía en la llama, proporcionando información sobre la concentración y distribución de energía a lo largo del perfil axial y radial. Ya que nos encontramos frente a llamas no confinadas y que no estamos midiendo variables importantes como el hollín o distintos productos derivados de la combustión, no es posible obtener mayores conclusiones. Sin embargo, cumple con el objetivo de este trabajo, al obtener un nuevo índice a observar para el comportamiento de los distintos tipos de llamas mientras va variando su acceso de aire.

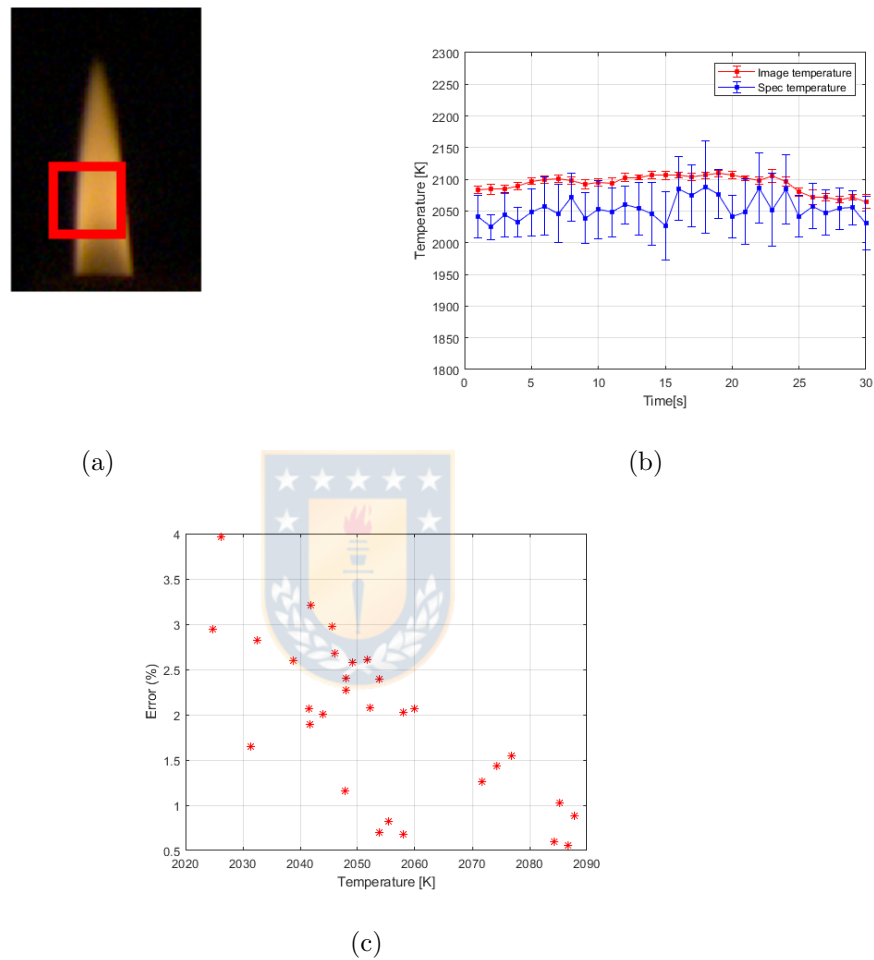
#### 4.2.5. Validación estimación de temperatura

Para obtener una correcta estimación de temperatura a partir de los espectros estimados de las distintas imágenes, es necesario poder validar esta estimación con algún instrumento base, el cual se encuentre validado.



Para validar el modelo de temperatura, se eligió como instrumento base el espectrofotómetro Thorlabs CCS-200, ya que al estimar la temperatura con el método de dos longitudes de onda con los espectros medidos con el espectrofotómetro en la combustión de hidrocarburos, estos presentan un error de un 0.32 % al ser comparados con una termocupla, esto se puede ver mas en detalle en Yan et al.(2020) [71]. Así, se miden espectros de una llama laminar en una zona puntual y se estimó la temperatura a través del método de dos longitudes de onda. De esta forma, se estimó la temperatura con los espectros recuperados obtenidos en las imágenes en esa zona puntual, los cuales al ser comparados con los espectros reales se obtiene un  $GFC = 0.9981$ . Luego, la temperatura se comparó durante 30 segundos, obteniendo como resultado la Fig. (4.23) (b). Se puede apreciar en la Fig. (4.23) (c) que el error máximo es de un 4 % y a medida que aumenta la temperatura el error va disminuyendo.





**Fig. 4.23:** (a) Imagen de llama laminar. La zona roja resaltada era el área del punto de medición usando el espectrofotómetro y la zona de cálculo de los espectros recuperados. (b) Comportamiento de la temperatura durante 30 segundos. (c) Error relativo con respecto a la temperatura estimada usando TCP con los datos medidos del espectrofotómetro.<sup>5</sup> (Fuente: Elaboración Propia).

# Capítulo 5

## Conclusiones y Trabajo a futuro

### 5.1. Conclusiones

En esta tesis, se ha presentado un método para recuperar imágenes de llamas hiperspectrales cuando combustiona el combustible LPG, para estimación de temperatura, radiación local y global. Este método se implementó con distintas cámaras tricromáticas (Basler acA 1920-50gc con sensor CMOS y una profundidad de píxeles de 12 bits, Basler scA 1930-17gc con sensor CCD y una profundidad de píxeles 8 bits y Basler acA 1920-150uc con sensor CMOS y una profundidad de píxeles de 8 bits) y aplicando el procedimiento de recuperación espectral de Maloney-Wandell, proporcionando así un cubo de datos hiperspectrales recuperados. La temperatura de la llama, la radiación local emitida (a nivel de píxel) y la radiación global se estimaron utilizando estos datos hiperspectrales. El método de recuperación espectral se implementó una vez obtenidas las mediciones de los espectros de llama, obteniendo así, una matriz de entrenamiento, utilizando un espectrofotómetro calibrado en la banda espectral entre 400-700 nm, y midiendo en las regiones de llama con hollín. A partir de estos espectros, se realizó el análisis de componentes principales (PCA). Se utilizaron tres componentes principales para implementar el procedimiento de recuperación espectral dado a que estos contienen 99,8% de la información espectral de la matriz de entrenamiento. Para validar el enfoque, primero, se definió un umbral en la respuesta del sensor, de manera de definir un píxel válido. Este umbral se calculó comparando los espectros recuperados sobre una imagen de llama turbulen-

ta, con los espectros de entrenamiento, utilizando la métrica GFC. Por lo tanto, el umbral se definió en  $c_R > 30$  (respuesta del sensor rojo), asegurando así un  $GFC > 0,97$  en los espectros recuperados (donde un GFC cercano a 1 significa una excelente coincidencia), eliminando los espectros ruidosos. Luego, se realizó un procedimiento de validación para la recuperación espectral y estimación de temperatura comparando los resultados con los espectros medidos con el espectrofotómetro calibrado. La validación exhibió una excelente coincidencia, con un promedio de  $GFC = 0,9981$ , y una diferencia de temperatura estimada menor a 4%. Después de la validación, se procedió a calcular la distribución espacial de la temperatura de la llama y la radiancia local emitida, proporcionando así dos imágenes con color falso. A diferencia del mapa de temperatura, que exhibió una distribución más uniforme, estos mapas mostraron una distribución adecuada de la radiación emitida por la llama, junto con el perfil axial y radial. Finalmente, se implementaron tres tipos de llamas (laminar, de transición y turbulenta) en las pruebas experimentales, operando a diferentes porcentajes de acceso de aire previstos para un mechero Bunsen. Para cada condición de operación se adquirieron 100 imágenes de llama con la cámara Basler acA 1920-150uc, a partir de las cuales se obtuvieron cubos hiperespectrales. A partir de estos datos hiperespectrales se calculó la temperatura media y los índices de radiancia global. Los resultados muestran que el enfoque propuesto proporciona información sobre la condición de combustión, proporcionando así una herramienta de imagen importante para monitorear los procesos de combustión.

Cabe destacar que esta tesis fue parte del proyecto Fondef IDeA ID18I10236 denominado “Sistema de diagnóstico energético y medioambiental de procesos de combustión basado en red de sensores ópticos embebidos”. Aportando con los algoritmos de recuperación espectral para la estimación de los mapas de temperatura mediante el método de dos longitudes de onda y radiación local mediante  $Rad_p$ , enfatizando que esta campaña experimental esta habilitada para obtener una base de datos multidimensional, consiguiendo modelos de recuperación espectral en línea y calibrados en tiempo real, en base a espectros e imágenes medidas simultáneamente y con un retraso no influyente.

## 5.2. Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro se podría profundizar en el algoritmo de recuperación espectral Maloney-Wandell en llamas de distintos combustibles usados, en las diferentes calderas a nivel industrial, como biomasa, gas natural, diésel, etc. También, realizar una validación para la radiación local al ser comparada con un instrumento de referencia como lo es el radiómetro. Por otro lado, aumentar la cantidad de imágenes por punto de operación para ver si los indicadores mejoran o empeoran y trabajar bajo condiciones más controladas de la llama, es decir en llamas confinadas, con la posibilidad de medir más variables como el hollín y distintos productos asociados a esta, con el fin de dar una explicación más detallada a los comportamientos de la temperatura en los diferentes tipos de llama con distintos acceso de aire en el mechero Bunsen. Además, buscar un indicador de desempeño el cual sea representativo y pueda comparar los espectros recuperados con los espectros medidos del espectrofotómetro de toda la llama en sus respectivos puntos de operación. Por otra parte, buscar un parámetro que nos permita diferenciar cual es la mejor cámara y si estas presentan alguna dependencia respecto a las características técnicas del sensor óptico para realizar la recuperación espectral para este sistema. Finalmente, realizar una correlación entre los radicales detectados a través de los espectros recuperados con un analizador de gases de combustión, como por ejemplo el Testo 350.

# Bibliografía

- [1] G.-C. Ding, P. Ji, and M.-Y. GENG, “Technical assessment of multi-generation energy system driven by integrated renewable energy sources: Energetic, exergetic and optimization approaches,” *Fuel*, vol. 331, p. 125689, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236122025182>
- [2] S. Sinsel, R. Riemke, and V. Hoffmann, “Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review,” *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 2271 – 2285, 2020. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119309875>
- [3] J. Liang, M. Nabi, P. Zhang, G. Zhang, Y. Cai, Q. Wang, Z. Zhou, and Y. Ding, “Promising biological conversion of lignocellulosic biomass to renewable energy with rumen microorganisms: A comprehensive review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 134, p. 110335, 2020. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120306237>
- [4] W. S. Ebhota and T. Jen, “Fossil fuels environmental challenges and the role of solar photovoltaic technology advances in fast tracking hybrid renewable energy system,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 97–117, 2020.
- [5] CNE, “Reporte mensual julio ernc,” vol. 89, 2022.
- [6] C. N. de Energía, “Anuario estadístico de energía,” 2021.

- [7] C. Geng, W. Yang, X. Sun, X. Wang, Z. Bai, and X. Zhang, “Emission factors, ozone and secondary organic aerosol formation potential of volatile organic compounds emitted from industrial biomass boilers,” *Journal of Environmental Sciences*, vol. 83, pp. 64 – 72, 2019. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074218324665>
- [8] S. Zheng, W. Cai, C. Zhao, D. Li, J. Zhang, and Q. Lu, “On the measurement of flame temperature and emissivity based on multispectral imaging technique,” *Measurement*, vol. 196, p. 111272, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224122005152>
- [9] U. Guth, P. Shuk, and C. McGuire, “Gas sensing technologies in combustion: A comprehensive review,” *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 103–110, 2020.
- [10] C. Toro, L. Arias, S. Torres, and D. Sbarbaro, “Flame spectra-temperature estimation based on a color imaging camera and a spectral reconstruction technique,” *Applied Optics*, vol. 53, no. 28, pp. 6351–6361, 2014.
- [11] J. Pino, H. O. Garcés, J. Cuevas, L. E. Arias, A. J. Rojas, and A. Fuentes, “Soot propensity by image magnification and artificial intelligence,” *Fuel*, vol. 225, pp. 256 – 265, 2018. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236118305490>
- [12] F. Giuliani, L. Andracher, V. Moosbrugger, N. Paulitsch, and A. Hofer, “Combined optic-acoustic monitoring of combustion in a gas turbine,” *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*, vol. 5, no. 3, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2504-186X/5/3/15>
- [13] H. Soltanian, M. Z. Targhi, and H. Pasdarshahri, “Chemiluminescence usage in finding optimum operating range of multi-hole burners,” *Energy*, vol. 180, pp. 398 – 404, 2019. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219309818>
- [14] C. Liu, X. Hu, G. Chen, and J. Lu, “Temperature and nox distribution characteristics of coal particles under high-temperature and low-oxygen environments simulating mild oxy-coal

- combustion conditions,” *Journal of the Energy Institute*, vol. 101, pp. 73–86, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1743967122000083>
- [15] M. Mekhregin, G. Miroshnichenko, A. Chistiakov, D. Bolotov, A. Ashirov, A. Zubko, and I. Meshkovskiy, “Combination of soot pyrometry and c2 emission spectroscopy for temperature measurement during combustion of hydrocarbons,” *Measurement*, vol. 166, p. 108242, 2020. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224120307818>
- [16] M. Mekhregin, V. Guryev, I. Meshkovskii, D. Smirnov, and A. Sukhinets, “Development of sensor for spectral monitoring of combustion processes in gas-turbine engines,” in *2018 IEEE East-West Design Test Symposium (EWDTS)*, 2018, pp. 1–4.
- [17] C. T. Salinas, Y. Pu, C. Lou, and D. B. dos Santos, “Experiments for combustion temperature measurements in a sugarcane bagasse large-scale boiler furnace,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 175, p. 115433, 2020. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431119361964>
- [18] M. Mekhregin, I. Meshkovskii, V. Tashkinov, V. Guryev, A. Sukhinets, and D. Smirnov, “Multispectral pyrometer for high temperature measurements inside combustion chamber of gas turbine engines,” *Measurement*, vol. 139, pp. 355 – 360, 2019. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224119302027>
- [19] S. Sawada, D. Okada, N. Nakatsuka, K. Tainaka, T. Hori, J. Hayashi, and F. Akamatsu, “Time-series temperature measurement during combustion of volatile matter and coal char of a single pulverized coal particle via magnified two-color pyrometry with blue backlit imaging,” *Energy & Fuels*, 2020.
- [20] S. A. Reggeti, A. K. Agrawal, and J. A. Bittle, “Two-color pyrometry system to eliminate optical errors for spatially resolved measurements in flames,” *Appl. Opt.*, vol. 58, no. 32, pp. 8905–8913, Nov 2019. [Online]. Available: <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-58-32-8905>



- [21] W. Díaz, C. Toro, E. Balladares, V. Parra, P. Coelho, G. Reyes, and R. Parra, “Spectral characterization of copper and iron sulfide combustion: A multivariate data analysis approach for mineral identification on the blend,” *Metals*, vol. 9, no. 9, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/9/1017>
- [22] R. Khatami and Y. A. Levenski, “On the deduction of single coal particle combustion temperature from three-color optical pyrometry,” *Combustion and Flame*, vol. 158, no. 9, pp. 1822–1836, 2011.
- [23] R. Arablouei, E. Goan, S. Gensemer, and B. Kusy, “Fast and robust pushbroom hyperspectral imaging via dmd-based scanning,” *Novel Optical Systems Design and Optimization XIX*, Sep 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2239107>
- [24] A. R. Jones, “Flame failure detection and modern boilers,” *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 21, no. 10, pp. 921–928, oct 1988. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088%2F0022-3735%2F21%2F10%2F001>
- [25] L. Arias, J. Cifuentes, M. Marín, F. Castillo, and H. Garcés, “Hyperspectral imaging retrieval using modis satellite sensors applied to volcanic ash clouds monitoring,” *Remote Sensing*, vol. 11, no. 11, p. 1393, 2019.
- [26] H. O. Garces, L. E. Arias, A. J. Rojas, J. Cuevas, and A. Fuentes, “Combustion diagnostics by calibrated radiation sensing and spectral estimation,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 18, pp. 5871–5879, 2017.
- [27] M. A. López-Álvarez, J. Hernández-Andrés, E. M. Valero, and J. Romero, “Selecting algorithms, sensors, and linear bases for optimum spectral recovery of skylight,” *JOSA A*, vol. 24, no. 4, pp. 942–956, 2007.
- [28] L. Arias and S. Torres, “On the flame spectrum recovery by using a low-spectral resolution sensor,” in *Iberoamerican Congress on Pattern Recognition*. Springer, 2011, pp. 256–263.
- [29] I. Glassman, R. A. Yetter, and N. G. Glumac, *Combustion*. Academic press, 2014.

- [30] A. A. A. Al-Tabbakh, N. Kamarulzaman, and A. AL-ZUBAIDI, “Synthesis and properties of a spinel cathode material for lithium ion battery with flat potential plateau,” *Turkish Journal of Physics*, vol. 39, no. 2, pp. 187–198, 2015.
- [31] S. B. Hariharan, P. M. Anderson, H. Xiao, M. J. Gollner, and E. S. Oran, “The blue whirl: Boundary layer effects, temperature and oh\* measurements,” *Combustion and Flame*, vol. 203, pp. 352–361, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218019300823>
- [32] B. Haynes and H. Wagner, “Soot formation,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 7, no. 4, pp. 229 – 273, 1981. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360128581900010>
- [33] J. Warnatz, U. Maas, R. W. Dibble, and J. Warnatz, *Combustion*. Springer, 2006.
- [34] S. Menon, J. Hansen, L. Nazarenko, and Y. Luo, “Climate effects of black carbon aerosols in china and india,” *Science*, vol. 297, no. 5590, pp. 2250–2253, 2002.
- [35] M. Becerra, A. Jerez, B. Aballay, H. O. Garcés, and A. Fuentes, “Forecasting emergency admissions due to respiratory diseases in high variability scenarios using time series: A case study in chile,” *Science of The Total Environment*, vol. 706, p. 134978, 2020. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719349708>
- [36] J. Noda, S. Tomizawa, K. Takahashi, K. Morimoto, and S. Mitarai, “Air pollution and airborne infection with mycobacterial bioaerosols: a potential attribution of soot,” *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 19, no. 2, pp. 717–726, 2022.
- [37] P. Pedata, N. Bergamasco, A. D’Anna, P. Minutolo, L. Servillo, N. Sannolo, and M. L. Balestrieri, “Apoptotic and proinflammatory effect of combustion-generated organic nanoparticles in endothelial cells,” *Toxicology Letters*, vol. 219, no. 3, pp. 307 – 314, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378427413001227>

- [38] E. M. Wong, W. F. Walby, D. W. Wilson, F. Tablin, and E. S. Schelegle, “Ultrafine particulate matter combined with ozone exacerbates lung injury in mature adult rats with cardiovascular disease,” *Toxicological Sciences*, vol. 163, no. 1, pp. 140–151, 2018.
- [39] H. M. F. Amin and W. L. Roberts, “Investigating soot parameters in an ethane/air counterflow diffusion flame at elevated pressures,” *Combustion Science and Technology*, vol. 0, no. 0, pp. 1–16, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/00102202.2020.1715964>
- [40] A. Fuentes, R. Henríquez, F. Nmira, F. Liu, and J.-L. Consalvi, “Experimental and numerical study of the effects of the oxygen index on the radiation characteristics of laminar coflow diffusion flames,” *Combustion and Flame*, vol. 160, no. 4, pp. 786 – 795, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218012003677>
- [41] J. Warnatz, U. Maas, R. W. Dibble, and J. Warnatz, *Combustion*. Springer, 1996, vol. 2.
- [42] I. Martínez, *Termodinámica básica y aplicada*. Universidad Politécnica de Madrid, 1992.
- [43] D. S. Jeon, G. J. Hwang, H. J. Jang, and N. I. Kim, “Lift-off characteristics of non-premixed jet flames in laminar/turbulent transition,” *Combustion and Flame*, vol. 238, p. 111948, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001021802100691X>
- [44] F. Yunge, “Modulación acústica de una llama de difusión laminar axisimétrica,” *Memoria de Título, Ingeniero Civil Industrial, Universidad Técnico Federico Santa María*, 2016.
- [45] F. White and H. Xue, *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill Education, 2021. [Online]. Available: <https://books.google.cl/books?id=9R42zAEACAAJ>
- [46] O. A. Zargar, R. F. Huang, and C. M. Hsu, “Effect of acoustic excitation on flames of swirling dual-disk double-concentric jets,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 100, pp. 337–348, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177718310823>
- [47] S. R. Turns *et al.*, *Introduction to combustion*. McGraw-Hill Companies, 1996, vol. 287.

- [48] L. Shan, H. Huang, B. Hong, J. Zhao, D. Wang, and M. Kong, “Temperature measurement method of flame image fusion with different exposures,” *Energies*, vol. 13, no. 6, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/6/1487>
- [49] C. Carvajal, “Medición de temperatura espacial de llama en procesos de combustión, mediante una cámara CCD y algoritmos avanzados de estimación espectral,” Informe de memoria de título para optar al título de Ingeniero Civil en Telecomunicaciones, Universidad de Concepción, Dic 2013.
- [50] L. Arias, S. Torres, D. Sbarbaro, and P. Ngendakumana, “On the spectral bands measurements for combustion monitoring,” *Combustion and Flame*, vol. 158, no. 3, pp. 423–433, 2011.
- [51] J. Lin, X. Zhang, K. Liu, and W. Zhang, “Emissivity characteristics of hydrocarbon flame and temperature measurement by color image processing,” *Energies*, vol. 12, no. 11, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/11/2185>
- [52] [Online]. Available: <https://www.oceaninsight.com/>
- [53] Y. Çenegel, *Transferencia de calor y masa*. Mexico DF, McGRAW-HILL, 2007.
- [54] L. Arias, “Sensores Ópticos, clases,” Universidad de Concepción, Tech. Rep., 2021.
- [55] F. Meriaudeau, “Real time multispectral high temperature measurement: Application to control in the industry,” *Image Vision Comput.*, vol. 25, no. 7, pp. 1124–1133, Jul. 2007. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.imavis.2006.04.019>
- [56] P. Ngendakumana, B. Zuo, and E. Winandy, “A spectroscopic study of flames for a pollutant formation regulation in a real oil boiler,” in *Proc. 2th Int’l Conf. on Tech. and Combustion for a Clean Environment*, 1993.
- [57] A. G. Gaydon, H. G. Wolfhard, and S. Penner, “Flames, their structure, radiation and temperature,” *Journal of Applied Mechanics*, vol. 27, p. 600, 1960.
- [58] J. Yang, Y. Gong, J. Wei, Q. Guo, F. Wang, and G. Yu, “Chemiluminescence diagnosis of oxygen/fuel ratio in fuel-rich jet diffusion flames,” *Fuel Processing Technology*, vol. 232,

- p. 107284, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382022001242>
- [59] G. Hidegh and V. Józsa, “Correlation analysis of chemiluminescent and pollutant emissions of a liquid-fueled turbulent swirl burner,” *Journal of the Energy Institute*, 2020.
- [60] H. O. Garces, L. Arias, A. J. Rojas, C. Carrasco, A. Fuentes, and O. Farias, “Radiation measurement based on spectral emissions in industrial flames,” *Measurement*, vol. 87, pp. 62–73, 2016.
- [61] I. Jolliffe, *Principal Component Analysis*. 2 edition, Springer, USA,, 1986.
- [62] M. Christopher, *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, USA,, 2006.
- [63] F. L. Gewers, G. R. Ferreira, H. F. de Arruda, F. N. Silva, C. H. Comin, D. R. Amancio, and L. da F. Costa, “Principal component analysis: A natural approach to data exploration,” 2018.
- [64] A. Ribes and F. Schmitt, “Linear inverse problems in imaging,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, no. 4, 2008.
- [65] M. Cubero-Castan, K. Schneider-Zapp, M. Bellomo, D. Shi, M. Rehak, and C. Strecha, “Assessment of the radiometric accuracy in a targetless workflow using pix4d software,” *Red*, vol. 660, p. 40, 2018.
- [66] [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/industry-expertise/imaging-optics/imaging-resource-guide/>
- [67] [Online]. Available: <https://docs.baslerweb.com/acquisition-timing-information>
- [68] F. H. Imai, M. R. Rosen, and R. S. Berns, “Comparative study of metrics for spectral match quality,” in *Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision*, vol. 2002, no. 1. Society for Imaging Science and Technology, 2002, pp. 492–496.
- [69] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Termodinámica (8a)*. McGraw Hill Mexico, 2015.

- [70] *user's manual for gige vision cameras*, Basler.
- [71] W. Yan, A. Panahi, and Y. A. Levendis, "Spectral emissivity and temperature of heated surfaces based on spectrometry and digital thermal imaging – validation with thermocouple temperature measurements," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 112, p. 110017, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177719317431>

